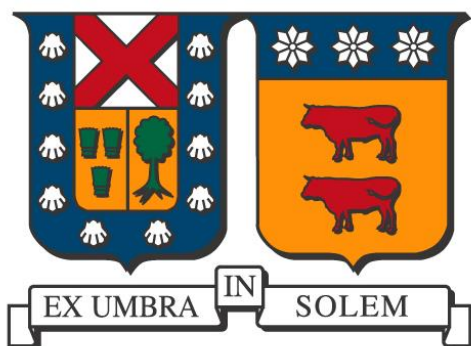


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO – CHILE



**DETERMINACIÓN DE EMISIONES DE CARBONO
NEGRO A PARTIR DE EMISIONES DE MATERIAL
PARTICULADO FINO EN VEHÍCULOS DIÉSEL**

VÍCTOR A. VALDEBENITO SILVA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA:

MAURICIO OSSES ALVARADO

PROFESOR CORREFERENTE:

SEBASTIÁN TOLVETT CARO

JUNIO 2017

When I heard the learn'd astronomer;
When the proofs, the figures, were ranged in columns
before me;
When I was shown the charts and the diagrams, to add,
divide, and measure them;
When I, sitting, heard the astronomer, where he
lectured with much applause in the lecture-room,
How soon, unaccountable, I became tired and sick;
Till rising and gliding out, I wander'd off by myself,
In the mystical moist night-air, and from time to time,
Look'd up in perfect silence at the stars.

Walt Whitman – When I heard the learn'd astronomer

Agradecimientos

En primer lugar a mi padre, a mi madre y a mi hermano por todo el apoyo emocional y cariño que me dieron durante los 6 años en que estuve estudiando y tomando ramos en la universidad. Agradezco al profesor Luis Guzmán Bonet simplemente por ser Luis Guzmán Bonet, al profesor Jaime Núñez Segovia por ser uno de los maestros más significativos en mi formación profesional. A Francisco Pino, Andrés Rosales, Karol Espinoza, Ignacio Espinoza y Juan Balagna por hacer de mis años universitarios un periodo más llevadero. A Kevin Basoa por su apoyo en el trabajo de campaña experimental de esta memoria, a Sebastián Tolvett por su visión crítica y constructiva al trabajo realizado. A Alfredo Vega Aragón por haber sido el buen jefe que fue en mi periodo de práctica. Se agradece también la oportunidad de haber contribuido al proyecto FONDAP 15110009 del CR2 y al proyecto FONDECYT 1150873 del profesor Nicolás Huneus. Por último, pero no menos importante, a Mauricio Osses: el Walter White desde mi perspectiva de Gale Boetticher (estrella; silencio perfecto).

Resumen

El carbono negro es un contaminante climático de vida corta que se distingue de otras especies que afectan la calidad del aire por no tratarse de un gas sino de un aerosol y también porque afecta al ecosistema y al cambio climático de una manera única debido a sus propiedades de absorción de la radiación electromagnética, aumentando la temperatura de las superficies donde se deposita y su interacción en la formación de nubes. Debido a que se han llevado a cabo una serie de estudios que han caracterizado su formación, su notoria interacción con el medioambiente y el efecto en el balance radiativo en los últimos años, se han canalizado esfuerzos a nivel internacional para mitigar su emisión en distintas fuentes a través de organismos internacionales como la Coalición Clima y Aire Limpio, coalición de la cual Chile es miembro activo desde el año 2012. Es en este contexto global donde nace la necesidad de generar inventarios de emisión de los contaminantes de vida corta para la modelación espacio – temporal de emisiones y la creación de políticas públicas para mitigar los efectos adversos en el clima y la salud de la población. Así, el aporte que puede generar la ingeniería mecánica en este proyecto es generar un inventario de fuentes móviles que tengan motorización diésel y gasolina. Luego, el aporte de este trabajo de memoria es la modelación de emisiones de las fuentes móviles usadas para el transporte de carga y pasajeros en ruta usando la metodología del inventario Bottom – Up. Cada categoría vehicular: buses, camiones, taxis, vehículos livianos de pasajeros y comerciales particulares es asociada a un factor de emisión por kilometraje [g/km] de dióxido de carbono y material particulado fino según estándar de emisión europeo. El inventario de carbono negro es construido a partir de las emisiones de material particulado fino en base a la evidencia científica que relaciona estas cantidades máxicas en los gases de escape y da como resultado un nivel de emisión de 1,920 [ton] en el año 2013 – donde los camiones son las mayores fuentes – y una proyección de 418 [ton] emitidas al año 2050 a nivel nacional, donde las emisiones de dióxido de carbono son usadas como método de validación del modelo.

Palabras clave: carbono negro, material particulado fino, dióxido de carbono, cambio climático, vehículos diésel, vehículos a gasolina, inventario Bottom – Up, emisiones vehiculares.

Abstract

Black carbon is a short – lived climate pollutant distinct from another species that affect the air quality by being an aerosol instead of gas and because affects the ecosystem and climate change in a unique way due to its electromagnetic radiation absorption properties heating the surface and its interaction in cloud formation. In recent years, many scientific publications have characterized its formation, its strong interaction with the environment and heating effects, and because of this it has been international efforts to mitigate the emissions from different sources through the Climate & Clean Air Coalition, where Chile is an active member since 2012. In this global context is necessary to generate emission inventories for short – lived climate pollutants for time space modeling and developing of legal mandatories for mitigating its effects on climate and human health. Thus, the contribution of mechanical engineering in this project is to generate a diesel and gasoline mobile sources inventory. Therefore, the contribution of this investigation is to model on – road vehicle emissions using the bottom – up methodology. Each vehicle type: buses, trucks, taxis, light duty passenger and commercial vehicles is associated to a carbon dioxide and particulate matter mileage – based emission factor [g/km] according to European standards. This black carbon inventory is based on the fine particulate matter mass emissions on the scientific basis that this species are related in the exhaust gases and reports a total national emission of 1,920 [ton] for the year 2013 – where trucks are the main source – and 418 [ton] in the projection to the year 2050, using the carbon dioxide emissions to validate the results.

Keywords: black carbon, fine particulate matter, carbon dioxide, emission factor, climate change, diesel vehicles, gasoline vehicles, bottom – up inventory, vehicle emissions.

Glosario de abreviaturas

3CV:	Centro de Control y Certificación Vehicular	MAC:	Sección transversal de absorción
ABC:	Nubes atmosféricas café	MAPS:	Planes y escenarios de mitigación
AERONET:	Red Robótica de Aerosoles (Aerosol Robotic Network)	MD:	Polvo mineral
AIDA:	Asociación Interamericana para la Defensa del Ambiente	MMA:	Ministerio de Medio Ambiente
ANAC:	Asociación Nacional Automotriz de Chile	MODAGEM:	Modelo agregado de emisiones
BC:	Carbono negro	MSC:	Sección transversal de dispersión
BNE:	Balance nacional de energía	N₂O:	Óxido nitroso
CCAC:	Coalición Clima y Aire Limpio	NCA:	Normas de calidad del aire
CCN:	Núcleo de condensación de nubes	NCPA:	Normas de calidad primaria del aire
CCVC:	Contaminantes climáticos de vida corta	NH₃:	Amoníaco
CFC:	Clorofluorocarbonos	NO_x:	Óxidos de nitrógeno
CH₄:	Metano	O₃:	Ozono (troposférico)
CMNUCC:	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático	OA:	Aerosol orgánico
CO:	Monóxido de carbono	OC:	Carbono orgánico
CO₂:	Dióxido de carbono	OPAC:	Propiedades ópticas de aerosoles y nubes
CONAMA:	Comisión Nacional de Medio Ambiente	PCG:	Potencial de calentamiento global
COPERT:	Programa para el cálculo de emisiones del transporte caminero	PM_{2.5}:	Material particulado fino
DPF:	Filtro de partículas diésel	PNUMA:	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP)
EC:	Carbono elemental	POA:	Aerosol orgánico primario
EPA:	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.	PPDA:	Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica
FE:	Factor(es) de emisión.	PTFE:	Politetrafluoretileno
GAINS:	Interacciones y sinergia de gases de invernadero y la contaminación del aire	RETRO:	Re – análisis de la troposfera durante los últimos 40 años
GEI:	Gases de efecto invernadero	SEC:	Superintendencia de electricidad y combustibles
GFED:	Base de datos global de emisiones por quema	SECTRA:	Secretaría de Planificación de Transporte
HCFC:	Hidroclorofluorocarbonos	SF₆:	Hexafluoruros de azufre
HFC:	Hidrofluorocarbonos	SINCA:	Sistema de Información Nacional de la Calidad del Aire
IEA:	Agencia internacional de energía	SO₂:	Dióxido de azufre
IN:	Núcleo de hielo	SOA:	Aerosol orgánico secundario
INE:	Instituto nacional de estadísticas	SPEW:	Modelo de emisión de contaminantes especiados
IPCC:	Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático	STEP:	Modelo consumo energético y emisiones para el sector transporte
ITCZ:	Zona de convergencia intertropical	TOA:	Parte superior de la atmosfera
IUPAC:	Unión Internacional de Química Pura y Aplicada	VAM:	Monitor de actividad vehicular
LAC:	Organización de América Latina y el Caribe	VLC:	Vehículo liviano comercial
		VLP:	Vehículo liviano de pasajeros
		VOC:	Componente orgánico volátil
		WMO:	Organización meteorológica mundial

Glosario de términos

El glosario de términos está orientado a algunos conceptos que podrían ser ajenos a la ingeniería mecánica como tal. Algunos conceptos específicos son explicados dentro del desarrollo de este trabajo de memoria. Las definiciones están dadas por el glosario del IPCC, por IUPAC o EPA en caso que sean conceptos específicos de cambio climático o química según sea el caso.

- **Absortividad:** fracción de radiación absorbida por la superficie o medio. Matemáticamente se define como $0 \leq \alpha \leq 1$.

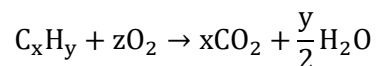
$$\alpha = \frac{\text{radiación absorbida}}{\text{radiación incidente}}$$

- **Aerosol (atmosférico):** suspensión de partículas sólidas o líquidas presentes en el aire, de tamaño comprendido entre unos pocos nanómetros y $10 \mu\text{m}$, que permanecen en la atmósfera durante varias horas o más. Los aerosoles pueden ser de origen natural o antropogénico. Pueden influir en el clima directamente, dispersando y absorbiendo radiación, e indirectamente, actuando como núcleos de condensación de nube o núcleos de hielo o modificando las propiedades ópticas y el período de vida de las nubes.
- **Albedo:** fracción de radiación solar reflejada por una superficie u objeto, frecuentemente expresada en términos porcentuales. El albedo de los suelos puede adoptar valores altos, como en las superficies cubiertas de nieve, o bajos, como en las superficies cubiertas de vegetación y los océanos. El albedo de la Tierra varía principalmente en función de la nubosidad, de la nieve, del hielo, de la superficie foliar y de la cubierta del suelo.
- **Antropogénico(a):** de actividad generada por los seres humanos o consecuencia de ella.
- **Carbonización:** proceso por el cual partículas sólidas con contenido creciente de carbono se forman a partir de material orgánico usualmente por descomposición por exposición a alta temperatura en una atmósfera inerte (pirolisis).
- **Coagulación:** proceso de contacto y adhesión por el cual las partículas dispersadas se mantienen unidas por interacciones físicas débiles que conducen finalmente a la separación de fases mediante la formación de precipitados de tamaño mayor que el coloidal.
- **Deposición húmeda:** arrastre de contaminante (o especie) debido a efectos de la lluvia, la nieve, el aguanieve o la niebla, volviendo al suelo, agua o superficie vegetal.
- **Deposición seca:** arrastre de contaminante (o especie) por efectos del viento o de la gravedad, volviendo al suelo, agua o superficie vegetal.

- **Espesor óptico:** medida de la **transmisividad** en la atmósfera en dirección vertical. Es la relación entre la radiación dispersada en la atmósfera sobre la reflejada por la superficie terrestre. Es función de la longitud de onda.
- **Forzamiento radiativo:** variación, expresada en W/m^2 , del flujo radiativo (la descendente menos la ascendente) en la tropopausa o en la parte superior de la atmósfera, debida a una variación del causante externo del cambio climático.
- **Irradiancia:** tasa de transferencia de energía de radiación sobre una superficie. Tiene unidades de potencia por unidad de longitud cuadrada; en sistema internacional W/m^2 .
- **Potencial de calentamiento global:** índice basado en las propiedades radiativas de los gases de efecto invernadero, que mide el **forzamiento radiativo** obtenido de los impulsos de emisión en la atmósfera actual, de una unidad de masa de cierto gas de efecto invernadero, integrado a lo largo de un plazo de tiempo dado, en comparación con el causado por el dióxido de carbono. El PCG representa el efecto conjunto del diferente período de permanencia de esos gases y de su eficacia relativa como causante de un forzamiento radiativo.
- **Reflectividad:** fracción de radiación reflejada por la superficie o medio. Matemáticamente se define como $0 \leq \rho \leq 1$.

$$\rho = \frac{\text{radiación reflejada}}{\text{radiación incidente}}$$

- **Relación estequiométrica (para la combustión):** es la proporción en masa que existe entre la cantidad de aire y combustible de hidrocarburos (diésel o gasolina en este caso), para que se complete la reacción de combustión:



La relación óptima para el diésel entre aire y combustible es 14.5 y para la gasolina 14.7. Si no se completa estas cantidades x, y, z , se producen especies como CO o el mismo BC, por ejemplo.

- **Transmisividad:** fracción de radiación a través de una superficie o medio. Matemáticamente se define como $0 \leq \tau \leq 1$.

$$\tau = \frac{\text{radiación transmitida}}{\text{radiación incidente}}$$

Índice de contenidos

RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
Glosario de abreviaturas.....	vi
Glosario de términos.....	i
Índice de contenidos.....	iii
Índice de figuras.....	v
Índice de tablas.....	vii
Introducción.....	ix
Marco General.....	ix
Objetivos.....	xi
Objetivo general.....	xi
Objetivos específicos.....	xi
CAPÍTULO I.....	1
1. Marco teórico.....	1
1.1. Contaminantes climáticos de vida corta.....	1
1.2. Carbono Negro: sus propiedades y otros conceptos relevantes.....	4
1.3. Cuantificación de niveles de Carbono Negro.....	13
1.4. Carbono Negro y su interacción con el ambiente y el clima.....	28
1.5. Carbono Negro en el contexto nacional.....	37
CAPÍTULO II.....	44
2. Metodología de trabajo.....	44
2.1. Revisión y modificación de los parámetros de entrada del modelo para el cálculo de emisiones.....	44
2.2. Determinación de las emisiones de material particulado fino para el sector transporte caminero.....	48
2.3. Determinación de tasas de vinculación de Carbono Negro y Material Particulado Fino en vehículos diésel y gasolina.....	49
2.4. Estimación de las emisiones de Carbono Negro para Chile.....	51
2.5. Realización de campaña experimental en Los Libertadores.....	51
CAPÍTULO III.....	58
3. Nivel de emisión de PM _{2.5} del sector transporte caminero nacional.....	58
3.1. Verificación de los valores de entrada por emisiones de CO ₂	58
3.2. Emisiones de PM _{2.5} para el sector transporte caminero chileno.....	62

3.3.	Observaciones y discusión de los resultados obtenidos	65
3.4.	Conclusiones del capítulo.....	68
CAPÍTULO IV.....		70
4.	Tasas de vinculación de las emisiones de Carbono Negro y Material Particulado Fino.....	70
4.1.	Consideraciones preliminares del capítulo.....	70
4.2.	Factores de conversión por tipología vehicular.....	71
4.2.1.	Factores de conversión para buses	71
4.2.2.	Factores de conversión para camiones	71
4.2.3.	Factores de conversión para vehículos livianos de pasajeros/comerciales diésel	73
4.2.4.	Factores de conversión para vehículos livianos de pasajeros/comerciales y taxis a gasolina	73
4.3.	Factores de emisión de BC diferenciando tecnologías vehiculares.....	74
4.4.	Resultados de la campaña experimental de Los Libertadores.....	76
4.4.1.	Proporción entre BC y $PM_{2.5}$ en la emisión de camiones pesados en ruta	76
4.4.2.	Observaciones y discusión de los resultados obtenidos en campaña	79
4.5.	Observaciones a los resultados del capítulo	80
4.6.	Conclusiones del capítulo.....	81
CAPÍTULO V.....		83
5.	Nivel de emisiones de BC para el sector transporte caminero nacional.....	83
5.1.	Resultados obtenidos.....	83
5.2.	Comparación con inventarios internacionales.....	85
5.3.	Observaciones y discusión de los resultados.....	86
5.4.	Conclusiones del capítulo.....	88
CAPÍTULO VI.....		89
6.	Conclusiones y recomendaciones.....	89
6.1.	Conclusiones generales	89
6.2.	Conclusiones específicas.....	89
6.3.	Recomendaciones:.....	91
BIBLIOGRAFÍA		93

Índice de figuras

Figura 1.1. Esquema general de las fuentes primarias de emisiones de carbono negro y los procesos que controlan la distribución de éste en la atmósfera y determinan su rol en el cambio climático. Fuente: Bond et al. (2013).....	3
Figura 1.2. (a) imagen de microscopio electrónico de barrido de una muestra joven de BC; (b) imagen de una cadena de BC; (c) imagen de un aglomerado compacto de BC. Fuente: Li et al. (2003) (Li, Posfai, Hobbs, & Buseck, 2003).....	5
Figura 1.3. Distribuciones de masa y número de partículas de núcleos de BC refractario: (a) la distribución de masa está normalizada al mismo valor peak. Los datos se ajustan a una distribución log - normal entre 90 - 600 nm. (b) La distribución del número de partículas se comporta de igual manera que la masa y está a escala para representar la misma masa de BC. La región sombreada clara está en un rango de 90 - 250 nm, mientras que la región sombreada oscura representa el rango de 190 - 210 nm (diámetro medio de aglomerados de BC). Fuente: Schwarz et al. (2008) (Schwarz et al., 2008).....	11
Figura 1.4. Conexiones esquemáticas entre las propiedades del BC y los aglomerados. La combinación de estas propiedades determina su contribución al forzamiento climático. Las propiedades dependen de estas especies coemitidas con el BC y de los procesos atmosféricos como la condensación o la nucleación. Adaptado de (T. C. Bond et al., 2013).....	12
Figura 1.5. Modo de asociar factores de emisión a cada fuente en un inventario a) Top – Down y b) Bottom – Up. Fuente: DICTUC.	14
Figura 1.6. Regiones para desagregar las emisiones y concentraciones a nivel mundial. Fuente: Bond et al. (2013).....	16
Figura 1.7. Emisiones anuales de BC para los años 2000 por categoría de fuentes y proporciones de aerosoles coemitidos. Las emisiones del modelo SPEW son del trabajo de Lamarque et al. [2010]; del modelo GAINS son de UNEP/WMO [2011a, 2011b] y RETRO del trabajo Schultz et al. [2008]. Fuente: Bond et al. (2013).....	19
Figura 1.8. Emisiones de BC para los años 2000 por región indicando la mayor fuente de emisión. Son los mismos datos de la Figura 1.7. Fuente: Bond et al. (2013)	20
Figura 1.9. Comparación de los forzamientos radiativos globales promedio dado a los gases de efecto invernadero CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O y ozono, y b) el CO ₂ por sí solo. El forzamiento mostrado en la parte superior de las zonas celestes es el que corresponde a la TOA, en la zona celeste es el forzamiento en la atmósfera y la zona inferior es la superficie terrestre. Estas estimaciones corresponden al año 2005, con una incertidumbre del orden del $\pm 20\%$. El forzamiento dado del BC son del estudio de (Chung, Ramanathan, Kim, & Podgorny, 2005) y tienen una incertidumbre del orden del $\pm 50\%$. El ítem d) es el forzamiento directo e indirecto de otras especies del mismo estudio citado anteriormente. Fuente: (Ramanathan & Carmichael, 2008).	30
Figura 1.10 a. Emisiones de BC en toneladas por año del estudio de Bond et al. (2004). b. Calentamiento de la atmósfera debido a la radiación solar del estudio Chung et al. (2005). Su incertidumbre es del orden de $\pm 30\%$. c. Forzamiento radiativo dado el oscurecimiento de la superficie dado el efecto de las ABCs (todos los aerosoles antropogénicos). Fuente: Ramanathan & Carmichael, (2008).....	31
Figura 1.11. Resumen cualitativo del entendimiento actual de la respuesta global del sistema climático ante las emisiones de BC. Fuente: (T. C. Bond et al., 2013).....	36
Figura 2.1. Fotografía satelital de la subida en la ruta Los Libertadores. La medición en este tramo será la más relevante para el estudio. Imagen obtenida vía Google Maps.	55

Figura 3.1. Proyección hasta el año 2050 del nivel de emisiones de CO ₂ para el sector transporte caminero usando el modelo STEP 2.0.	60
Figura 3.2. Gráfica de la proyección de las razones de cambio de la actividad (veh*km) y las emisiones de CO ₂ respecto del año 2000.	61
Figura 3.3. Gráfica de la proyección de las razones de cambio de la actividad (veh*km) y las emisiones de PM _{2.5} respecto del año 2000.	63
Figura 3.4. Proyección hasta el año 2050 del nivel de emisiones de PM _{2.5} para el sector transporte caminero usando el modelo STEP 2.0.	64
Figura 3.5. Porcentaje de distribución entre categorías para las emisiones nacionales de CO ₂ en el año 2013.	66
Figura 3.6. Porcentaje de distribución entre categorías para las emisiones nacionales de PM _{2.5} en el año 2013.	67
Figura 3.7. Porcentaje de distribución entre categorías para las emisiones nacionales de PM _{2.5} en el año 2050.	67
Figura 3.8 Porcentaje de distribución entre categorías para las emisiones nacionales de PM _{2.5} en el año 2050.	68
Figura 4.1. Diagramas de caja y bigotes de los valores de concentración de BC con respecto a la concentración de material particulado fino, distinguiendo entre nacionalidad y condición de operación.	77
Figura 5.1. Proyección de las emisiones de BC desde 1998 hasta 2050 para el sector transporte caminero chileno, desagregando por categoría vehicular. Los primeros dos años no son mostrados en la gráfica.	84
Figura 5.2. Proyección de las razones de cambio de las emisiones de PM _{2.5} y de BC tomando el año 2000 como referencia.	85
Figura 5.3. Porcentaje de distribución entre categorías para las emisiones nacionales de BC en el año 2013.	86
Figura 5.4. Porcentaje de distribución entre categorías para las emisiones nacionales de BC en el año 2050.	87

Índice de tablas

Tabla 1.1. Técnicas para medir concentración de BC, terminología del método para BC, y fuentes de sesgo sistemático. Adaptado de (T. C. Bond et al., 2013).....	15
Tabla 1.2. Valores medios de las estimaciones de las mayores fuentes de BC para quemas abiertas de Biomasa en [Gg] al año. Adaptado de Bond et al. (2013).....	21
Tabla 1.3. Valores medios de estimaciones usando el método Bottom – Up. Se trata de todas las emisiones asociadas a energía dadas en Gg año ⁻¹ . Adaptado de Bond et al. (2013).	23
Tabla 2.1. Desagregación de la información del sector transporte caminero usada en el modelo STEP 2.0. Se determinará que el porcentaje de participación de algunas de estas categorías es nula por no responder a la realidad operacional del tráfico en Chile. Fuente: (Sociedad Consultora Sistemas Sustentables Ltda., 2014).....	45
Tabla 2.2. Clasificación de vehículos para desagregación de segundo nivel. Fuente: Anuario ANAC 2014/2015, INE.	47
Tabla 2.3. Datos técnicos del contador de partículas Aerocet-531S. Fuente: data sheet del equipo.53	
Tabla 2.4. Datos técnicos del contador de partículas microAeth AE51. Fuente: data sheet del equipo.....	54
Tabla 2.5. Definición de horarios de la realización de las mediciones en Los Libertadores.....	55
Tabla 3.1. Valores de emisión de CO ₂ reportados por distintos inventarios para el año 2013 del sector transporte caminero en la Región Metropolitana.....	58
Tabla 3.2. Valores de emisión de CO ₂ reportados por distintos inventarios para el año 2013 del sector transporte caminero a nivel nacional.	58
Tabla 3.3. Emisiones de CO ₂ de la Región Metropolitana para el año 2013, desagregando por categoría vehicular, en Gg año ⁻¹	59
Tabla 3.4. Emisiones de CO ₂ a nivel nacional para el año 2013, desagregando por categoría vehicular, en Gg año ⁻¹	59
Tabla 3.5. Desagregación de las emisiones de CO ₂ del sector transporte caminero para cada región para el año 2013 en Gg año ⁻¹	59
Tabla 3.6 Valores de emisión de PM _{2.5} reportados por distintos inventarios para el año 2013 del sector transporte caminero en la Región Metropolitana. Los valores a comparar se encuentran disponibles en las bases del anteproyecto PPDA.	62
Tabla 3.7. Valores de emisión de PM _{2.5} reportados por distintos inventarios para el año 2013 del sector transporte caminero en la Región Metropolitana.....	62
Tabla 3.8. Valores de emisión de PM _{2.5} reportados por distintos inventarios para el año 2013 del sector transporte caminero a nivel nacional.	62
Tabla 3.9. Valores de emisión de PM _{2.5} reportados por distintos inventarios para el año 2013 del sector transporte caminero a nivel nacional.	63
Tabla 4.1. Tasas de vinculación de PM _{2.5} a BC utilizada en FE de buses para el modelo. Fuente (Ntziachristos et al., 2007).	71
Tabla 4.2. Tasas de vinculación de PM _{2.5} a BC utilizada para FE de camiones livianos para el modelo. Fuente (Ntziachristos et al., 2007).....	72
Tabla 4.3. Tasas de vinculación de PM _{2.5} a BC utilizada para camiones medianos para el modelo. Fuente: (Tami C. Bond et al., 2004).....	72
Tabla 4.4. Tasas de vinculación de PM _{2.5} a BC utilizada para FE de camiones livianos para el modelo. Fuente (Ntziachristos et al., 2007).....	73
Tabla 4.5. Tasas de vinculación de PM _{2.5} a BC utilizada para FE de vehículos livianos (comerciales y pasajeros) diésel para el modelo. Fuente: (Tami C. Bond et al., 2004).	73

Tabla 4.6 Tasas de vinculación de PM _{2.5} a BC utilizada para FE de vehículos livianos (comerciales y pasajeros) a gasolina para el modelo. Fuente: (Ntziachristos et al., 2007). Los valores con incertidumbre no especificada son propuestos por Bond (Tami C. Bond et al., 2004).	74
Tabla 4.7. Factores de emisión de BC para las tipologías de la categoría “Buses” del modelo en gramos de BC por kilómetro recorrido.	74
Tabla 4.8. Factores de emisión de BC para las tipologías de la categoría “Camiones” del modelo en gramos de BC por kilómetro recorrido.	75
Tabla 4.9. Factores de emisión de BC para las tipologías de la categoría “Vehículos Livianos (diésel)” del modelo en gramos de BC por kilómetro recorrido.	75
Tabla 4.10. Factores de emisión de BC para las tipologías de la categoría “Vehículos Livianos (gasolina)” del modelo en gramos de BC por kilómetro recorrido.	75
Tabla 4.11. Tabla de contingencia de los camiones seguidos en la campaña. Total de camiones seguidos: 71.....	76
Tabla 4.12. Total de datos clasificados válidos para los fines de este estudio. Total de datos: 449. 76	
Tabla 4.13. Medidas de tendencia central de los datos válidos medidos en la campaña experimental, distinguiendo condición de operación y nacionalidad de la patente.	77
Tabla 4.14. Resultados de la prueba de normalidad para cada grupo de datos. La prueba estadística depende del tamaño de la muestra, K – S para tamaños de muestra mayores que 50 y S – W para menos de tal cantidad. Ambas pruebas se hacen con una confianza del 95%.....	78
Tabla 5.1. Total de emisiones de BC del sector transporte caminero chileno para el año 2013 desagregando por categoría vehicular.	83
Tabla 5.2. Nivel de emisiones de BC del sector transporte caminero chileno para el año 2013 desagregando por región.	83
Tabla 5.3. Valores de emisión de BC reportados por distintos inventarios internacionales para los años 2008 y 2010 en transporte. Si bien los valores de emisiones del 2008 y 2010 no están explicitados en las secciones anteriores, se puede consultar la planilla del CD adjunto a esta memoria.....	86

Introducción

Marco General

Los contaminantes climáticos de vida corta (CCVC) están cobrando mayor importancia a nivel global debido a sus efectos combinados entre el clima, la contaminación local y la salud de las personas.

Existen numerosas publicaciones – siendo las más relevantes las pertenecientes a este siglo – que han brindado un mayor conocimiento y, a su vez, entendimiento sobre el comportamiento y propiedades de los CCVC. Estas publicaciones reportan estimaciones centrales sobre emisiones, bases de datos de inventarios de principales fuentes y la repercusión que tiene la emisión de estos contaminantes en los fenómenos climáticos, así como también los beneficios de la mitigación de estos contaminantes. A todo lo anterior, se agrega también que todos estos trabajos han proporcionado una base científica más sólida para actuar contra los CCVC.

Para concretar una acción efectiva en contra de los CCVC y con ánimos de institucionalizar estos esfuerzos, se crea en febrero del año 2012 la Coalición Clima y Aire Limpio o Climate And Clean Air Coalition to Reduce Short – Lived Climate Pollutants (CCAC por sus siglas en inglés). Esta institución tiene por objetivo unir a los gobiernos, a la sociedad civil y al sector privado, con el fin de mejorar la calidad del aire y reducir los efectos del cambio climático al promover la reducción de emisiones de los CCVC.

Desde el año 2012, el Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile (MMA) es miembro del CCAC. El MMA es un participante activo en comités organizados por el Working Group de París y la organización de América Latina y el Caribe (LAC), con el objetivo de conocer y compartir medidas prácticas e incentivar la colaboración futura entre los integrantes de la coalición.

Los esfuerzos del CCAC dentro del Ministerio están en el Departamento de Normas y Políticas de la División de Calidad del Aire y Cambio Climático. Los objetivos de este programa es lograr que las acciones que se tomen sean complementarias con el contexto global y el nacional, colaborar con las acciones que se emprenden para hacer frente al Cambio Climático, dar la debida relevancia a los CCVC y evitar duplicidades en la agenda de trabajo.

En este escenario, se aprueban las bases para un estudio denominado “APOYO A LA INICIATIVA PARA EL PLAN DE MITIGACIÓN DE LOS CONTAMINANTES CLIMÁTICOS DE VIDA CORTA”. El objetivo principal de este estudio es “*generar antecedentes técnicos que permitan incrementar el conocimiento sobre los contaminantes climáticos de vida corta y elaborar*

el Plan de Mitigación de los Contaminantes de Vida Corta en Chile". Dentro de los objetivos específicos se plantea contar con un inventario de emisión para los CCVC, considerando como base el año 2013.

En el concierto de la Ingeniería Mecánica, un aporte relevante a la investigación que puede realizar el departamento tiene relación con las emisiones de motores diésel y en especial las emisiones de Carbono Negro.

El Carbono Negro (BC por sus siglas en inglés), tiene una gran relevancia en el cambio climático y el calentamiento global. El BC es emitido de manera directa al ecosistema en forma de Material Particulado Fino (PM_{2.5}) y es generado en procesos tanto naturales como antropogénicos a través de la combustión incompleta de los combustibles fósiles, biocombustibles y biomasa, como en procesos naturales como incendios forestales o las erupciones volcánicas, donde no existe influencia humana. Las principales fuentes antropogénicas de BC son los motores diésel, fuentes industriales, minería de carbón, biocombustibles sólidos residenciales para la cocina y uso en calefacción, quema agrícola, incendios forestales y quema a cielo abierto de residuos sólidos.

El efecto principal del BC se refleja en impactos adversos a la salud humana, los ecosistemas y la visibilidad, siempre en relación con el PM_{2.5}. El BC absorbe la luz solar directamente en la atmósfera, reduciendo el albedo de la nieve y el hielo a través de la deposición e interactuando con las nubes. Los distintos atributos climáticos del BC y de los gases de efecto invernadero (GEI) dificultan la interpretación con los parámetros de medición comúnmente usados para comparar sus impactos climáticos.

El presente trabajo consiste, en primera instancia, en una revisión bibliográfica descriptiva sobre el BC: qué es, qué estimaciones de emisiones existen y sus incertidumbres, y cuáles son los efectos en el clima. Luego, en base a la bibliografía consultada, se obtendrán valores de factores de emisión para BC vinculados a PM_{2.5} para el sector transporte caminero (diésel y gasolina). De esta manera se logrará contribuir con el primer inventario de Carbono Negro para fuentes móviles en el contexto nacional. Luego, a partir del inventario generado, se estimarán las emisiones de BC para Chile.

Objetivos

Objetivo general

- Determinar el nivel de emisiones de Carbono Negro a partir de emisiones de material particulado fino en vehículos diésel en Chile.

Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica nacional e internacional sobre la generación de Carbono Negro en vehículos diésel y sus efectos en el cambio climático.
- Determinar material particulado fino para sector transporte caminero regional, periodo 1998 - 2050, diferenciando tecnologías vehiculares.
- Determinar tasas de vinculación entre Carbono Orgánico, Carbono Elemental y Carbono Negro con el material particulado fino ($PM_{2.5}$) en los vehículos diésel de Chile.
- Estimar las emisiones de Carbono Negro provocadas por fuentes móviles en Chile.
- Realizar una campaña experimental para medir niveles de concentración de Carbono Negro proveniente de camiones pesados en la ruta Los Libertadores.

1. Marco teórico

En este capítulo se contextualiza este trabajo de memoria y el escenario en el que se concibe. Se parte por definir qué son los CCVC y cuál es su importancia en el cambio climático para después presentar los conceptos relevantes de la consulta bibliográfica para acotar el tema de trabajo y finalmente se decanta en una sección destinada a resumir todo lo indagado en el contexto nacional del BC en el sector transporte caminero principalmente.

Estrategia de búsqueda:

Se toma como base el estudio *Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment* de Tami Bond y otros autores publicado el año 2013 (T. C. Bond et al., 2013) y el estudio *Updates of the Guidebook Chapter on Road Transport* del autor Leonidas Ntziachristos y otros, publicado el 2007 (Ntziachristos, Mellios, Fontaras, & Gkeivanidis, 2007). Estos dos estudios son revisiones bibliográficas, y en caso en que se necesite mayor especificación sobre un tema, se recurrirá a la fuente base consultada en el artículo.

1.1. Contaminantes climáticos de vida corta

Son agentes atmosféricos que contribuyen fuertemente al cambio climático y degradan la calidad del aire. Se le llaman *de vida corta*, pues tienen una vida útil relativamente breve en la atmósfera, que va desde algunos días hasta alrededor de una década, para los que tienen una mayor permanencia. Se dice relativamente, ya que existen de igual forma los contaminantes de vida larga del clima. El ejemplo más representativo de contaminante de larga vida útil en la atmósfera es el dióxido de carbono (CO₂), el cual es el principal gas de efecto invernadero (GEI). Se ha comprobado que el CO₂ es el responsable de al menos la mitad del calentamiento global. A diferencia de los CCVC, los contaminantes de larga vida permanecen mucho tiempo como tal en la atmósfera; de hecho, durante los primeros cien años desde su emisión, sólo la mitad de la carga de CO₂ es eliminada, permaneciendo en la atmósfera por milenios. Mitigar las emisiones de dióxido de carbono es esencial para mantener el equilibrio climático y térmico en la tierra durante los próximos años.

Por otra parte, deben mitigarse los CCVC en el corto plazo pues su efecto es más inmediato que los de larga vida. Más en específico, los principales actores en el calentamiento global, los cuales son:

- **Ozono troposférico (O₃).** El ozono es un gas reactivo el cual se encuentra en dos niveles de la atmósfera. El que se encuentra en la estratósfera absorbe la radiación ultravioleta y protege a los

habitantes de la superficie terrestre de los rayos peligrosos del sol. El que se encuentra en la tropósfera (a 10 o 15 kilómetros desde la superficie) es considerado como un GEI y contribuye al calentamiento global. Además, tiene efectos adversos sobre la salud de las personas y afecta al rendimiento de los cultivos agrícolas (Ortuzar & Tornel, 2016).

La formación de ozono troposférico es debida a reacciones fotoquímicas con gases precursores, es decir, que el ozono troposférico no es emitido directamente. Estos gases precursores pueden ser naturales o antropogénicos y entre ellos se destacan el monóxido de carbono – producido en combustiones incompletas de combustibles basados en carbono –, óxidos de nitrógeno – emitidos desde la quema de combustibles fósiles y desde el escape de los vehículos - y los compuestos orgánicos volátiles (VOC por sus siglas en inglés) que existen como vapores en la atmósfera y son formados de la combustión incompleta de combustible, evaporación de gasolinas y solventes, gases de escape de vehículos y procesos industriales.

El ozono puede permanecer en la atmósfera alrededor de algunos días hasta semanas.

- **Metano (CH₄).** Se trata de un gas de efecto invernadero, el cual se ha comprobado que tiene un potencial de calentamiento veinte veces mayor que el CO₂ (Santamaría Antonio, 2010). Tiene una vida aproximada de 12 años en la atmósfera. Además de influir en el clima, en primera instancia tiene un efecto adverso sobre la salud humana y los ecosistemas, además de ser uno de los reactivos para formar ozono troposférico.

Alrededor de un 60% de las emisiones de metano son de actividades antropogénicas como lo son la extracción y quema de petróleo y gas, los vertederos, cultivos de arroz, industria ganadera, descomposición de material en embalses de centrales hidroeléctricas y minas de carbón (Ortuzar & Tornel, 2016).

- **Hidrofluorocarbonos (HFC).** Las emisiones de este contaminante comenzaron como respuesta a lo estipulado por el Protocolo de Montreal en 1989, el cual buscaba reducir las emisiones de clorofluorocarbonos (CFC) e hidroclorofluorocarbonos (HCFC), los cuales contribuían fuertemente a la destrucción de la capa de ozono. Los HFC tienen un efecto de GEI y por ello, son abordados en la actualización de Protocolo de Montreal de noviembre de 2015.

El uso de los HFC se hace en sistemas de aire acondicionado, refrigeración y aerosoles, por lo que se trata exclusivamente de fuentes antropogénicas.

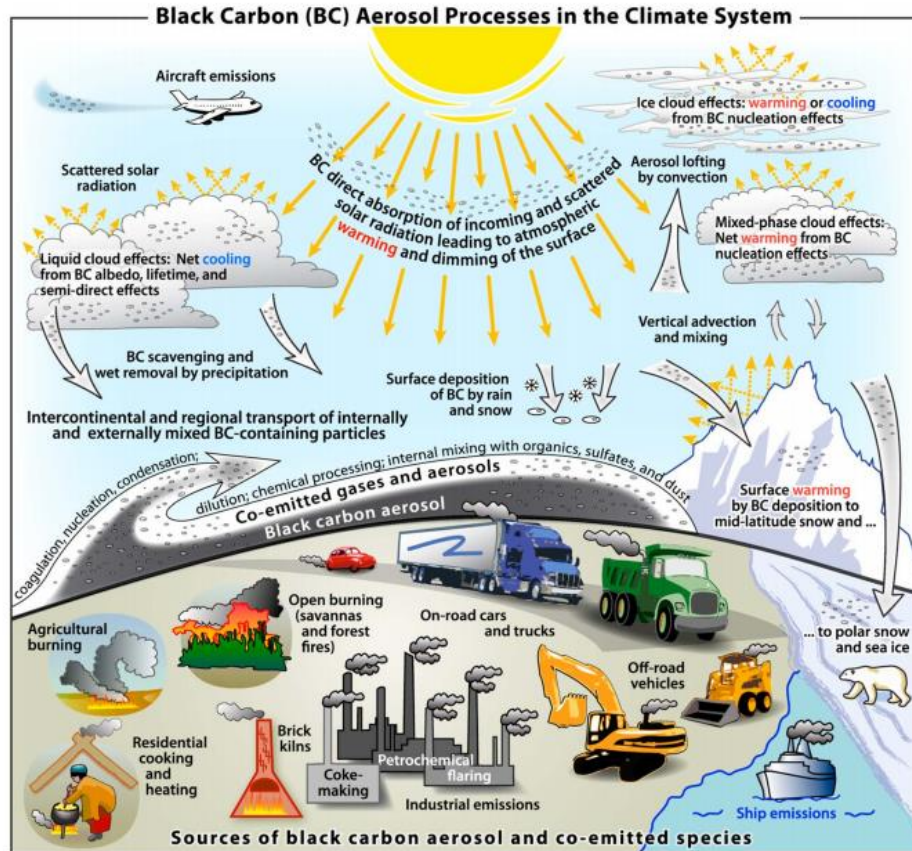


Figura 1.1. Esquema general de las fuentes primarias de emisiones de carbono negro y los procesos que controlan la distribución de éste en la atmósfera y determinan su rol en el cambio climático. Fuente: Bond et al. (2013).

- **Carbono Negro.** Además de las características dadas en la introducción de este trabajo, las definiciones de este contaminante se darán con mayor detalle en la revisión bibliográfica en las siguientes secciones.

La revisión bibliográfica de este trabajo consiste en una revisión descriptiva que resume conceptos relevantes para este trabajo de memoria acerca del Carbono Negro y sintetizar qué es lo que se conoce.

La consulta se hace en documentos de revisión, en primera instancia, los cuales son resúmenes de otros estudios más específicos. Luego, para profundizar en otros conceptos más específicos, se consultan documentos primarios o estudios originales. Aunque se consulten los mismos documentos, se separará por temática de interés para seguir un orden lógico en los contenidos.

1.2. Carbono Negro: sus propiedades y otros conceptos relevantes

1.2.1. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. Bond et al., Junio 2013

Esta sección esquematiza la relación entre el Carbono Negro, sus principales fuentes y efectos netos sobre el clima, afectando a los hielos, nieve y formación de nubes.

Al BC se le define como un tipo distinto de aerosol carbonáceo, formado en la combustión incompleta de los combustibles basados en carbono; como lo es el diésel, combustible más relevante para este trabajo. Se distingue de otros aerosoles en la medida en que cumple con una serie de características que lo hacen único. Estas características son:

- Gran capacidad de absorber la luz visible, con una sección transversal de absorción de al menos $5 \text{ [m}^2\text{g}^{-1}]$ a una longitud de onda de 550 [nm] . Se menciona una longitud de onda de 550 [nm] , ya que está en el rango de luz visible dentro del espectro electromagnético. Sin embargo, esta capacidad de absorber la luz visible es para todas las longitudes de onda del espectro y es esta característica lo que lo hace distinguible de otros aerosoles y es por este motivo por el que se ha mostrado mayor interés en los estudios referentes a los procesos de transferencia radiativa en la atmósfera y el balance de radiación en el sistema climático. No existe otra sustancia en la atmósfera con tan alta absorción de luz por unidad de masa.
- Es refractario. Esto quiere decir que conserva sus propiedades y su forma básica a muy altas temperaturas. Tiene una temperatura de vaporización cercana a los 4000 [K] incluso estando a bajas presiones.
- Indisoluble en agua, en solventes orgánicos como el metanol y la acetona, así como también en otros componentes presentes en aerosoles atmosféricos. Además de esto, el BC no tiende a reaccionar químicamente con otros elementos presentes en la atmósfera. Por este motivo, su proceso de remoción primario es por deposición húmeda o seca en la superficie.
- Existe como un aglomerado de pequeñas esferas de carbono (ver tamaño en Figura 1.2.). Estas esferas son formadas de manera individual en la combustión y luego toman su forma agregada debido a su rápida capacidad de coagulación. Generalmente, es encontrado en aerosoles atmosféricos junto con otras especies, mucha de las cuales son coemitidas con el BC desde distintas fuentes.

Además de dar las principales propiedades del BC, el artículo describe algunos conceptos relacionados con la materia orgánica y otras formas de aerosol de carbono. Se define el concepto de aerosol orgánico (OA por sus siglas en inglés) como un término para referirse a todos aquellos

aerosoles que contengan, además de carbono, compuestos de hidrógeno y oxígeno. Luego, los aerosoles emitidos a la atmósfera de manera directa se les denominan Aerosoles Orgánicos Primarios (POA) y luego que reaccionan en la atmósfera con otros compuestos o con la luz del sol, pasan a denominarse Aerosoles Orgánicos Secundarios (SOA). En un Aerosol Orgánico, al contenido de carbono (excluyendo aquellos asociados a hidrógeno u oxígeno) se le denomina Carbono Orgánico (OC). El Aerosol Orgánico es el más relevante para los fenómenos climáticos, aunque en los reportes de emisiones y los inventarios están referidos a Carbono Orgánico debido a que era medido de manera más habitual.

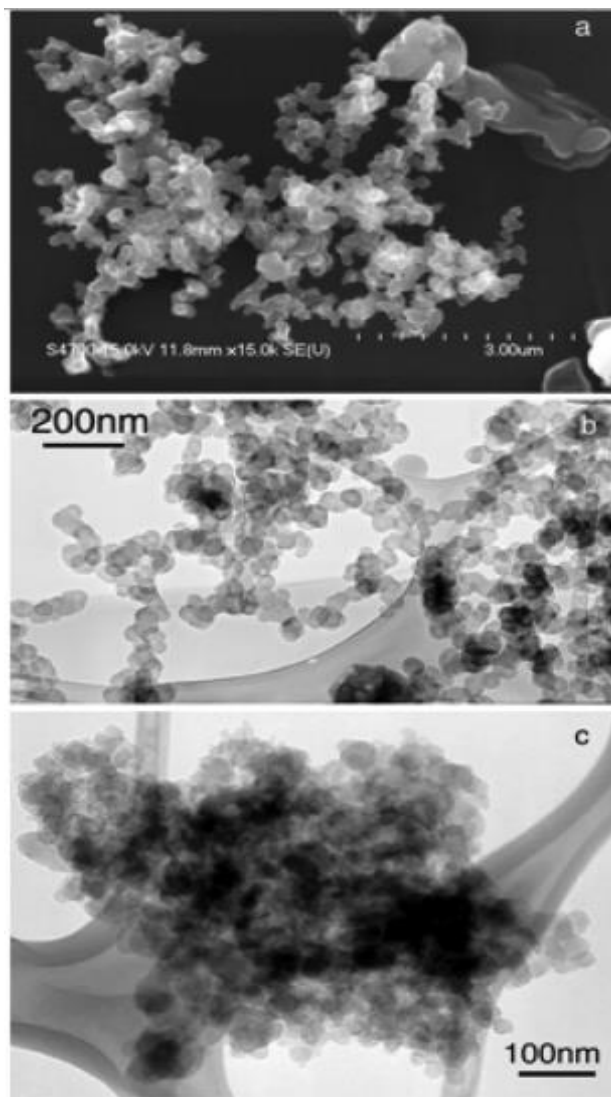


Figura 1.2. (a) imagen de microscopio electrónico de barrido de una muestra joven de BC; (b) imagen de una cadena de BC; (c) imagen de un aglomerado compacto de BC. Fuente: Li et al. (2003) (Li, Posfai, Hobbs, & Buseck, 2003).

Otro tipo de partículas con fuertes propiedades de absorción de luz son las denominadas Carbono Café (Brown Carbon) y el polvo atmosférico, que si bien son especies relevantes en el sistema climático, no son parte de este trabajo de memoria. El polvo atmosférico también es denominado polvo mineral (MD por sus siglas en inglés de Mineral Dust), y proviene de fuentes naturales como desiertos y otras no naturales como obras de construcción y tráfico en ruta o fuera de ella.

Como se mencionó anteriormente, el BC se forma durante la combustión incompleta de los combustibles basados en carbono cuando el oxígeno en la reacción es insuficiente¹. Incluso, si la cantidad de oxígeno es la adecuada, siempre existirán puntos donde éste será insuficiente y no se dará la relación estequiometría óptima para la mezcla de aire y combustible. Luego de la reacción, las pequeñas esferas descritas anteriormente, coagulan y forman aglomerados o conjuntos de partículas, o incluso llegan a formar cadenas fractales entre cientos o miles de esferas como se puede apreciar en las fotografías de la Figura 1.2. A pesar de lo mencionado anteriormente, si los gases de escape de la combustión son mantenidos a una temperatura lo suficientemente alta, y además la cantidad de oxígeno está bien mezclada con los productos del proceso de combustión, las partículas de carbono serán eliminadas por oxidación antes que dejen la cámara de combustión. Caso contrario, éstas son emitidas.

Respecto a la vida que tiene el BC en la atmósfera, se menciona, haciendo referencia a otros trabajos, que la forma de las cadenas de BC cambia rápidamente luego de ser emitidas. Especies como vapor de agua u otros gases, se condensan sobre estos aglomerados y forman paquetes densos sin reaccionar químicamente (mezcla física), recordando que una de las propiedades del BC es que es poco reactivo con otras especies. Estas mezclas se producen con otras partículas que tienen otras propiedades ópticas distintas al BC, ya sean de dispersión o de absorción. Estas partículas ya no son BC puro, sino que contienen especies como sulfatos o material orgánico. Según lo observado en algunos muestreos, estas mezclas tienden a ocurrir luego de algunas horas después de la emisión, aunque los modelos usados para simular estos procesos microfísicos estiman que la mezcla ocurre dentro de 1 a 5 días. A estas partículas se les llama partículas que contienen BC², que se denominarán como aglomerados de BC. Estas mezclas tienen propiedades distintas a las del BC puro. Al ocurrir esto, las propiedades ópticas y microfísicas cambian (éstas serán descritas a continuación,) ya que son estas propiedades las que afectan de manera directa a los fenómenos climáticos y pueden

¹ N. del A.: En motores diésel, una de las causas de la combustión incompleta se produce por la llamada "mezcla rica", es decir, que se tiene mucha cantidad de combustible y el oxígeno en la reacción se hace insuficiente.

² BC – containing particles desde ahora llamados *aglomerados de BC*.

determinar si el efecto del aerosol será de calentamiento o enfriamiento de la superficie, ya sea por deposición en la misma o algún efecto en las nubes o su formación.

Propiedades ópticas del Carbono Negro

Los modelos de transferencia radiativa requieren la capacidad de absorción y dispersión del particulado. Esto se logra usando coeficientes ópticos como propiedades intensivas (por concentración de masa [m^2g^{-1}]) conocidas como las secciones transversales de absorción y de dispersión (MAC y MSC respectivamente). Las estimaciones de estos parámetros se hacen para las longitudes de onda que sean de interés según el estudio.

Para una muestra de un aerosol debe tenerse en consideración que éste no sólo está constituido de BC. Para ello, debe calcularse un coeficiente de absorción por la concentración de BC en la muestra. De otra forma, se evaluará la sección transversal del aerosol completo. Estas cantidades intensivas son fundamentales para los modelos de transferencia radiativa y son necesarias para traducir concentraciones de masa simuladas por modelos químicos de transporte y así poder dimensionar sus efectos en el balance radiativo. Para representar el efecto para ciertas longitudes de onda de interés sobre la absorción de luz del aerosol se usa el exponente de absorción de Ångstrom:

$$\text{Å}_{\text{abs}} = -\log(\text{MAC}(\lambda_1)/\text{MAC}(\lambda_2))/\log(\lambda_1/\lambda_2) \quad (1)$$

Donde $\text{MAC}(\lambda_1)$ y $\text{MAC}(\lambda_2)$ son las secciones transversales de absorción a las longitudes de onda λ_1 y λ_2 respectivamente. Por lo general, se usan dos longitudes de onda que abarcan el espectro visible de longitudes de onda como 450 y 650 [nm]. Este exponente está directamente relacionado con la distribución de tamaños de los aerosoles. Este parámetro, en teoría, toma valores de 0 a 4, donde los valores más bajos están asociados con partículas de mayor tamaño (Wagner & Silva, 2008).

Otra cantidad relevante asociada a las propiedades ópticas del BC es el albedo de dispersión simple, el cual se expresa como:

$$\omega_0 = \frac{\text{MSC}}{\text{MSC} + \text{MAC}} \quad (2)$$

El albedo de dispersión simple determina la relación existente entre la extinción debida sólo a la dispersión y la debida a la dispersión más la absorción. El albedo de dispersión simple es un indicador de la capacidad absorbente del aerosol que depende de su composición química, forma y

tamaño, tomando valores de entre 0 (partículas muy absorbentes) y 1 (partículas poco absorbentes) (Cortés-Hernández & Aparicio, 2014). Valores del albedo de dispersión simple bajo 0.8 indican que el aerosol podría tener efectos netos de calentamiento, es decir, que eleva la temperatura del sistema climático, aunque la separación del efecto de enfriamiento y calentamiento dependerá también del albedo de la superficie o de las nubes y la fracción de la luz que es dispersada hacia afuera de la superficie.

Propiedades microfísicas del BC

Estas propiedades afectan a las propiedades ópticas y por tanto variarán los efectos sobre el clima de los aerosoles que contienen BC y sesgarán los resultados con respecto al comportamiento real de los aerosoles. Los modelos de cálculo a escala global estiman los parámetros MAC y ω_0 bajo una serie de supuestos sobre las propiedades microfísicas. Un ejemplo de esto, es que por lo general se usa la Teoría de Mie³ (Cortés-Hernández & Aparicio, 2014). Al tomar este modelo, existirán diferencias entre los coeficientes de arrastre de las partículas de BC, lo que sesgará la predicción de su movimiento en la atmósfera. Esto implica que siempre existirá incertidumbre sobre las características de un aerosol referidas a cuatro parámetros que son estimados: la densidad, el índice de refracción complejo, el tamaño de partícula y la configuración de los aglomerados de BC.

- **Densidad.** El cálculo del valor de la densidad de BC se ha desarrollado a través de los años. En el artículo se menciona un primer trabajo que muestrea distintos tipos de material gráfico, cuyas densidades están dentro del rango 0.625 a 2.25 [g cm⁻³], siendo las especies más densas las que mayor capacidad de absorción de luz tienen (basadas en la muestra a partir de la combustión de diésel). Se nombran otros trabajos y todos apuntan a que el BC tendría una densidad fluctuando entre los 1.7 a 1.9 [g cm⁻³]. A pesar de la existencia de estos trabajos, algunos modelos globales usan una densidad de 1.0 [g cm⁻³], lo cual podría sobreestimar la absorción del aerosol si los otros parámetros están correctos (T. C. Bond et al., 2013).
- **Índice de refracción.** El índice de refracción es un parámetro óptico asociado con el cambio de velocidad de las ondas electromagnéticas en un medio con respecto al vacío. Además es una característica óptica de un medio, es decir, se refiere a la radiación electromagnética que atraviesa

³ La Teoría de Mie usa las ecuaciones de electromagnetismo para obtener la ecuación de onda vectorial en coordenadas esféricas. Esto trae como consecuencia que las propiedades ópticas que describen la interacción entre los aerosoles y la radiación solar, que son función de la longitud de onda y que se derivan de cantidades microfísicas, como el índice de refracción y los modos de distribución del tamaño de partícula, sean modeladas bajo el supuesto que las partículas son esféricas y homogéneas para las propiedades de arrastre del aire.

una capa absorbente que contiene núcleos de dispersión aleatoriamente distribuidos, en este caso aerosoles. Las propiedades ópticas del medio pueden caracterizarse por medio de un índice de refracción complejo (m), que se expresa como:

$$m = n + ik \quad (3)$$

Donde la parte real n representa un retraso de la onda que se propaga a través del medio y la parte imaginaria k determina la absorción de energía por parte del mismo, asociada con la disminución de la energía, vinculada con la onda en su propagación (Sobrino, Jiménez-Muñoz, & Paolini, 2004). El índice de refracción es una cantidad de especial importancia para evaluar la absorptividad del componente del aerosol. Si la parte imaginaria (k) es diferente de cero, las partículas del aerosol absorben la radiación solar y si no hay absorción, entonces la radiación sólo será extinguida por la dispersión (Cortés-Hernández & Aparicio, 2014).

Con esta aclaración del concepto, apoyado en otro trabajo, se puede mencionar lo que en este artículo se explica. Se indica que existe un valor recomendado para modelar los efectos del BC en el clima. Este valor es el recomendado por OPAC⁴ y es igual a $1.74 - 0.44i$ (Hess, Koepke, & Schult, 1998). Sin embargo, se mencionan algunas estimaciones, pero cuentan con una incertidumbre tal que se han presentado valores extremos.

- **Tamaño de partícula.** Antes de indicar lo relevante del tamaño de partícula y el número de ellas en una muestra, se debe explicar de manera breve en qué consiste una distribución de tamaños. Las características de los aerosoles que determinan su comportamiento con el medio ambiente están dadas por sus propiedades físicas y químicas. Como la variabilidad de características en una muestra es muy amplia, se toman distribuciones de ciertas propiedades de interés. Luego, el tamaño de partícula es de particular importancia, pues propiedades como el volumen, la masa o la velocidad de depósito gravitacional guardan relación directa con esta variable. Como se considera que las partículas son esféricas según la Teoría de Mie, se clasifican según un diámetro equivalente derivado de alguna propiedad de interés. Las distribuciones de tamaño de partículas de una muestra se pueden representar como una función de distribución de frecuencia (número de partículas por intervalo de tamaño indicado), o acumulada (número de partículas de tamaño más pequeño que el indicado). Debido a que existen tamaños muy dispersos y por ende un amplio rango, se ocupa una escala logarítmica de los intervalos de diámetro de partículas (D). Las representaciones gráficas del número de partículas

⁴ Optical Properties of Aerosols and Clouds, software que contiene las propiedades ópticas de la gama del espectro solar y terrestre de las partículas atmosféricas.

(N) frente al tamaño pueden aparecer distorsionadas puesto que el número de partículas va a depender de la anchura del intervalo tomado, la cual va a ser variable. Por ello, se normaliza el número de partículas en el intervalo de tamaño considerado. La representación más descriptiva de la distribución de tamaños consiste en representar en el eje vertical el número de partículas normalizado para la anchura del intervalo de diámetro usado, denotado como $dN/d \log D$. El área bajo la curva de la distribución representa el número de partículas en cada intervalo de tamaño considerado. Para describir las distribuciones, se ha determinado que el mejor ajuste lo da una distribución log – normal respecto a lo que se obtiene de manera experimental (Salvador, P., & Artiñano, 2000). Las distribuciones de partículas son distribuciones bimodales, cuyos modos son el modo de nucleación y modo de acumulación, que se diferencian en el tamaño de las partículas dentro del rango de estas medias.

Explicado este concepto desde otra fuente, se puede mencionar lo que en el artículo de interés se recopila sobre el tamaño de partícula del BC.

La distribución de tamaños de los aerosoles que contienen BC es afectada por el tamaño de las partículas de este componente en la emisión y por su subsecuente coagulación. La condensación de partículas que no son Carbono Negro cambian la distribución general del aerosol, pero la distribución de tamaños del BC no cambia en sí sino a través de la coagulación.

Dentro del artículo se hace una revisión de trabajos de distinta índole (Kondo et al., 2011c, Kondo et al., 2011c, Schwarz et al., 2006, Schwarz et al., 2008b, Shiraiwa et al., 2008)⁵. Estos trabajos llegan a resultados similares en cuanto al tamaño de partícula obtenido dependiendo de la fuente de emisión. La marcada diferencia en el tamaño entre BC desde la quema de combustibles fósiles y la quema de biomasa parece ser una característica general. En la distribución mostrada del trabajo de Schwarz et al., (2008b) (Figura 1.3), se observa que si bien la distribución de masa de las muestras es similar, la distribución de número N de partículas para quema de biomasa alcanza valores menores, lo que indica que éstas son de mayor tamaño que las de quema de combustibles fósiles.

- **Configuración de los aglomerados de Carbono Negro.** Según lo acordado anteriormente, el BC difícilmente será encontrado en el medio en su forma pura. Por el contrario, se encontrará en forma de mezcla física con otros componentes que no son BC y estas partículas podrían tener una mayor capacidad de absorción de luz, pues las partículas adosadas al núcleo de BC pueden dispersar la luz al núcleo y ahí ser dirigidas a la partícula absorbente.

⁵ Como estos temas se alejan del tema de interés, estos estudios pueden quedar sujetos a revisión del lector.

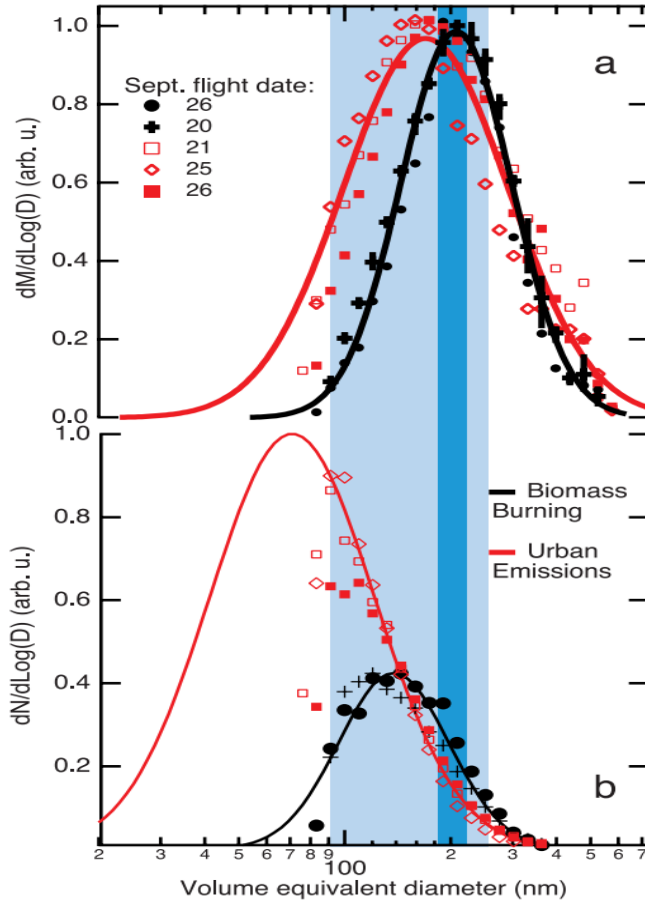


Figura 1.3. Distribuciones de masa y número de partículas de núcleos de BC refractario: (a) la distribución de masa está normalizada al mismo valor peak. Los datos se ajustan a una distribución log - normal entre 90 - 600 nm. (b) La distribución del número de partículas se comporta de igual manera que la masa y está a escala para representar la misma masa de BC. La región sombreada clara está en un rango de 90 - 250 nm, mientras que la región sombreada oscura representa el rango de 190 - 210 nm (diámetro medio de aglomerados de BC). Fuente: Schwarz et al. (2008) (Schwarz et al., 2008).

Como también se mencionó, el BC es insoluble, y por ello siempre será distinguible entre otras especies. Generalmente, se asume que las partículas rodean al núcleo de BC de forma simétrica, sin embargo esto está alejado de la realidad en la mayoría de los casos. Esto genera sesgo en los modelos que asumen esta configuración de las partículas y para determinar la configuración real, se debería realizar una caracterización completa, el cual es un proceso complejo y poco práctico. Como panorama general, se puede observar que en la Figura 1.4 se sintetiza la forma en que las propiedades del BC son complementadas con las especies coemitidas y el efecto neto que éstas tienen en el forzamiento climático.

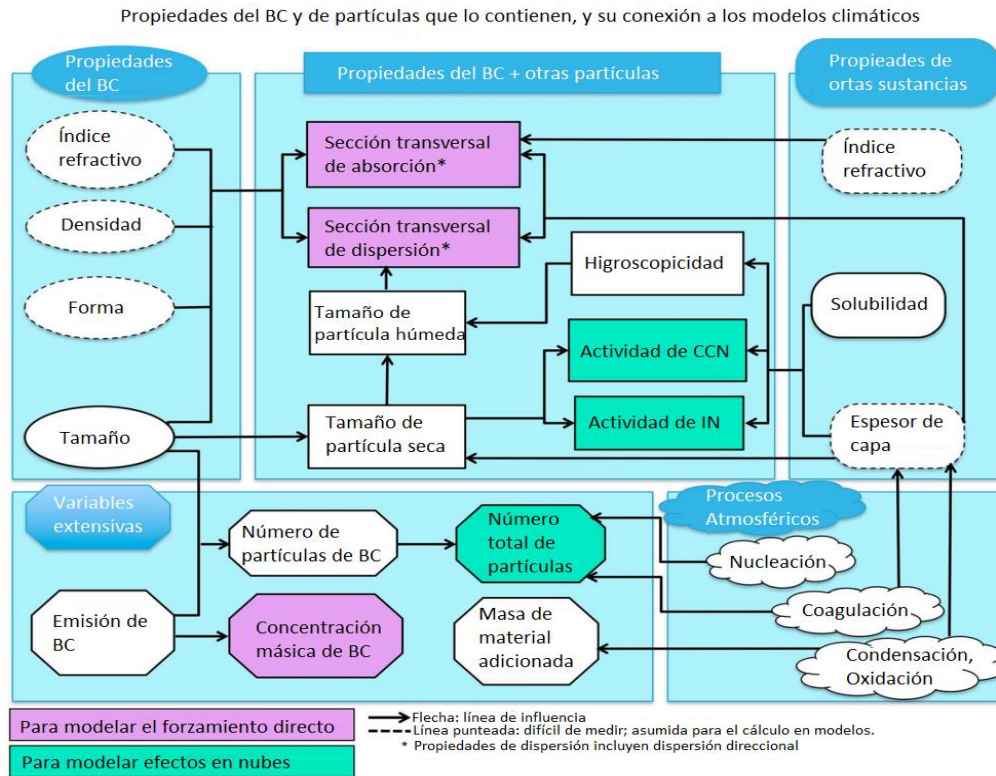


Figura 1.4. Conexiones esquemáticas entre las propiedades del BC y los aglomerados. La combinación de estas propiedades determina su contribución al forzamiento climático. Las propiedades dependen de estas especies coemitidas con el BC y de los procesos atmosféricos como la condensación o la nucleación. Adaptado de (T. C. Bond et al., 2013).

1.2.2. Updates of the Guidebook Chapter on Road Transport (Ntziachristos et al., 2007).

En este trabajo no se hace hincapié en las propiedades ópticas del BC ni en sus efectos climáticos, sino que se centra en definiciones técnicas y funcionales para fines de medición de las concentraciones de BC en vehículos. Además, se introduce el concepto de Carbono Elemental, el cual es clave dentro de los conceptos referidos a las formas en que se tienen para medir la concentración de Carbono Negro y el método que se ocupará para estimar las emisiones de BC en el contexto de este trabajo de título.

Se define el Carbono Elemental (EC por sus siglas en inglés) como aquel contenido de carbono que aparece en las muestras de material particulado como partículas gráficas formadas en la combustión. Es determinado mediante el uso de métodos termo - ópticos donde el carbono es convertido a CO₂, el cual es medido en analizadores de gas.

Mayor detalle de los métodos de medición se dará en el siguiente apartado, el cual está referido a los métodos de cuantificación.

Se define al Carbono Negro como aquellos elementos de carbono que tienen mayor atenuación de la luz incidente y cuya concentración en el aire se determinan mediante el uso de Aethalómetros. El BC es principalmente considerado como Carbono Elemental. Sin embargo, el BC contempla aquellas partículas que son altamente refractarias del OC que no necesariamente pueden ser consideradas como EC. También el EC de diferentes fuentes pueden presentar distintos coeficientes de absorción de luz y por ende, no existe equivalencia global entre BC y EC.

Por otra parte, el Carbono Orgánico es definido como el carbono que se volatiliza cuando se eleva a altas temperaturas la muestra de material particulado en una atmósfera inerte (de 600 a 900 °C). En algunos casos, parte del contenido de OC sufre un proceso de carbonización en lugar de volatilizarse, por lo que distorsiona las mediciones de EC (Ntziachristos et al., 2007).

Con estos dos artículos se tienen dos enfoques de definiciones básicas para comenzar a comprender cómo es que el Carbono Negro se emite y a su vez altera los procesos climáticos.

1.3. Cuantificación de niveles de Carbono Negro

Para esta segunda parte de la revisión bibliográfica, se seguirá con la revisión de los trabajos principales citados anteriormente. Además de ello, se complementará con trabajos realizados para determinar algunos factores y niveles de emisión de BC.

1.3.1. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment (Bond et al., Junio 2013)

Medición de concentración de BC

Para seguir un orden lógico de contenidos, se describe a grandes rasgos de qué se trata cada método para determinar la concentración de BC en una muestra. Observar que sólo se mide concentración, que no es lo mismo que decir emisión. Las emisiones se estiman a partir de un inventario (para este caso) y un cierto nivel de actividad en la metodología Bottom – Up. El inventario Bottom – Up asocia un factor de emisión de un contaminante de interés para cada fuente. Por otra parte, la metodología Top – Down asocia un factor de emisión único para todas las fuentes de cierto contaminante y no permite realizar un análisis fuente por fuente, como el la Figura 1.5.

Como es de suponer, las muestras de aire que contienen BC, contienen otros constituyentes también y por lo general el contenido de BC en un aerosol atmosférico es menor al 10%. Por este motivo la concentración de BC no es medida de forma directa sino que se hace usando métodos ópticos, térmicos, una combinación de éstos o por incandescencia inducida por láser, es

indirectamente medida. Estos métodos son descritos en la Tabla 1.1, la cual está extraída del material fuente. Para la lectura de la Tabla 1.1, es necesario aclarar:

- El signo + o - referido al sesgo indica si se hace una sobreestimación o subestimación de la concentración de BC, respectivamente.
- La presencia de otras especies para el método de absorción óptica con detección in situ dependerá de la longitud de onda a la cual se está midiendo. Las mediciones alrededor de los 630 [nm] no son afectadas a menos que las concentraciones de polvo sean altas.

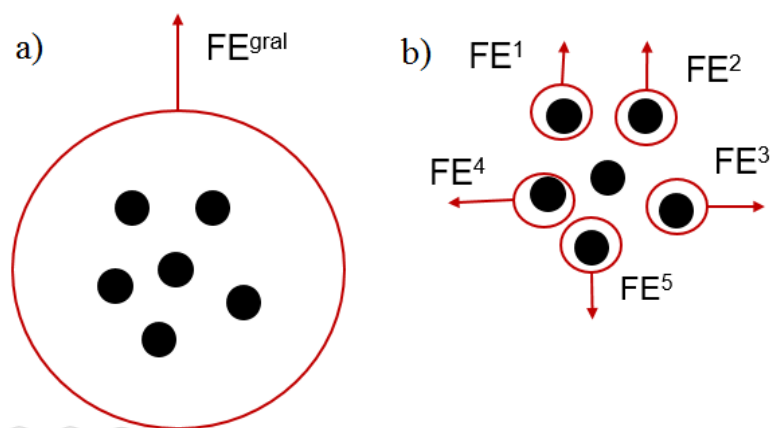


Figura 1.5. Modo de asociar factores de emisión a cada fuente en un inventario a) Top – Down y b) Bottom – Up. Fuente: DICTUC.

Es importante mencionar estas fuentes de error o sesgo en las mediciones de concentración de BC, dado que están dadas por el estado de mezcla (ya sea interno o externo) de las partículas. Además, dentro de este ítem, se indican las diferencias entre las especies BC, OC y EC y su relación. Este es un punto importante dentro de este trabajo de memoria, ya que existen tasas de vinculación de $PM_{2.5}$ con éstas cantidades y a partir de éstas es posible dar una estimación para BC.

Como se mencionó en la sección anterior, la diferencia entre Carbono Orgánico y Carbono Negro radica, en uno de muchos aspectos, en su volatilidad. Luego, la separación más frecuente entre BC y OC es lograda por volatilizar y combustionar la muestra del filtro y detectar el contenido de CO_2 producido como una función de la temperatura. La base de esta discriminación es que el BC no es un elemento volátil, mientras que el OC lo es. Este método térmico no detecta la concentración de BC de forma directa y la cantidad detectada dependerá de las condiciones del método. El resultado de usar esta técnica es a lo que se le llama Carbono Elemental (EC por sus siglas en inglés).

En las técnicas que involucran el calentamiento de la muestra basadas en su volatilidad, la muestra es calentada en una atmósfera de gas inerte para volatilizar el OC y luego se eleva su temperatura en una

Tabla 1.1. Técnicas para medir concentración de BC, terminología del método para BC, y fuentes de sesgo sistemático. Adaptado de (T. C. Bond et al., 2013).

Método	Nombre común	Nombre sugerido	Instrumentos habituales	Fuentes de sesgo	Dirección del
Absorción óptica con detección in situ	BC	BC Equivalente (BC + otros materiales absorbentes)	Fotoacústico	Cambio en el MAC con el envejecimiento del aerosol. Presencia de otros absorbentes (polvo, OC)	+,-
Absorción óptica por colección en filtros	BC	BC Equivalente	Aethalómetro ; Fotómetro de absorción de partículas de hollín Fotómetro de absorción multiángulos	Lo mismo de arriba, más: interacciones ópticas entre las partículas y la matriz del filtro Modificación de la morfología de la particular OC	+
Absorción óptica con entrada alta temperatura	BC	BC Equivalente	Sistema de monitoreo continuo de hollín	Carbonización de especies orgánicas de baja volatilidad	+
Calentamiento térmico y absorción óptica	Carbono Elemental (EC)	Carbono Elemental Aparente	Reflectividad óptica térmica Transmisividad óptica térmica	Falla en corregir la carbonización del OC Oxidación catalítica del BC en presencia de metales u óxidos de metal	+
Incidencia inducida por láser	BC o BC refractario	BC refractario	Fotómetro de partículas singulares de hollín	Absorción por material carbonizado afecta la proporción entre OC y EC Detección de OC que es menos volátil	- +
				Falla en la detección de partículas muy pequeñas	-

segunda ocasión, pero ahora en una atmósfera con oxígeno para generar la reacción de oxidación del EC. Sin embargo, se pueden dar malas interpretaciones en el uso de este método, pues se da la posibilidad que contenido el de OC sea interpretado como EC o viceversa. Esto ocurre cuando algunas propiedades de la muestra ocasionan que el EC sea liberado tempranamente o el contenido de OC sea retenido dentro de la muestra mucho tiempo. Una de las complicaciones más representativas es la *carbonización* del OC a altas temperaturas, lo cual reduce su volatilidad. Las variaciones entre métodos térmicos incluyen diferencia en las temperaturas y correcciones para la carbonización del OC durante la pirólisis, mediante el monitoreo de reflectividad óptica o la transmisividad de la luz de la muestra. Con base en trabajos anteriores, se menciona que las diferencias de concentración de EC entre estos protocolos de corrección son por sobre un factor de 2 y grandes diferencias pueden darse en el contenido de EC si no se realizan correcciones, lo que sobreestima el contenido de esta especie en una muestra. Las diferencias, entre otras causas, son debido a la deposición de EC sobre la superficie del filtro o a la distribución de OC y EC en el filtro. Por lo tanto, la variabilidad de los resultados dependerá de la proporción entre OC/EC. Sin embargo, los resultados de ambos métodos (transmisividad o reflectividad) no difieren en mayor medida para el contenido del escape de un motor diésel, sino que tienen alta variabilidad para mezclas complejas atmosféricas. Este es un punto muy importante para el desarrollo de la metodología de este trabajo, por lo que esta idea se retomará más adelante.

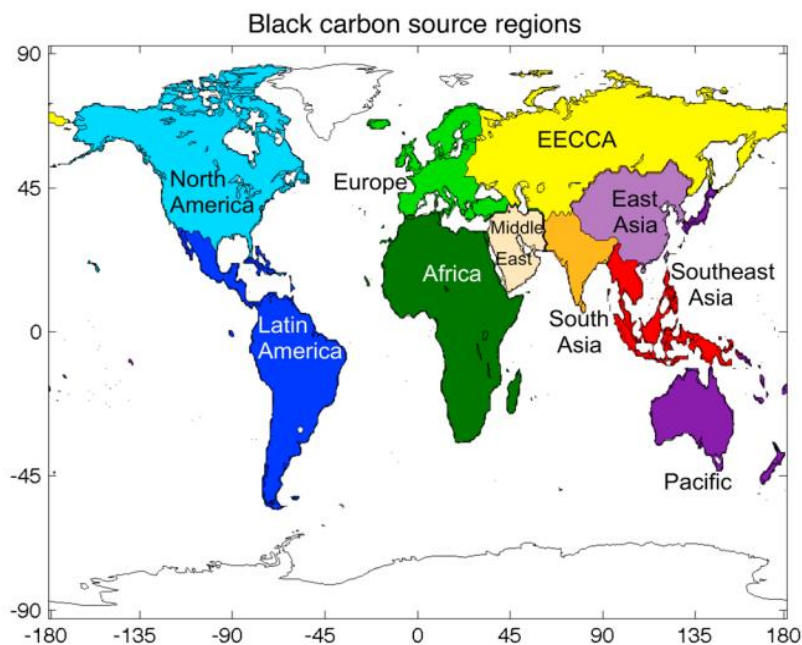


Figura 1.6. Regiones para desagregar las emisiones y concentraciones a nivel mundial. Fuente: Bond et al. (2013)

Cuantificación de emisiones

En esta sección se presentan las estimaciones que se hacen para emisiones de BC por año y por región, y se dan a conocer conceptos básicos para comprender las distintas metodologías que son empleadas para realizar estas estimaciones. Los resultados presentados sirven para contextualizar y observar las tendencias de las emisiones.

Para desagregar las emisiones a nivel mundial se hace uso de la nomenclatura presentada en la Figura 1.5. Luego, la desagregación de las emisiones y concentraciones se hace por sector (industria, energía, residencial y natural) para separar distintas fuentes.

Una de las metodologías más usadas para hacer estimaciones centrales de BC - y de todos los contaminantes en general - para el sector de energía (generación, transporte, actividad industrial y uso de combustible para uso residencial) - es el uso de inventarios Bottom - Up.

Los inventarios Bottom - Up son un input necesario para los modelos atmosféricos que simulan el efecto de los contaminantes en el sistema climático y además orientan la toma de decisiones sobre políticas relacionadas con la calidad del aire y el cómo afecta a la salud de la población. En una primera instancia, se ocupaban para tener una idea de cuánta masa de contaminante era emitida por cierta actividad y debido a que las acciones se hacían solamente en base al material particulado, no se hacía énfasis en desagregar los distintos componentes químicos. Por ello, se ha generado un especial interés en el último tiempo en contar con mejores inventarios para contaminantes climáticos de vida corta y, en el peor de los casos, generarlos cuando no existan. Además es un input necesario para la desagregación en espacio y tiempo para algunos modelos.

El inventario Bottom - Up consiste en resumir el nivel de emisión de cierto contaminante de interés desde la cantidad de combustible consumido. Para ello se utiliza la ecuación:

$$\text{Emisión} = \sum_i A_i EF_i (1 - \text{eff}_i) \quad (4)$$

Los términos de la ecuación 4 corresponden a: A_i es el nivel de actividad de tipo en particular como puede ser el consumo de combustible o la producción de un *commodity*; EF_i representa el factor de emisión o la tasa a que se emite un contaminante mientras se ejecute la actividad, dado en unidad de masa por actividad; y por último eff_i es la eficiencia de remoción del contaminante dado un método de control de emisión. El subíndice i representa diferentes tipos de actividad y contaminante. Por lo general, la actividad se da en masa de combustible quemado.

La exactitud de este método dependerá de la efectividad de la desagregación de las actividades, del conocimiento que se tenga de la actividad y de la efectividad de la determinación de los factores de emisión. Por ejemplo, es difícil controlar la actividad de los motores diésel que no son camineros en función de kilómetros recorridos.

Para las emisiones de BC en quemas también se cuenta con una ecuación para determinarlas. Sin embargo, no es usual que estas fuentes sean incluidas en reportes de actividad económica nacional. Estas emisiones se determinan como usando la ecuación:

$$\text{Emisión} = \sum_i BA_i FL_i CC_i EF_i \quad (5)$$

Aquí BA_i es el área quemada, FL_i es la carga de combustible disponible, CC_i es la calidad de la reacción de combustión y EF_i es el factor de emisión. Estos parámetros son determinados mediante inspección por satélite.

Se presentan las estimaciones de emisiones de BC y otros contaminantes de distintos trabajos que ocupan distintos modelos atmosféricos. La presentación de los resultados se desagrega por actividad y por sector geográfico. Estos resultados son esquematizados y resumidos en la Figura 1.7. La Figura 1.7 muestra las fuentes principales de BC junto a la estimación de la incertidumbre de estos resultados y la emisión de especies coemitidas con efectos de enfriamiento o precursores, pues cabe recordar que los efectos climáticos netos del BC se ven afectados por estas especies.

En la Figura 1.7 se comparan los resultados de los modelos GAINS, SPEW y RETRO, que si bien hay discrepancias entre sus resultados, sí tienen el mismo comportamiento en cuanto a las propiedades cualitativas de los registros. Todos los resultados concuerdan con que las tres mayores fuentes de emisión son las quemas abiertas, los motores diésel y la quema doméstica de combustibles sólidos. Seguido de estas fuentes están las industrias en países en desarrollo; su contribución no podría ser considerada despreciable

La parte derecha de la Figura 1.7 muestra las proporciones entre POA⁶ y BC, y entre SO₂ y BC. Mientras más alto sea este valor, mayor será la masa de especies coemitidas que podrían enmascarar el forzamiento directo que el BC tiene sobre el clima. No se presentan especies gaseosas como el monóxido de carbono o el O₃, los cuales son gases precursores.

⁶ POA: Aerosol Orgánico Primario. Concepto definido en la sección 1.2. de este trabajo de memoria.

Para dimensionar el nivel de emisiones de Carbono Negro por sector, se puede observar la Figura 1.8, donde también se puede apreciar cual es la fuente más representativa de cada lugar geográfico.

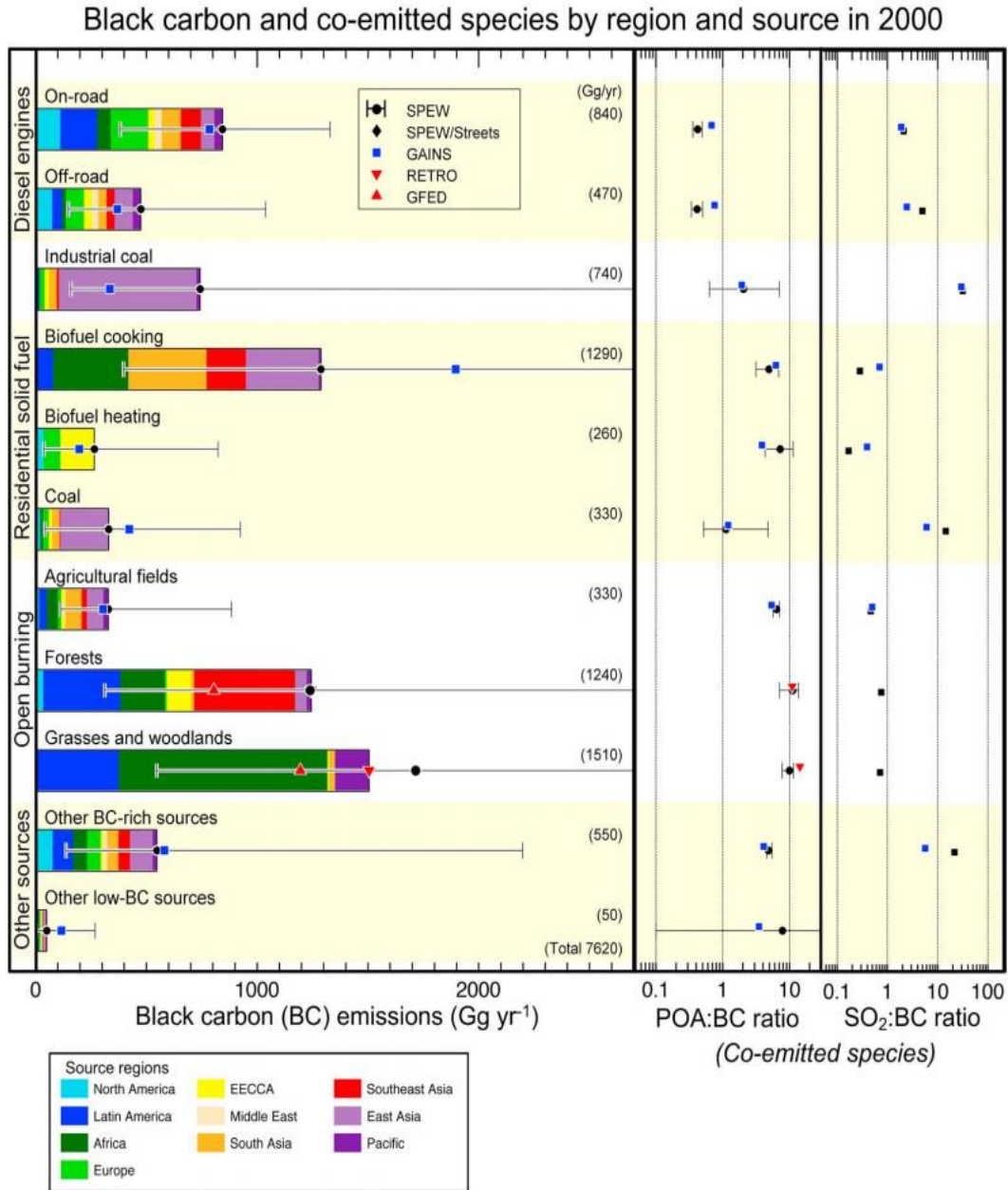


Figura 1.7. Emisiones anuales de BC para los años 2000 por categoría de fuentes y proporciones de aerosoles coemitidos. Las emisiones del modelo SPEW son del trabajo de Lamarque et al. [2010]; del modelo GAINS son de UNEP/WMO [2011a, 2011b] y RETRO del trabajo Schultz et al. [2008]. Fuente: Bond et al. (2013)

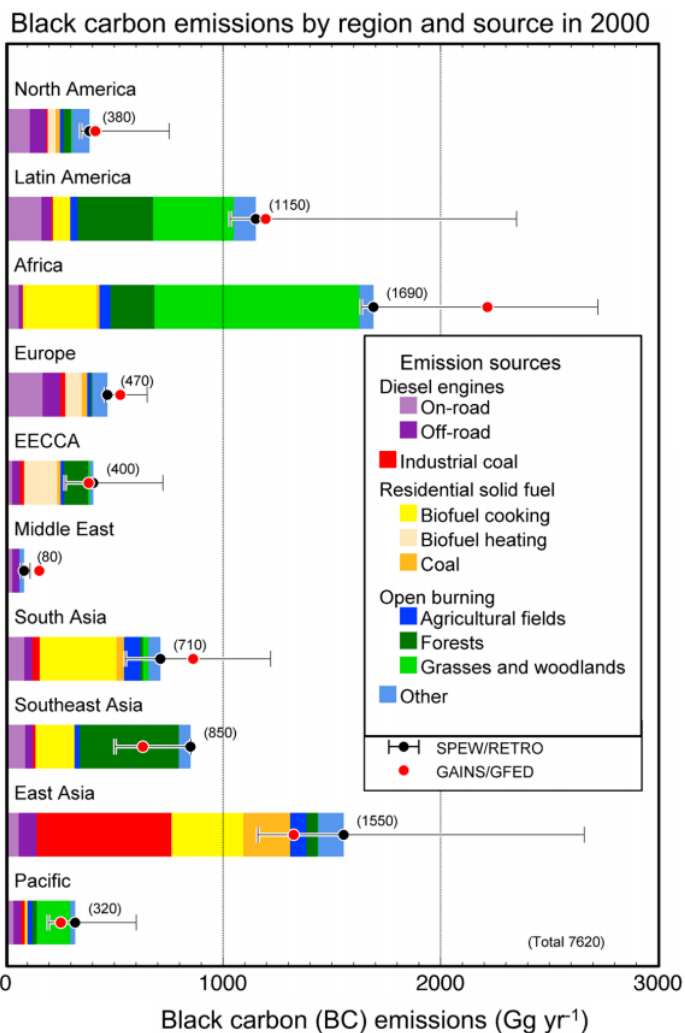


Figura 1.8. Emisiones de BC para los años 2000 por región indicando la mayor fuente de emisión. Son los mismos datos de la Figura 1.7. Fuente: Bond et al. (2013)

El artículo, además de mostrar en forma representativa los valores de emisiones, muestra una lista de datos como en la Tabla 1.2. En esta tabla se muestran los resultados de cada modelo atmosférico evaluado y especificando la fuente principal de emisión a nivel mundial de quemadas abiertas de biomasa.

Si bien la temática central de este trabajo de memoria no está relacionada con las emisiones BC de este tipo de fuentes, sí es importante conocer las estimaciones que se tienen, pues es una de las mayores fuentes de Carbono Negro a nivel mundial y esta sección es para contextualizar al lector sobre la actualidad de este contaminante.

Tabla 1.2. Valores medios de las estimaciones de las mayores fuentes de BC para quemas abiertas de Biomasa en [Gg] al año. Adaptado de Bond et al. (2013).

	Inventario [Gg año ⁻¹]					
	GFED		RETRO		GAINS	SPEW
	2000	Clim.	2000	Clim.	2000	Clim.
Incendios en pastizales y bosques						
• Pastizales y sabana abierta	820	850	310	290		
• Bosques	330	350	1220	1220		
• Total de pastizales y bosques	1150	1200	1530	1510		1710
Incendios forestales						
• Deforestación y degradación	230	440	No esp. ⁷	No esp.		
• Bosques (excluye deforestación y degradación)	300	370	No esp.	No esp.		
• Turba	2	130	No esp.	No esp.		
• Total de incendios forestales	253	940	830	1240		1240
Quema de desechos agrícolas	50	60	No est.	No est.	290	330
Total	1730	2200	2370	2750		3280

Se menciona que existen intervalos demasiado amplios de incertidumbre de estas estimaciones debido a las causas discutidas en las secciones anteriores. Ya presentadas las emisiones de quema de biomasa, se procede a describir las emisiones totales de las otras fuentes importantes:

- **Motores diésel.** Es importante mencionar que para desagregar las emisiones generadas por motores de combustión interna a diésel, se hace la distinción entre motores que se encuentran en ruta o fuera de ella. Aquellos que se encuentran fuera de ruta son aquellos que se ocupan en la actividad agrícola, minera, construcción u otra maquinaria pesada que lo requiera. Por otra parte, se les denomina *en ruta* a aquellos motores usados en vehículos de transporte de carga o pasajeros que ocupe vías urbanas o rurales. Para los años 2000, las emisiones correspondientes a combustión en motores diésel (dentro y fuera de ruta) representan alrededor de un 20% de las emisiones globales. Esta fuente cuenta con la menor cantidad de especies precursoras emitidas en conjunto con el BC (T. C. Bond et al., 2013). Esta fuente es particularmente controlable, pues existe un gran desarrollo de tecnologías de control de emisión de particulado, pero el nivel de azufre de los combustibles debe ser retirado en el refinamiento pues algunas tecnologías como los filtros de partículas pierden efectividad y pueden dañarse por el uso de combustible no

⁷ No especificado.

apropiado. En regiones donde este control de combustibles es menor, no sólo las emisiones de material particulado son mayores, sino que también las emisiones de óxidos de azufre también lo son.

- **Carbón industrial.** La quema de carbón con fines industriales contribuye con alrededor del 9% de las emisiones globales y se produce en procesos que involucren calderas, producción de ladrillos o de coke para la industria acerera. La producción de BC de esta fuente puede ser evitada, pero en países en vías de desarrollo se usan calderas simples sin control de emisión. Este tipo de fuentes es la que emite mayor cantidad de óxidos de azufre en conjunto con BC. Las plantas de generación de electricidad en base a quema de carbón no se cuentan en esta categoría debido al control que tienen sobre su proceso.
- **Combustibles sólidos de uso residencial.** Contribuye alrededor de un 25% de las emisiones globales, donde se incluyen la madera, desechos agrícolas, estiércol y carbón para la cocina o calefacción doméstica. Las emisiones de esta fuente serán mayores para países donde no toda la población tiene acceso al uso de electricidad y gas. La calidad de la combustión es pobre, lo que resulta en altos ratios de POA: BC. Sin embargo, las emisiones de óxidos de azufre son menores en comparación a las fuentes mencionadas anteriormente.
- **Quemas abiertas.** Se trata de la principal fuente de BC, con una contribución de aproximadamente el 40% de las emisiones totales. En la Tabla 1.2 se comparan los resultados de emisiones de distintos modelos atmosféricos. La calidad de la combustión es descontrolada para este tipo de fuentes, por lo que se genera gran cantidad de material orgánico y la proporción POA/BC es la más alta – en promedio – de todas las fuentes, aunque puede variar en un amplio rango. Puede darse en algunos casos en que la calidad de la combustión, ya sea accidental o intencional, sea mejor debido a la alta presencia de oxígeno en el ambiente.
- **Otras fuentes.** Con la suma de los porcentajes anteriores de las distintas fuentes se tiene más de un 90% de las emisiones globales. El resto de los contribuyentes se muestran en la Tabla 1.3.

En este estudio se mencionan los modelos SPEW y GAINS como dos modelos que pueden ser fiables debido a que muestran resultados similares para distintas fuentes de emisión. Además, para contrastar los resultados, se menciona el modelo Cooke99, el cual cuenta con un inventario tal que los resultados que entrega están sobreestimados y por tanto, no son consistentes con la realidad.

Tabla 1.3. Valores medios de estimaciones usando el método Bottom – Up. Se trata de todas las emisiones asociadas a energía dadas en Gg año⁻¹. Adaptado de Bond et al. (2013).

Fuente	Inventario BC [Gg año ⁻¹]	
	SPEW	GAINS
Motores diésel		
- Motores diésel en ruta	840	780
- Motores diésel fuera de ruta	480	370
- Total diésel	1320	1150
Carbón industrial		
- Todo uso de carbón	740	340
- Total	740	340
Combustibles sólidos de uso residencial		
- Madera, uso para cocina	1000	1580
- Otros biocombustibles, uso para cocina	290	310
- Todo biocombustible, calefacción	260	200
- Carbón cocina y calefacción	330	420
- Total de uso de combustibles sólidos de uso residencial	1880	2510
Otras fuentes		
• Industria que no usa carbón (incluye biocombustible)	170	30
• Vehículos a gasolina en ruta	110	80
• Generación residencial mediante el uso de diésel	100	170
• Aviación	20	-
• Transporte marítimo	100	40
• Encendido (llamas de gas por ejemplo)	-	260
• Toda otra fuente rica en BC	70	20
• Plantas de generación	20	20
• Otras fuentes de baja emisión de BC	-	60
• Total de Otras fuentes	590	690
Total	4510	4690

Fuentes de incertidumbre de los resultados

Como existen distintos modelos para estimar las emisiones de BC, los datos que estos adoptarán serán distintos también. Por ejemplo, se vio que el inventario Bottom – Up necesitaba el nivel de actividad de cierta área en específico, pero esta actividad puede corresponder a información disponible en bases de datos internacionales como la Agencia Internacional de Energía (IEA) o los datos de consumo de combustible de las Naciones Unidas y además, estos datos pueden entrar en modificación si quien hace las estimaciones considera que algunos datos no responden a la realidad

operacional. También se mencionó que la actividad puede ser considerada como la cantidad de combustible consumido, y para ello se requiere información sobre la compra – venta de combustibles basados en carbono. Para los combustibles como el diésel, el carbón o la gasolina pareciera que los datos pueden representar de forma acertada la realidad, pero existen otros combustibles, cuya transacción está fuera de control estadístico como la leña u otros tipos de biomasa o biocombustible.

Con respecto a los factores de emisión que requiere la metodología Bottom – Up. Como se mencionó anteriormente, la cantidad emitida de BC y OC depende de distintas variables como la calidad del proceso de combustión, composición del combustible, la temperatura que alcanza la combustión y la cantidad de aire en la mezcla. Por otra parte, el factor de emisión se ve reducido si la fuente cuenta con un tratamiento del escape para reducir el material particulado emitido. Por ejemplo, los motores diésel deben contar con tecnología de reducción de emisiones adicional a la que algunas veces trae de fábrica. No así los vehículos a gasolina, donde la cantidad de material particulado es considerablemente menor y más aún la cantidad de BC emitido como lo propone Wang (2015) donde se menciona que los factores de emisión basados en el kilometraje están sobreestimados en comparación a los medidos in – situ para vehículos livianos a gasolina.

Otro factor importante es la realidad de operación, pues el factor de emisión varía dependiendo del régimen de operación de la fuente. Para motores diésel, la cantidad emitida de distintas especies cambia si el vehículo se encuentra en ruta o en una prueba de laboratorio. Para una caldera también existen ciclos de quema, por lo que es difícil simular una condición de trabajo para los motores o calderas.

El factor de emisión dependerá directamente de calidad del combustible de entrada para realizar la combustión. Para países de la Unión Europea o Estados Unidos, la calidad del combustible está regulada y por tanto esta variable se encuentra bajo control. Sin embargo, para países en vías de desarrollo, la calidad del combustible es pobremente controlada, ya que las prioridades son otras y por tanto, se produce un sesgo para la estimación de factores de emisión.

De forma general, se resumen las incertidumbres de los resultados en:

1. Los factores determinados en condiciones de laboratorio son distintos a las tasas de emisión en operación in situ de quema residencial de combustible, industria tradicional o vehículos que no funcionan de manera óptima.
2. Separación del material particulado en BC y OC, como lo visto en las secciones anteriores.
3. Cuantificación de fuentes individuales que emiten alta cantidad de BC.
4. La cantidad de combustible no es un dato exacto y por lo general entra como una estimación.

1.3.2. Updates of the Guidebook Chapter on Road Transport (Ntziachristos et al., Julio 2007)

Este trabajo no muestra niveles de emisión, sino que su importancia radica en la determinación experimental de factores de emisión de aerosoles de distintas especies, entre ellas, Carbono Elemental. Además de dar valores de proporciones entre especies emitidas, se mencionan algunos métodos para medir la concentración de EC. La determinación de masa de EC y OC no es sencilla. La colección de las muestras se hace en filtros de membrana de politetrafluoretileno (PTFE). La masa se determina al pesar (a nivel microscópico) el filtro cargado y cuando se encuentra limpio.

En este trabajo se describe con mayor detalle el método óptico térmico por transmisividad, ya que los factores recopilados son, en su mayoría, determinados por este medio. Este método consiste en elevar la temperatura del filtro a más de 900°C en una atmósfera inerte y así volatilizar el material. Luego, se hace combustionar el material que queda y mediante la medición del nivel de CO₂, se determine de forma indirecta el EC.

En caso en que las temperaturas sean muy altas, usarán filtros de cuarzo para la determinación de niveles de carbono. La particularidad de los filtros de cuarzo es que tienen una mayor afinidad con las especies volátiles y la adsorción de estas en sus paredes, por lo que retienen más material que los filtros de PTFE. Algunos filtros que no son de PTFE ni de cuarzo pueden llegar a tener una eficiencia del 96%, mientras que los de cuarzo llegan a ser 100% eficientes en términos prácticos.

Luego, la determinación de la concentración de material particulado (PM) se lleva a cabo en filtro de PTFE, mientras que las relaciones del tipo EC/OC se realiza en filtros de membrana de cuarzo. Si bien el nivel de EC en ambos tipos de filtros no debería diferir, los resultados para niveles de OC sí lo hacen. Algunas soluciones a esto son filtrar dos filtros en serie de PTFE y luego uno de cuarzo y otro filtro en paralelo para determinar la relación de EC/OC. Sin embargo, se menciona que esta configuración no es habitual en la práctica.

El trabajo de Ntziachristos se centra en recopilar proporciones entre especies emitidas para distintos contaminantes en el sector transporte caminero. Se presentan dos métodos para determinar de forma experimental estas cantidades. El primero consiste en coleccionar muestras de filtros en túneles. El espacio confinado por el túnel hace posible la medición mediante la estimación de la tasa de intercambio de aire y la multiplicación con la diferencia de concentración entre la entrada y la salida del túnel. El otro método presentado consiste en medir las variaciones de nivel de concentración sobre el *background* existente de cierta localidad, expresado en aumentos de nivel de CO₂ y CO, que se origina de la combustión. Con este método, los factores de emisión de PM pueden ser determinados a partir de la masa de combustible consumido.

Cada uno de estos métodos cuenta con ventajas y desventajas características. El método de medición en túneles provee una visión directa de la realidad operacional de los vehículos en cuanto a sus emisiones de PM y, por tanto, la relación EC/OC de una gran muestra de vehículos. Sin embargo, cuenta con variables que se encuentran fuera de control como el número de vehículos, el tipo de combustible, tasas de intercambio de aire, consumo de combustible, etc.). Los resultados de este método pueden verse distorsionados por otras partículas existentes en un túnel como restos de neumático o altas concentraciones de polvo. Otra fuente de incertidumbre tiene relación con el *mix* de vehículos dentro del túnel, lo que hace difícil la desagregación. Por último, las condiciones ambientales dentro de un túnel también afectarán al resultado final de las mediciones, sobre todo en el contenido de OC volátil.

Se muestran valores para las fracciones de EC/PM, obtenidas de distintos trabajos que ocupan los distintos métodos descritos anteriormente. La presentación de estas tablas se hará en el capítulo de metodología, ya que algunos valores podrán ser usados para vincular la emisión de material particulado con BC. Los valores presentados son usados para modelar las emisiones, independiente si cuentan con un amplio rango de incertidumbre. Se puede adelantar que en promedio, para motores diésel en vehículos pesados, la relación másica entre EC/OC disminuye a medida que aumenta la carga para el motor y que aproximadamente un 80% del material particulado es EC. Para vehículos diésel livianos, el 80% es EC, independiente de la condición de operación, debido a la oxidación catalítica que reduce el OC.

Finalmente, se dan factores de emisión para otras tecnologías como el uso de gas natural y biodiésel. Los siguientes capítulos no están referidos a emisión de EC o BC, por lo que no es relevante para este trabajo de memoria.

1.3.3. On-road diesel vehicle emission factors for nitrogen oxides and black carbon in two Chinese cities (X. Wang et al., 2012)

Este artículo presenta los resultados de una campaña experimental donde se determinó el factor de emisión de 440 camiones pesados en distintas ciudades de China. Los contaminantes de interés para este artículo son el BC y los óxidos de nitrógeno NO_x.

Es importante mencionar este trabajo por distintas razones. Una de ellas es que presenta otro método para medir concentración de BC adicionalmente a lo mencionado en el trabajo de Ntziachristos. Este método consiste en seguir vehículos en ruta indistintamente (dando preferencia a la tipología de interés) sobre una estación de monitoreo móvil equipada con instrumentos de respuesta rápida para monitorear en tiempo real la emisión del vehículo que se esté siguiendo, pudiendo así

recolectarse una serie de datos de una gran cantidad de vehículos en unas pocas horas y dejar registro en vídeo de cada vehículo para luego asociarlo a su respectiva concentración sobre el *background*. Como adelanto, esta técnica de medición es la que se usará en la campaña experimental asociada a este trabajo de memoria; más detalles se darán en el capítulo de la metodología. Además, se ocupa un microaethalómetro que, a diferencia de los resultados mostrados en la sección anterior, mide BC de forma directa y no EC.

La forma en que se calculan los factores de emisión, es mediante su consumo de combustible:

$$EF_p = \frac{\Delta[P]}{\Delta[CO_2] \times \frac{MW_C}{MW_{CO_2}} + \Delta[CO] \times \frac{MW_C}{MW_{CO}} + \Delta[BC] \times \frac{MW_C}{MW_{BC}}} \times w_c \quad (6)$$

El uso de esta ecuación supone que: las especies primarias carbonosas emitidas de la combustión son monóxido y dióxido de carbono, y BC; la cantidad de HC emitida puede ser despreciada sin variar en mayor medida el resultado de los factores de emisión; se considera el efecto de la humedad y la temperatura.

En la ecuación 6 se tiene que $\Delta[i] = [i] - [i]_0$, $i = P, CO_2, CO$ y BC; el subíndice 0 denota el valor de línea base; EF_p es el factor de emisión basado en el combustible del contaminante p, en gramos emitidos por kilogramo de combustible consumido; $\Delta[P]$ es la concentración en ruta del contaminante p por sobre la línea de base en gramos por metro cúbico de aire; $\Delta[CO_2]$, $\Delta[CO]$ y $\Delta[BC]$ representa los incrementos de la concentración de CO_2 , CO y BC en gramos por metro cúbico de aire; MW_i es el peso molecular de la i-ésima especie; w_c es la fracción de masa de carbono en el combustible. Se asume que la dilución de las especies es homogénea para este caso.

La discusión de los resultados se hace en base a la estadística. Se agrupan los camiones muestreados según sea la ciudad en que fueron registrados, la velocidad que llevaban y la condición de trabajo (subida o en planicie). Los valores son comparados y se determina una matriz con factores de emisión para los camiones. Se comenta sobre la efectividad de las políticas y normas que rigen la emisión de contaminantes del transporte pesado. Se determina que en la ciudad de Beijing, donde se existe un control más estricto sobre las emisiones, el factor de emisión de BC es menor, mientras que en Chongqing los valores de factor de emisión de BC son significativamente mayores, debido al menor control en esta ciudad. El objetivo principal de este estudio fue determinar la efectividad de cumplir con estándares de la norma Euro V⁸ en las ciudades.

⁸ En el estudio se habla de la norma China V, pero se aclara que es homóloga o equivalente a la norma Europea.

1.3.4. Resultados actualizados de otros inventarios

Además de los trabajos revisados referente a la medición de concentraciones de BC y las estimaciones de las emisiones globales, se tiene como referencia dos inventarios que contemplan al Carbono Negro como uno de los contaminantes de interés.

El inventario EDGAR en su versión 4.3.1 estima las emisiones de BC y otros contaminantes a partir de la actividad económica de los países y su consumo energético con base a los reportes dados a la IEA. Este inventario desagrega por contaminante: BC, CO, NH₃, compuestos orgánicos volátiles distintos al metano derivados de la quema de combustibles fósiles, NO_x, OC, PM_{2.5} y SO₂. Luego, la desagregación viene por sector, donde se distingue al sector transporte caminero en una línea de tiempo desde 1970 hasta 2010. Las emisiones a nivel nacional ascienden a 6.21 Gg para el año 2010 para el sector transporte caminero.

El inventario VOCA Emissions Inventory entrega valores para emisiones antropogénicas y actividad volcánica para Sudamérica. Las emisiones para Chile están basadas en la propuesta de la CONAMA⁹ del 2008. Las emisiones son estimadas para NO_x, SO₂, componentes orgánicos volátiles, CO, and NH₃ en estado gaseoso, con PM_{2.5} y PM₁₀ solamente para Chile and BC and OC primario fuera de Chile. La desagregación contempla fuentes móviles, entregando un estimado de 7.2 Gg¹⁰ al año 2010.

1.4. Carbono Negro y su interacción con el ambiente y el clima

La bibliografía relevante para abordar el efecto del BC en el sistema climático trata temas sobre el forzamiento radiativo a nivel global y local, dependiendo de la región de interés. Para registrar lo relevante para este trabajo de memoria, se han revisado los siguientes artículos:

1.4.1. Global and regional climate changes due to black carbon (V. Ramanathan, G. Carmichael, 2008)

Este estudio se concentra en definir los efectos del BC en el balance radiativo y su forzamiento, es decir, la cantidad de energía por unidad de área que el aerosol absorbe o refleja, expresada por lo general en W/m². Se hace hincapié en aquellos aspectos técnicos que, por definición, son ignorados al momento de modelar el efecto de los aerosoles sobre el clima. Un ejemplo de esto

⁹ Comisión Nacional de Medio Ambiente.

¹⁰ Este valor está modificado de la fuente original, ya que se presentaban valores extremos anómalos que, según juicio experto, debieron no ser considerados.

es el polvo atmosférico presente en los aerosoles. Se ha determinado que el polvo es un contribuyente importante a la absorción de luz en la región ultravioleta del espectro electromagnético.

Además del polvo existente, existen otros componentes que es importante conocer y considerar, pues no se concibe una comprensión del fenómeno climático sin tener en cuenta el estado de mezcla del BC (punto explicado en las secciones anteriores).

Se definen las nubes atmosféricas café (ABCs por sus siglas en inglés) como un conjunto de aerosoles que están compuestos de BC, sulfatos, nitratos, ceniza, sal de mar y otras especies, que pueden contener especies coemitidas o estar en estado de mezcla por interacciones en la atmósfera. Se ha determinado que el mecanismo de remoción de estos aerosoles es la lluvia a o la nevada y que estos mecanismo de remoción, ya sea deposición húmeda o directa, limita la vida útil en la atmósfera del BC a aproximadamente semana.

En las secciones anteriores se ha mencionado que el BC tiende a aumentar la temperatura de la superficie donde se encuentra depositado, pero en este estudio se describe la forma en que el BC interactúa con otros actores del sistema climático.

Se sabe que la absorción solar del BC aumenta inversamente con las longitudes de onda, desde las infrarrojas ($\sim 1 \mu\text{m}$) a longitudes ultravioleta, dándole un color café al cielo. Sin embargo, el efecto de calentamiento del BC es distinto al del CO_2 , que causa un forzamiento positivo¹¹ en la atmósfera y en la superficie con un efecto con poca variabilidad según sea la región. Por contraparte, el BC aumenta la cantidad de energía en la atmósfera reduciendo la energía que llega a la superficie con grandes diferencias entre regiones.

Se explica que los efectos del BC se resumen en tres macro procesos. El primero tiene relación con aquellos que ocurren en la parte superior de la atmósfera (TOA del inglés top of the atmosphere). Estos procesos ocurren en la forma siguiente:

1. Se absorbe la radiación solar reflejada por el sistema compuesto por la superficie terrestre, la atmósfera y las nubes, reduciendo el albedo del planeta debido al efecto del BC.
2. Las partículas depositadas sobre la nieve y los mares de hielo denominadas hollín, disminuyen el albedo de estas superficies.

¹¹ Se hablará de forzamiento positivo cuando el efecto neto del contaminante tienda a aumentar la temperatura del sistema. Se hablará de forzamiento negativo cuando la temperatura tienda a disminuir.

- El material particulado dentro de las gotas que forman las nubes y los cristales de hielo, disminuyen el albedo de las nubes, ya que aumenta la capacidad de absorción de radiación incidente y directa.

Estos tres procesos contribuyen a un forzamiento positivo en la TOA (Ramanathan & Carmichael, 2008).

Además, se debe considerar el efecto de otras especies como sulfatos, nitratos y otras especies orgánicas en ABCs, los cuales tienen un efecto de dispersión de la radiación solar y resultando en un forzamiento negativo de la TOA. Estas especies de aerosol también pueden ser núcleo de gotas de nubes, aumentando el albedo de las nubes.

Para dimensionar y comprender el efecto y la forma en que los distintos aerosoles contribuyen al forzamiento radiativo, se esquematiza la situación como en la Figura 1.9, donde se muestra en a) el forzamiento radiativo de todos los gases de efecto invernadero, b) el CO₂, c) el forzamiento directo del BC y d) el forzamiento de otros aerosoles que no entran dentro de la clasificación de BC (forzamiento directo e indirecto). Esta imagen comprara los efectos de cada uno de estos agentes. Además, de las 3 formas que se nombraron en la lista anterior, la forma 1 es la más significativa en la que el BC actúa, pues en las formas 2 y 3, los resultados tienen una mayor incertidumbre y sólo contribuyen a aproximadamente 0.1 [W/m²]. De la Figura 1.9, el forzamiento radiativo del BC más las especies coemitidas en la TOA, es negativo (suma de las cantidades) y es de -1.4 [W/m²], que incluye un -1 [W/m²] que puede enmascarar el efecto de los gases de efecto invernadero.

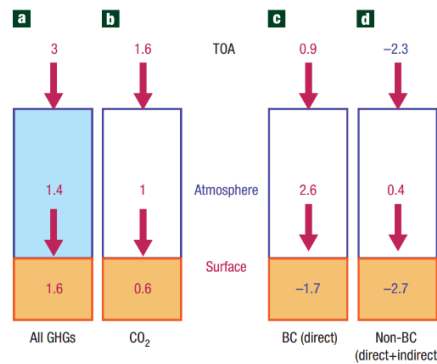


Figura 1.9. Comparación de los forzamientos radiativos globales promedio dado a los gases de efecto invernadero CO₂, CH₄, N₂O y ozono, y b) el CO₂ por sí solo. El forzamiento mostrado en la parte superior de las zonas celestes es el que corresponde a la TOA, en la zona celeste es el forzamiento en la atmósfera y la zona inferior es la superficie terrestre. Estas estimaciones corresponden al año 2005, con una incertidumbre del orden del ±20%. El forzamiento dado del BC son del estudio de (Chung, Ramanathan, Kim, & Podgorny, 2005) y tienen una incertidumbre del orden del ±50%. El ítem d) es el forzamiento directo e indirecto de otras especies del mismo estudio citado anteriormente. Fuente: (Ramanathan & Carmichael, 2008).

El forzamiento debido al carbono negro (ver Figura 1.9) de $0.9 \text{ [W/m}^2\text{]}$ (con un rango de 0.4 a $1.2 \text{ [W/m}^2\text{]}$) es como mucho el 55% del forzamiento del CO_2 y es mayor que el forzamiento debido a los gases de efecto invernadero (Ramanathan & Carmichael, 2008). Algunos modelos globales climáticos estiman el forzamiento en 0.2 a $0.4 \text{ [W/m}^2\text{]}$. Esto se puede explicar debido a que algunos modelos no consideran estados de mezcla del BC o también se debe a que los *peak* de concentración de BC están por sobre los 2 kilómetros y los modelos consideran que la concentración se encuentran cerca de la superficie; en algunos casos, la absorción de las nubes aumenta, debido a que las nubes que se encuentran en un nivel superior absorben la radiación incidente en otras nubes que se encuentran en un nivel más bajo. Además, los modelos que subestiman el forzamiento del BC no consideran el que es emitido por quema de biomasa que, como se mencionó en las secciones anteriores, representa cerca del 40% de las emisiones totales.

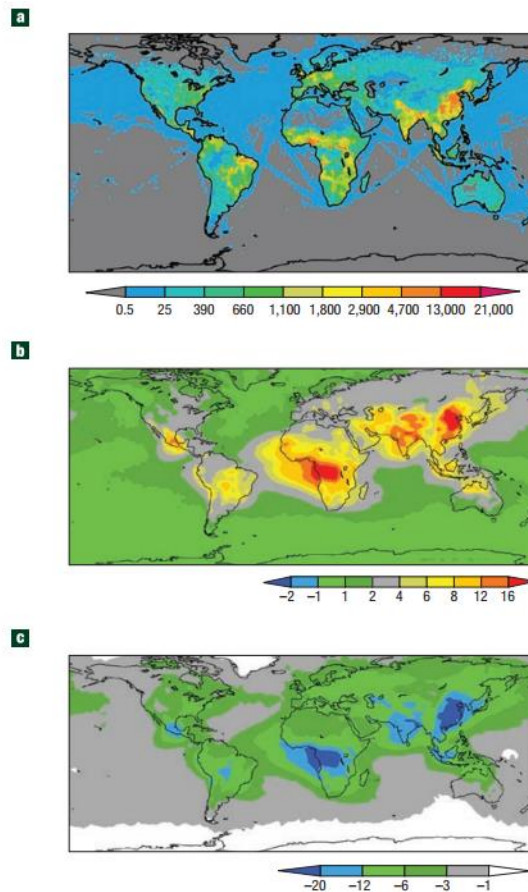


Figura 1.10 a. Emisiones de BC en toneladas por año del estudio de Bond et al. (2004). b. Calentamiento de la atmósfera debido a la radiación solar del estudio Chung et al. (2005). Su incertidumbre es del orden de $\pm 30\%$. c. Forzamiento radiativo dado el oscurecimiento de la superficie dado el efecto de las ABCs (todos los aerosoles antropogénicos). Fuente: Ramanathan & Carmichael, (2008).

El segundo macro proceso tiene relación con la absorción del BC de la radiación reflejada y aquella que incide directamente sobre el aerosol, lo que aumenta el forzamiento radiativo en hasta 15 W/m² en las zonas más críticas (ver Figura 1.10). Estudios han demostrado que un espesor óptico de absorción ¹² de 0.02 es suficiente para incrementar la absorción de la baja atmósfera en un 50%. En promedio, el forzamiento debido al BC en la baja atmósfera es 2.6 [W/m²], lo cual es comparable al forzamiento en la TOA debido al efecto de los gases de invernadero (ver Figura 1.9).

El tercer proceso mencionado en este trabajo tiene relación con el oscurecimiento global. Este oscurecimiento se percibe en la forma en que el BC absorbe la radiación directa, reduciendo la radiación que alcanza la superficie. El efecto de oscurecimiento total se cuantifica en -4.4 [W/m²] (-3.4 [W/m²] por efecto directo y -1.0 [W/m²] por efecto indirecto; ver Figura 1.9, c y d). Este fenómeno significa una redistribución de la radiación solar entre la superficie y la atmósfera que puede debilitar el equilibrio radiativo – convectivo y disminuir la evaporación y las lluvias.

Con respecto a los efectos globales del BC en el sistema climático, se menciona que existen distintos niveles de acción de estos aerosoles. En la TOA, el forzamiento debido al BC se traduce en un aumento de la temperatura en un rango de 0.5 a 1°C, considerando una sensibilidad climática de equilibrio¹³ de 2 a 4°C si se dobla la concentración de CO₂. Por otra parte, las ABC's tienen un efecto de enfriamiento entre -0.75 a -2.5°C. Debido a que el forzamiento del BC resulta en una redistribución vertical del forzamiento solar, una conversión a escala simple comparando con doblar la concentración de CO₂ podría no ser un parámetro apropiado. Además, como se mencionó anteriormente, los aerosoles que contienen BC o no, perturban los ciclos hidrológicos en la forma en que el efecto de calentamiento aumenta la humedad en la atmósfera, lo que aumenta la presión de saturación del vapor. Con respecto a las ABCs, el forzamiento negativo en la TOA disminuye la vaporización debido al oscurecimiento de la superficie.

Los efectos regionales varían según las distintas causas mencionadas anteriormente. Esto es, que existe un aumento en la temperatura promedio de la atmósfera o de la superficie, un enmascaramiento del calentamiento global debido al efecto de las ABCs y un oscurecimiento de la superficie, o un aumento del derretimiento de los hielos y la nieve debido a la deposición del BC en

¹² Espesor óptico de absorción de aerosol: es una cantidad adimensional que representa la carga total de aerosoles en la columna de atmosfera. Es una métrica para dimensionar la extinción de la luz en el medio.

¹³ El IPCC lo define como una métrica para cuantificar la respuesta del clima a la concentración de un contaminante. Numéricamente se expresa como $\lambda = \Delta T/F$, donde se expresa el cambio de temperatura dado un forzamiento F, dado en W/m².

la superficie. Los efectos variarán según la localización geográfica del estudio, pues los efectos no son homogéneos en todo el planeta.

Luego, se discute la respuesta del clima ante el forzamiento. La respuesta al aumento de la presencia de las ABCs es un aumento de la permanencia de las nubes, conllevando a una disminución de las lluvias y un oscurecimiento de la superficie. Por otra parte, el efecto de calentamiento de los aerosoles de BC contribuyen a disminuir la humedad relativa de la atmósfera y reduciendo el albedo. Como se mencionó con anterioridad, estos efectos difieren según la región. Sin embargo, se ha concluido que el aumento de la temperatura puede llevar a inducir convección en el aire y con ello aumentar la formación de nubes siempre y cuando el espesor óptico de aerosol se mantenga menor a 0.05 (caso que no ocurre en las temporadas de quema en el amazonas o en la sabana africana o en algunas ciudades de África). La respuesta del clima ante el BC cambiará también si existe influencia del polvo atmosférico, que tiene gran capacidad de absorber la radiación.

1.4.2. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment (Bond et al., 2013)

En este trabajo se realiza una revisión de artículos que estudian, caracterizan y asocian fenómenos climáticos con el nivel de BC emitido y existente en la atmosfera. Luego de hacer las revisiones a distintos niveles climáticos se hace un resumen con los resultados más representativos presentados.

En este trabajo se hace un uso de terminología menos genérica para expresar el impacto del Carbono Negro en el sistema climático. Por este motivo, el uso del término forzamiento radiativo es insuficiente, sino que además, han de considerarse los efectos semidirectos (o a corto plazo) y la eficacia del forzamiento.

Se aclara que existe poco entendimiento científico de la forma en que estos forzamientos tienen respuesta en el sistema climático, complicando el cálculo exacto de las cantidades de energía involucradas además de incertidumbres entre las correlaciones entre las distintas variables existentes.

Dadas estas consideraciones, el forzamiento climático¹⁴ del BC en la era industrial, es decir, por acciones antropogénicas desde el año 1750, es de +1.1 [W/m²] con un 90% de incertidumbre en un rango de +0.17 a +2.1 [W/m²]. Este resultado es mayor que la magnitud cuantificada para el

¹⁴ Forzamiento climático usado como término genérico para cuantificar la perturbación en el balance energético terrestre.

forzamiento radiativo¹⁵ de efecto directo, cuya mejor estimación se tiene en $+0.71 \text{ [W/m}^2\text{]}$ con un 90% de incertidumbre en un rango de $+0.08$ a $+1.27 \text{ [W/m}^2\text{]}$. Estos resultados posicionan al BC como el segundo agente climático más importante en fenómeno de calentamiento global después del dióxido de carbono, aunque el BC actúa de manera muy distinta a los gases de efecto invernadero. Si se consideran todas las fuentes, esto es, naturales más antropogénicas, se tendrá un forzamiento directo de $0.88 \text{ [W/m}^2\text{]}$ con un 90% de incertidumbre en un rango de $+0.17$ a $+1.48 \text{ [W/m}^2\text{]}$. La desagregación del forzamiento se ha acordado en que $+0.29 \text{ [W/m}^2\text{]}$ corresponde al uso de combustibles fósiles, $+0.22 \text{ [W/m}^2\text{]}$ para biocombustibles y $+0.20 \text{ [W/m}^2\text{]}$ para quemas a cielo abierto. Las estimaciones del forzamiento directo se hacen a partir de observaciones del espesor óptico de absorción de aerosoles de la red AERONET y mediciones in situ. Se presenta mayor inexactitud en las estimaciones, en aquellas regiones donde el control sobre las emisiones es escaso.

A pesar de lo mencionado anteriormente, se menciona que si bien se tienen estimaciones para el forzamiento directo (aunque con un considerable grado de incertidumbre), el entendimiento científico que se tiene sobre el efecto indirecto del BC sobre las nubes es más bien escaso y los resultados que se tienen son dispersos. A pesar del poco entendimiento científico que se tiene, sí se ha logrado llegar a acuerdos con respecto a cómo las nubes son afectadas por el BC. Se sabe que el forzamiento climático por efecto indirecto es negativo y las estimaciones están en un rango de $-0.10 \pm 0.20 \text{ [W/m}^2\text{]}$ y que los efectos son a corto plazo. Se ha estudiado la relación entre el BC y la formación de nubes en la actividad CCN (formación de gotas a partir de un núcleo de una partícula de aerosol), pero los efectos varían cuando se estudia el Carbono Negro por sí solo y cuando está con otras especies coemitidas como el OC. El forzamiento climático de efecto rápido más el efecto semi directo del BC sobre las nubes se ha cuantificado en -0.61 a $+0.10 \text{ [W/m}^2\text{]}$ con un 90% de incertidumbre. Además, a nivel de gotas de nube, se ha estudiado que las propiedades microfísicas del BC cambian las propiedades de absorción de las gotas, con un efecto neto de forzamiento positivo. Por otra parte, en las nubes de fase mixta, el BC actúa como núcleo de “gotas” de hielo y puede producir cambios en la precipitación y cambios en la vida de la nube, con un forzamiento de $+0.18 \text{ [W/m}^2\text{]}$ en un rango de $+0.0$ a $0.36 \text{ [W/m}^2\text{]}$ con un 90% de incertidumbre. Para las nubes de hielo se tiene que el efecto del BC es mixto, es decir, que actúa en base a dos mecanismos: el primero, es que aumenta el número de partículas de hielo y el segundo es que aumenta la cantidad de partículas sobreenfriadas, reduciendo la humedad y la cantidad de nubes y por tanto, teniendo un efecto

¹⁵ Según el IPCC, el forzamiento radiativo se define como el cambio en la radiación neta en la TOA causada por un agente climático desde el año 1750, luego de alcanzado un equilibrio en la estratosfera, pero con las condiciones de la troposfera consideradas constantes y sin perturbación.

negativo. El efecto de forzamiento radiativo más efectos a corto plazo estimado es de $0.0 \text{ [W/m}^2\text{]}$ en un rango de -0.4 a $0.4 \text{ [W/m}^2\text{]}$ con una incertidumbre del 90%.

Otro de los sistemas que se ven afectados por causa de las emisiones de BC son las superficies de nieve o la llamada criósfera. El entendimiento científico del fenómeno de interacción del BC con las capas de nieve es mayor que con las nubes. Los fenómenos que afectan a las nieves y hielos son de corto plazo y de forzamiento radiativo, produciendo un derretimiento prematuro y una disminución del albedo de las superficies, lo que induce un efecto positivo de forzamiento y un aumento de la temperatura de la superficie. La mejor estimación del forzamiento efectivo para la era industrial es de $+0.10 \text{ [W/m}^2\text{]}$ con un 90% de incertidumbre en un rango de $+0.014$ a $+0.30 \text{ [W/m}^2\text{]}$ y considerando todas las fuentes se tiene que es de $+0.12 \text{ [W/m}^2\text{]}$ en un rango de $+0.02$ a $+0.36 \text{ [W/m}^2\text{]}$.

A pesar de todos estos resultados resumidos anteriormente, se debe entender que el BC no es emitido de manera aislada y que las especies coemitidas también tienen un rol importante en el forzamiento efectivo, como la materia orgánica, los sulfatos y gases precursores en la formación de ozono troposférico. Por este motivo, se separa el forzamiento neto del BC por fuente y caracteriza los efectos locales del BC en función de las otras especies que coexisten con el BC. Por este motivo, se presenta el efecto de cada fuente que sea rica en emisiones de BC y se caracteriza su rol en el sistema climático en función de otras especies emitidas.

Una de las fuentes con altos índices de emisión de BC son los **motores diésel** que estén o no fuera de ruta. El forzamiento atribuible a estas fuentes es certeramente positivo. El forzamiento producido por nitratos y el referente a las nubes reducen el forzamiento positivo e incrementan la incertidumbre en las estimaciones. El efecto negativo del BC es proveniente de efectos semi directos o corto plazo, de los cuales se cuenta con certeza en los resultados y por otra parte, para los efectos que no tienen mayor incertidumbre, el forzamiento sobre las nubes, dadas las emisiones de aerosoles de sulfuro, se compensa entre efectos positivos y negativos. Este impacto es mayor, donde las emisiones de sulfuros no ha sido controlada.

Otra fuente considerada es el uso carbón en la industria. La proporción de estas emisiones se guarda en mayor parte en BC y una pequeña fracción en POA (aerosoles orgánicos primarios). Emisiones derivadas de esta actividad contienen aerosoles de sulfuros, que causan efectos negativos en el forzamiento directo y en el forzamiento de nubes.

Para el uso de combustibles sólidos para para fines domésticos (leña principalmente) se tiene clara certeza que el forzamiento es positivo. Recordando que una bajo valor de la relación OC/BC indica aerosol absorbente y que contribuye al calentamiento neto de la superficie (UNEP/WMO,

2011), se menciona que si bien esta proporción es mayor en esta fuente que en motores diésel, el efecto de dispersión cubre sólo un 20% del efecto positivo de forzamiento directo. Además, para esta fuente, se emiten cantidades de OA, precursores de ozono troposférico, monóxido de carbono y componentes orgánicos volátiles, los cuales aportan de manera positiva al forzamiento. Por otra parte, el POA emitido por estas fuentes contribuye con forzamiento negativo sobre las nubes de fase líquida con gran incertidumbre. Las emisiones de NO_x que contribuyen al forzamiento negativo contribuyen de manera despreciable. Para la quema de carbón con fines domésticos, se tiene que el efecto negativo lo aporta el contenido de aerosoles de sulfuro emitidos. Además, la cantidad de POA emitido es mayor, pero aun así, el efecto sigue siendo un forzamiento positivo.

La última fuente importante que se menciona son las quemas a cielo abierto de biomasa. Estas emisiones contienen grandes cantidades de POA. Se indica que tal y como en el uso de combustibles sólidos para uso residencial el POA no contrarresta el efecto de forzamiento directo de BC y, además, el forzamiento dado el ozono troposférico es positivo, por lo que el efecto neto de esta fuente es positivo. También se tiene que el forzamiento de nubes es negativo, pero con un alto nivel de incertidumbre.

A pesar de todo el nivel de incertidumbre, se ha comprobado a nivel de significancia estadística que, cualitativamente, existe una respuesta del sistema climático a los forzamientos dados el BC. El resumen de la respuesta climática se encuentra en la Figura 1.11.

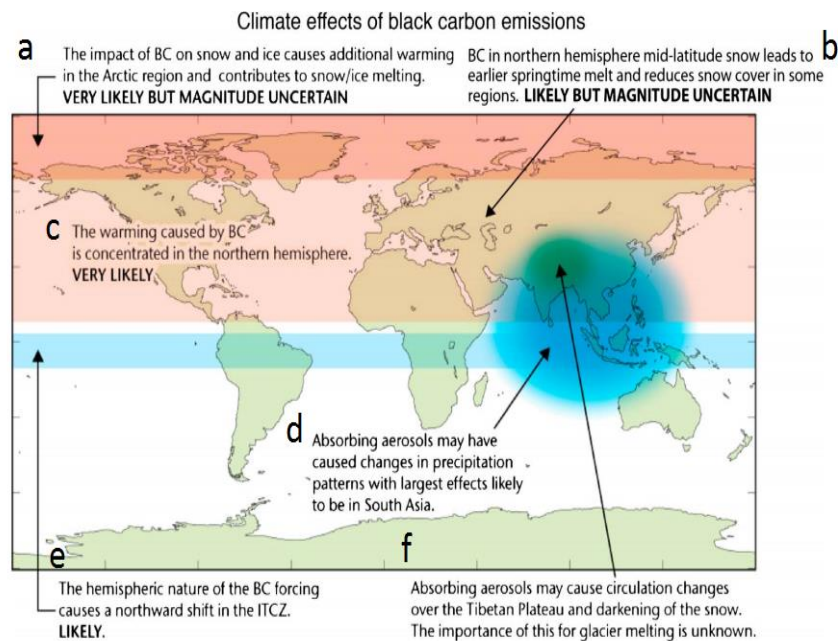


Figura 1.11. Resumen cualitativo del entendimiento actual de la respuesta global del sistema climático ante las emisiones de BC. Fuente: (T. C. Bond et al., 2013).

De la Figura 1.11, se tiene que:

- a) Distintos estudios llegan al acuerdo que el efecto de forzamiento directo positivo afecta de mayor manera al hemisferio norte. El impacto del Carbono Negro en las superficies de nieve y hielo causa un calentamiento adicional en el Ártico y contribuye al derretimiento acelerado de nieves y hielo. Se tiene certeza del mecanismo de acción del BC, pero las magnitudes difieren en cada trabajo de investigación.
- b) El BC en el hemisferio norte afecta al derretimiento prematuro de las nieves, reduciendo el espesor de las capas en algunas regiones. Al igual que en el inciso anterior, se tiene certeza del mecanismo, pero las magnitudes cuentan con un amplio rango de incertidumbre.
- c) Se sabe con certeza que el efecto de forzamiento positivo de la concentración de BC se concentra en el hemisferio norte.
- d) En algunas regiones (indicado en la Figura 1.11), el BC toma un efecto negativo, lo que podría causar cambios en los patrones de las lluvias. Estos efectos son más notorios en las regiones del sur de Asia.
- e) Se tiene certeza que la naturaleza hemisférica del forzamiento del BC causa un desplazamiento hacia el norte del clima característico de Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ por sus siglas en inglés).
- f) La naturaleza de absorción de radiación de los aerosoles podría causar cambios en la circulación sobre la Meseta Tibetana y oscurecimiento de las nieves. La importancia global del derretimiento prematura de estos glaciares es desconocida.

Por tanto, los efectos de los aerosoles que contienen BC sobre el clima son tan diversos como fuentes existan y como los lugares donde éste sea emitido, pues su efecto neto dependerá de las emisiones coemitidas y de las características climáticas de cada zona geográfica.

1.5. Carbono Negro en el contexto nacional

El objetivo principal de realizar una revisión bibliográfica es brindar antecedentes científicos sobre el entendimiento que se tiene sobre el Carbono Negro, sus propiedades y efectos sobre el cambio climático y documentar las políticas que se han establecido para actuar tanto a nivel mundial como nacional. Para esta sección del capítulo, los antecedentes no serán recogidos de artículos científicos, sino de una evaluación a nivel de políticas públicas. El documento transversal a este capítulo es el estudio *Controlando los contaminantes climáticos de vida corta* de autoría de Florencia Ortúzar y Carlos Tornel de la Asociación Interamericana para la Defensa del Ambiente (AIDA) más otros colaboradores (entre ellos Sebastián Tolvett, profesor correferente de este trabajo de memoria).

Este artículo sitúa el rol de Chile como emisor de CCVC y resumen a grandes rasgos los avances que se han hecho a nivel político para controlar las emisiones de estos contaminantes.

Dentro de las iniciativas y acuerdos para lograr un consenso en el control de emisiones de contaminantes (en primera instancia gases de efecto invernadero) se tiene:

- **Protocolo de Montreal.** Acordado en la Convención de Viena, celebrada en el año 1985 por la Organización de las Naciones Unidas, fue firmado en 1987 para comenzar a regir en 1989. Tenía por objetivo principal detener el deterioro de la capa de ozono mediante el control de las emisiones de clorofluorocarbonos (CFC). Una reducción de los CFC se tradujo en el uso de HCFC y HFC que, como se mencionó en las primeras páginas de este trabajo de memoria, es un CCVC que si bien no deteriora la capa de ozono, tiene un fuerte efecto como GEI. Se ha enmendado para que incluya estos últimos contaminantes dentro de las medidas de mitigación.
- **Protocolo de Kioto.** La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) de 1992 tuvo por objetivo estabilizar las concentraciones de GEI y evitar cambios que podrían resultar peligrosos para el sistema climático a nivel mundial, entrando en rigor en el año 2005. Este acuerdo incluye el control GEI como los HFC, CO₂, óxido nitroso N₂O, perfluorocarbonos y hexafluoruros de azufre SF₆ mediante el uso de inventarios para monitorear el cumplimiento de los estándares acordados. El acuerdo permite que las partes realicen el control de gases que estén de acuerdo a su realidad, por lo que la lista de gases puede diferir de un país a otro.
- **Coalición del Clima y Aire Limpio (CCAC).** Creada el 2012 por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), ahora ONU Medio Ambiente, en conjunto con los gobiernos de Bangladesh, Canadá, Ghana, México, Suecia y Estados Unidos, y actualmente cuenta con más de sesenta miembros entre los cuales se cuentan gobiernos y otras organizaciones intergubernamentales, representantes del sector privado y otros tipos de organizaciones. Dentro de los objetivos de la coalición está crear conciencia sobre los efectos adversos de los CCVC sobre el clima, la salud de las personas y los ecosistemas, mejorar el entendimiento científico sobre sus efectos y generar políticas públicas y acciones a nivel regional para abordarlos. Esta última iniciativa es, dentro de las nombradas, la única que aborda de manera explícita a los CCVC y dentro de ello al BC.

Con lo mencionado anteriormente se ha introducido el contexto global en el que se están desarrollando los cursos de acción con los cuales se está abordando la problemática de los CCVC en Chile. Cabe destacar una vez más que este trabajo contempla una primera propuesta de inventario

de emisiones de Carbono Negro para el contexto nacional y es parte de las medidas iniciales para comenzar a mitigar de manera significativa este contaminante del sector transporte caminero.

En el contexto nacional, si bien Chile es uno de los países que menos contribuyen a la carga global de GEI (0.26% de las emisiones totales), sus emisiones per cápita son las más elevadas en el contexto latinoamericano (Ortuzar & Tornel, 2016). Esto tiene causa raíz en el crecimiento del sector energético del país en los últimos años. Además, Chile ha sido clasificado como un país altamente vulnerable a los efectos del cambio climático según la CMNUCC. En cuanto a la repartición de sectores de la emisión de GEI, se tiene registro que el 72.7% corresponde a emisiones del sector energía y transporte, siendo este porcentaje equivalente a 79.49 billones de toneladas métricas de CO₂ equivalente (Ortuzar & Tornel, 2016). Por otra parte, en lo que respecta a la calidad del aire, las principales fuentes de emisiones de material particulado fino PM_{2.5} son el consumo de leña para calefacción y la quema de combustible diésel en vehículos. Como medida, se adoptaron distintas Normas de Calidad Primaria del Aire (NCPA) que si bien no explicitan niveles máximos para BC, sí consideran PM₁₀ y PM_{2.5}, de los cuales el BC es fracción en algunas fuentes (como los motores diésel). Sin embargo, estas normativas tienen por objeto mejorar la calidad del aire, dejando de lado apalejar los efectos adversos al clima de los CCVC.

Para concretar medidas de mitigación de los CCVC, Chile se hizo socio participante de la CCAC en 2012 para apoyar y desarrollar planes de acción para la creación de un marco regulatorio para la mitigación de los CCVC.

En Chile existe un marco institucional bien definido sobre la calidad del aire. Con estos ánimos es que se crea el Ministerio del Medioambiente (MMA) en 2010 mediante la Ley 20.417, que modificó la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente. Luego, el año 2014 se crea dentro del ministerio la División de Calidad del Aire y Cambio Climático cuyo foco es *“proponer e implementar planes, normas y políticas que integren el impacto de contaminantes atmosféricos locales y globales, en el contexto de los agentes forzantes de clima de vida corta, como el metano, los HFCs, o el carbono elemental, entre otros”*¹⁶.

Entre las normas e iniciativas que impulsa el MMA con respecto a la calidad del aire y los CCVC se pueden nombrar:

- **Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente:** dispone las bases y la forma en que se dictarán las Normas de Calidad Ambiental y las Normas de emisión.

¹⁶ Descripción disponible en la página <http://portal.mma.gob.cl/> (revisado el 20/08/2016)

- **Normas de Calidad Ambiental (NCA):** existen primarias y secundarias que corresponden al carácter nacional o local de la norma respectivamente. El Decreto Supremo (DS) N° 59/1998 introdujo la norma primaria que fija límites para la concentración de PM₁₀, PM_{2.5} y ozono de 24 horas y anual. Para el PM₁₀ este límite es de 150 µg/m³ para 24 horas y 50 µg/m³ para la concentración anual, aunque las normas de la OMS son más exigentes con estos valores. Para el PM_{2.5} los límites están dados por la NCA que entró en vigencia mediante el DS N° 12 de 2012 donde los estándares de emisión de 50 µg/m³. Por último, se menciona que para regular el ozono troposférico, la NCA fue establecida en 2012 mediante el DS N° 112, donde se estipula que la concentración máxima es 120 µg/m³ cada ocho horas.
- **Programa Aire Limpio:** programa creado el 2010 por el MMA cuyo objetivo principal es mejorar la calidad del aire en las ciudades del país enfocándose en la disminución del PM_{2.5} (que para algunas fuentes de emisión se traduce en una disminución en los niveles de BC). Se contempla un mayor énfasis en la capacidad de monitoreo y prioriza la acción sobre los sectores que más contribuyen a los niveles de PM_{2.5} como lo son los sectores: industrial, transporte y residencial. La estrategia del programa se enfoca en cuatro ejes principales que son:
 1. Proponer planes locales de descontaminación y mejorar el monitoreo de la calidad de aire y así mejorar la calidad de la información que el público pueda acceder.
 2. Controlar las emisiones del sector industrial con especial énfasis en las termoeléctricas, fundiciones y cadera.
 3. Control sobre las emisiones producidas por el uso de leña.
 4. **Control sobre las emisiones del sector transporte.**

Respecto a las emisiones del sector transporte, se pronostica un aumento de las emisiones debido al **crecimiento constante del parque vehicular** – ya el 2014 circulaban más de 4 millones de vehículos por el país y la tendencia al 2015 está al alza¹⁷ – y **el deterioro de los sistemas de control de emisiones**. Esta tendencia al alza en el parque vehicular y la necesidad de reducir las emisiones de PM junto con el desarrollo económico es que se han implementado medidas como normas más exigentes para el ingreso de vehículos, implementación de nuevas tecnologías, mejoras en la calidad de combustible, incentivos económicos para la adquisición de vehículos de baja emisión y sistemas de etiquetado de vehículos nuevos según su eficiencia. Dentro de las medidas concretas en el país se ha implementado la norma de emisión Euro V a partir del 2013 para controlar las emisiones de material particulado y NOx, contemplándose que para el año 2017, los buses del

¹⁷ Información disponible y descargable en http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/estadisticas_economicas/transporte_y_comunicaciones/parquevehiculos.php (revisada el 21/09/2016)

transporte público tengan que cumplir con la norma Euro VI. El propósito final es que para el 2025 80% del parque cumpla con las normas Euro V y VI (Ortuzar & Tornel, 2016).

Por otra parte, el plan busca controlar las emisiones del PM_{2,5} del uso de leña mediante el uso de calefactores que contaminen en menor cantidad y sean más eficientes, aumentar la disponibilidad de leña seca, incentivar la instalación de sistemas alternativos de calefacción en viviendas, y sensibilizar y educar a la población. Así, se reduce en gran medida una de las fuentes más importante de Carbono Negro.

Con respecto al monitoreo de la calidad del aire, se está implementando la capacidad y calidad de las estaciones y desde el 2012 el MMA deja a disposición la información a través del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA).

- **Planes de prevención y descontaminación:** estos planes están orientados a la descontaminación cuando existen episodios de Zona Latente o de Saturación (80 y 100% de la norma respectivamente) y están en pos de la salud de la población y por esto no están orientados a la problemática de los CCVC. La meta es llegar a contar con 20 planes de descontaminación para el 2018 y dentro de estos planes está el plan de descontaminación de Santiago dispuesto por el DS N° 66 considerado como el más importante en el contexto nacional.

Los planes de prevención contemplan al transporte en la medida en que exista un control de mayor exigencia sobre las plantas de revisión técnica y se incentive la compra de vehículos híbridos, eléctricos y vehículos Euro VI. Además, dentro de las medidas de los planes de prevención se contempla la restricción de circulación a vehículos en base a su antigüedad, medida que se encuentra con detractores debido a que los vehículos diésel contaminan más que los que funcionan con gasolina, independiente de su antigüedad. Así, la medida sería contraproducente pues el vehículo más nuevo y sin restricción no sería necesariamente el más limpio. Sin embargo, este argumento puede ser rebatido bajo la premisa que la implementación de la norma Euro VI ocasiona que los vehículos aportan una menor contaminación de NO_x (no así de PM), pues exige un filtro de partículas¹⁸ que mitigan casi por completo las emisiones de PM (y por ende, de BC) de los vehículos diésel. Así, los vehículos más antiguos que no cumplen esta norma siempre serán más contaminantes. Para este caso, un gran desafío es mantener operando de manera ópticas las tecnologías de control de emisiones y tratar que el deterioro no afecte en mayor medida a los factores emisión.

¹⁸ Como por ejemplo el uso de un filtro CRT (Continuously Regenerating Trap)

- **Impuestos a emisiones contaminantes:** desde 1986 y según lo que se dispone en la Ley 18.502, se grava a la bencina con 6 UTM por metro cúbico y al diésel con 1.5 UTM por metro cúbico sin discriminación de antigüedad del vehículo. Este impuesto exime a los vehículos pesados como camiones y a la maquinaria pesada que siempre funcionan mediante la quema de combustible diésel.

En septiembre de 2014 se incluyeron dos gravámenes mediante la reforma tributaria conocidos como “impuestos verdes”. El primer impuesto verde está referido a las fuentes fijas y grava las emisiones de PM, NO_x, dióxidos de azufre y dióxidos de carbono y como grava a los óxidos de azufre y al material particulado, está controlando de forma indirecta las emisiones de BC. El segundo impuesto verde está referido a la compra de vehículos nuevos para uso particular y fue implementado de manera gradual durante el año 2016. Este impuesto es calculado en función de las emisiones de NO_x, rendimiento urbano en kilómetros por litro de combustible consumido y el precio de venta. Se espera que este impuesto desincentive la adquisición de vehículos diésel a pesar que no grave las emisiones de material particulado; lo que ha generado debate entre algunos expertos, ya que se habla de un subsidio implícito a los vehículos diésel (Ortuzar & Tornel, 2016).

Si bien las medidas presentadas anteriormente podrían mitigar en cierta medida las emisiones de algunos CCVC, no están orientadas a mitigar los efectos del cambio climático en el país. Sin embargo y a pesar de esto, han existido ánimos de institucionalizar la necesidad de controlar el cambio climático en Chile. Así, el 2010 se incluyó una mención al cambio climático dentro de la modificación de Ley General de Bases del Medio Ambiente. Por otra parte, el Ministerio de Relaciones Exteriores tiene un departamento de Cambio Climático y Desarrollo Sostenible que tiene por función coordinar la gestión de las medidas adoptadas por acuerdos internacionales. También se tiene el Comité Asesor sobre Cambio Climático que involucra a 16 ministerios con el fin de asesorarlos sobre la posición de Chile frente la implementación de políticas, programas y planes referentes a CCVC que responden a acuerdos con la CMNUCC.

En cuanto a medidas concretas y compromisos que Chile ha hecho se encuentra la firma del Protocolo de Kioto en 2002 para reducir las emisiones de los seis gases que la convención regula: los HFC y compuestos orgánicos volátiles que son precursores en la formación del ozono troposférico. Dentro de los compromisos de Chile en este contexto, se tiene que el país ha presentado Contribuciones Nacionales Previstas y Determinadas (INDC) que contemplan entre sus puntos la reducción de emisiones de CO₂ por unidad de Producto Interno Bruto (PIB) en 30% respecto del nivel alcanzado en 2007 con expectativas de lograr a 2030 una reducción entre 35 a 45%. Sin embargo, este compromiso no es coherente con el contexto global de no aumentar la temperatura más allá de

2°C (Ortuzar & Tornel, 2016) y además, dentro de estas INDC se menciona la importancia de los CCVC en el contexto global, pero no medidas para la mitigación.

Los mencionados anteriormente son los aspectos más relevantes para comprender la posición de Chile en el contexto global de la mitigación de los CCVC, junto con su marco institucional y legal para ello.

2. Metodología de trabajo

En este capítulo se presenta la forma en que se logrará la concreción de los objetivos específicos y, en última instancia, la concreción del objetivo principal.

En la sección 2.1 de este capítulo se dará a conocer la forma en que se utilizó el modelo STEP para lograr los fines de este trabajo y realizar una breve descripción de cómo opera.

2.1. Revisión y modificación de los parámetros de entrada del modelo para el cálculo de emisiones

En las secciones anteriores se mencionó que los inventarios de emisiones pueden tener un enfoque del tipo Bottom – Up o Top Down. El cálculo de emisiones para efectos de este trabajo de memoria corresponde a una metodología Bottom – Up usando el modelo STEP 2.0 (Modelo de Consumo Energético y Emisiones para el Sector Transporte). Este modelo nace desde un interés de SECTRA en cuantificar el consumo energético y emisiones de GEI del sector transporte aéreo, marítimo, ferroviario y caminero chileno, encargando el trabajo a la Sociedad Consultora Sistemas Sustentables Ltda. El modelo también contempla una proyección hasta el año 2050 de consumo y emisiones en base a los datos existentes. Como es de suponerse, se considerará solamente el sector transporte caminero para este trabajo de memoria.

Para el sector de interés, el modelo se basa en la proyección de la demanda expresada en pasajero – kilómetro (PKM) y tonelada – kilómetro (TKM) para el transporte de pasajeros y de carga respectivamente. Un enfoque metodológico basado en la demanda le brinda al modelo mayor versatilidad al momento de simular escenarios sujetos a cambios en el futuro. Para poder determinar la demanda, se reparte el consumo energético total obtenido del Balance Nacional de Energía (BNE) y de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) en cuatro modos: aéreo, marítimo, ferroviario y caminero. Luego, la desagregación de los consumos del transporte caminero se realiza en dos niveles: el primer nivel se realiza por tipo de combustible (gasolina y diésel) obtenido de las fuentes mencionadas anteriormente. El segundo nivel separa en cinco categorías de transporte caminero que corresponden a vehículos particulares, taxis, buses, camiones y motocicletas¹⁹.

Es importante destacar que dentro del trabajo hecho está la revisión de los datos existentes en la planilla de MS Excel que contiene el modelo. Si se encuentra que los datos no responden a la realidad del país, éstos serán reemplazados por los datos disponibles en la actualización de las fuentes

¹⁹ La categoría de motocicletas no entrará en el análisis por falta de información.

consultadas por el modelo original²⁰. Las categorías usadas en esta desagregación se pueden ver en la Tabla 2.1, donde se separan las cinco categorías mencionadas anteriormente y también distinguidas entre ámbito urbano e interurbano.

Tabla 2.1. Desagregación de la información del sector transporte caminero usada en el modelo STEP 2.0. Se determinará que el porcentaje de participación de algunas de estas categorías es nula por no responder a la realidad operacional del tráfico en Chile. Fuente: (Sociedad Consultora Sistemas Sustentables Ltda., 2014).

Tipo	Modo	Ámbito	Categoría
TKM	Caminero	Urbano	Camión Liviano
TKM	Caminero	Urbano	Camión Mediano
TKM	Caminero	Urbano	Camión Pesado
PKM	Caminero	Urbano	Buses Articulados
PKM	Caminero	Urbano	Buses Interprovinciales
PKM	Caminero	Urbano	Buses Rígidos
PKM	Caminero	Urbano	Vehículos Livianos Comerciales
PKM	Caminero	Urbano	Vehículos Livianos Pasajeros
PKM	Caminero	Urbano	Vehículos Livianos Taxis
PKM	Caminero	Urbano	Motocicletas
TKM	Caminero	Interurbano	Camión Liviano
TKM	Caminero	Interurbano	Camión Mediano
TKM	Caminero	Interurbano	Camión Pesado
PKM	Caminero	Interurbano	Buses Articulados
PKM	Caminero	Interurbano	Buses Interprovinciales
PKM	Caminero	Interurbano	Buses Rígidos
PKM	Caminero	Interurbano	Vehículos Livianos Comerciales
PKM	Caminero	Interurbano	Vehículos Livianos Pasajeros
PKM	Caminero	Interurbano	Vehículos Livianos Taxis
PKM	Caminero	Interurbano	Motocicletas

Una vez conocida la participación de flota de cada categoría, se calcula el consumo de combustible y luego la demanda de pasajeros y carga según corresponda. Luego, la demanda de pasajeros es determinada como:

$$PKM_i = CC_i TO_i FdC_i \quad (7)$$

Donde CC_i es el consumo de combustible total para la categoría i en litros, FdC corresponde al factor de consumo de la categoría en km-veh/lit y TO es la tasa de ocupación de la categoría en pasajeros/veh.

²⁰ Estas fuentes son los datos económicos del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) y los anuarios de la Asociación Nacional Automotriz de Chile (ANAC).

De manera similar se determina la demanda para el transporte de carga como:

$$TKM_i = CC_i TC_i FdC_i \quad (8)$$

Aquí CC_i es el consumo de combustible para la categoría i en litros, FdC corresponde al factor de consumo de la categoría en km-veh/lt y TC es la tasa de carga de la categoría en tonelada/veh.

Los factores de consumo son determinados según los parámetros de COPERT 4 usando velocidades promedio dadas por el modelo MODAGEM (Modelo Agregado de Emisiones), así como también los niveles de actividad son de esta fuente.

Una vez determinada la demanda en base a los datos disponibles, esta es proyectada usando modelos econométricos, cuyas variables principales son el parque vehicular, el PIB nacional y el PIB per cápita. Esta estimación es parte del modelo STEP 2.0 previo. Para la demanda de cada año, se evalúa el consumo energético del transporte caminero según la siguiente ecuación:

$$CE_{carga,a,k} = \frac{TKM_{carga} Am_a T_{a,k}}{FdC_{carga,a,k} TC_{carga,a,k}} \quad (9)$$

En esta ecuación se tiene que $CE_{cam,carga,a,k}$ es el consumo energético para el modo caminero de transporte de carga, ámbito y categoría k , en unidades de energía. $TKM_{cam,carga}$ es la demanda de transporte de carga (ton-km). Am_a es el factor para desagregar la demanda por ámbito de transporte a (urbano o interurbano). $T_{a,k}$ representa el factor para desagregar la demanda por ámbito de transporte a y tipo de camión k . El término $FdC_{cam,carga,a,k}$ es el factor de consumo para el transporte de carga, ámbito a y tipo de camión k (liviano, mediano y pesado). Por último, $TC_{cam,carga,a,k}$ es la tasa de carga para este tipo de transporte, ámbito a y categoría k .

De manera similar, se obtiene el consumo energético para el transporte de pasajeros usando la siguiente ecuación:

$$CE_{pax,k,a,i} = \frac{PKM_{a,i} Pob PM_{pax,a,i}}{TO_{pax,a,i} \sum FdC_{i,a} CT_i} \quad (10)$$

En la ecuación (10) se tiene que $CE_{pax,k,a,i}$ es el consumo energético para el transporte de pasajeros, ámbito a y tipo vehicular i en unidades de energía. Por otra parte, el factor $PKM_{a,i}$ es la demanda de transporte de pasajeros, ámbito a y tipo vehicular, en pax – km. El factor $TO_{pax,a,i}$ es la tasa de ocupación de la categoría por ámbito a y tipo vehicular i . $FdC_{i,a}$ es el factor de consumo por

ámbito y tipo vehicular. El término Pob es la población. $PM_{pax,a,i}$ es la partición modal (%) para los ámbitos y tipo vehicular. Por último, CT_i es la composición tecnológica para cada tipo vehicular i .

Ya con todos los parámetros revisados y determinados anteriormente, se procederá a revisar la composición tecnológica de la flota para vehículos catalíticos y no catalíticos, y para la introducción de normas de emisión Euro para las categorías presentadas en la Tabla 2.1.

En términos resumidos, la revisión de datos se evaluará de la siguiente forma:

- **Evaluación de la participación de flota**, obteniendo los datos disponibles del INE y usando la clasificación de ANAC para las distintas tipologías de vehículos.

Las clasificaciones de vehículos se hacen como lo propone el anuario automotriz de ANAC (ver Tabla 2.2) para la desagregación del segundo nivel y así poder evaluar su participación de flota de acuerdo a los kilómetros que recorre cada tipología. Se pondera el porcentaje de participación de flota en cantidad de vehículos dados por el INE y se multiplica por la actividad anual por categoría (kilómetros recorridos al año) que viene dada desde la propuesta hecha en los modelos anteriores STEP 2.0 y MODAGEM.

Tabla 2.2. Clasificación de vehículos para desagregación de segundo nivel. Fuente: Anuario ANAC 2014/2015, INE.

Clasificación usada	Clasificación INE
Vehículos livianos de pasajeros	Automóvil y Station Wagon Todo Terreno
Vehículos livianos comerciales	Furgón Minibús Camioneta
Camiones	Camión simple Tractocamión
Taxis	Taxi básico Taxi colectivo Taxi turismo
Bus	Bus transporte colectivo Bus transporte escolar y trabajadores

- **Evaluación de la composición tecnológica** de los vehículos según motorización en base a la revisión de los datos que maneja el INE en cuanto a la cantidad de vehículos catalíticos y no catalíticos. También se revisará la introducción de normas internacionales de emisión (normas Euro) y su homologación dada en datos disponibles del 3CV.

- Una vez revisados y corregidos estos parámetros se procederá a obtener las emisiones de PM_{2.5}, CO₂ y BC, diferenciando entre tecnologías vehiculares en primer lugar y entregando el resultado distinguiendo categorías vehiculares como se plantea en los objetivos de este trabajo.

La fuente de los términos de las ecuaciones (9) y (10) son los modelos STEP 2.0 y MODAGEM para la demanda PKM (multiplicado por la población) y TKM, así como también el ámbito entre transporte urbano e interurbano y las tasas de carga u ocupación, asumiendo previa validación de estos valores.

Para determinar los términos $T_{a,k}$ y $PM_{pax,a,i}$ (participación dinámica) se hace el producto entre la actividad vehicular (tomado de MODAGEM que representa la cantidad de kilómetros que la categoría recorre en un año) y el número de vehículos en el parque de esta categoría en el año correspondiente según los datos del INE (y usando la clasificación disponible en el anuario 2014/2015 de ANAC). Para proyectar a los años donde aún no hay base de datos del parque vehicular se considerará que la proporción entre categorías se mantiene constante. Asimismo, la composición tecnológica usada es la disponible en la cantidad de vehículos catalíticos y no catalíticos del INE y la introducción de normas de emisión de estándar europeo se obtiene desde el calendario del 3CV para la Región Metropolitana según el D.S. 130/2001 del MTT (Norma de Emisión de Contaminantes para Buses Urbanos de Santiago, que tiene la introducción de normas para todas las categorías, no sólo buses). Para regiones se considera un desfase de dos años para la introducción de estas normas.

Por último, los factores de consumo se modelan usando COPERT 4, según velocidades promedio de los ciclos de manejo propuestos en MODAGEM y por consiguiente en STEP 2.0.

2.2. Determinación de las emisiones de material particulado fino para el sector transporte caminero

Las emisiones de contaminantes CO₂ y PM_{2.5} son calculadas considerando la composición tecnológica del parque y su evolución en el tiempo. Para el sector transporte caminero, las emisiones para ambos tipos de demanda (PKM y TKM) es determinada según la ecuación:

$$E_{cam,f,i,c} = \sum_j CE_{cam,f,i,j} FdC_{cam,f,i,j} CT_{cam,f,i,j} EF_{cam,f,i,j} \quad (11)$$

Para la ecuación (11) el resultado $E_{cam,f,i,c}$ es el nivel de emisiones del transporte caminero, tipo de combustible f (diésel o gasolina, aunque pueden generarse escenarios con otros tipos de combustible), tipo vehicular i (vehículo liviano de pasajeros o comerciales, bus, taxi, camión liviano, mediano o pesado) y contaminante de interés c . Por otra parte $CE_{cam,f,i,j}$ son los consumos

energéticos descritos anteriormente y desagregados para cada subíndice f, i, j , donde j es el estándar de emisión Euro I – VI. El término $FdC_{cam,f,i,j}$ es el factor de consumo para cada subíndice f, i, j . $CT_{cam,f,i,j}$ es la composición tecnológica (%) para cada subíndice f, i, j y $FE_{cam,f,i,j}$ es el factor de emisión modelado con COPERT 4 para cada subíndice f, i, j y ocupando las velocidades promedio de los ciclos de manejo propuestos en el modelo MODAGEM. Los parámetros de cada ecuación están adjuntas en el CD anexo a este trabajo de memoria. En general, se trabaja sobre aquellos parámetros que pueden ser encontrados en datos disponibles del INE y los parámetros que son medibles y determinados en otros estudios (tasas de ocupación/carga, demanda, actividad vehicular) ya que el objetivo es transformar las emisiones de PM_{2.5} a BC diferenciando tecnologías vehiculares.

Para validar el resultado obtenido se realizará una comparación con otros resultados existentes en PM_{2.5} y en CO₂. Se realizará la distinción de tecnologías vehiculares para cada tipología: convencionales o catalíticos, y normas Euro I – VI.

Los resultados serán presentados desagregando por región y por categoría vehicular para el total nacional y, luego, comparados con valores reportados por otros inventarios.

2.3. Determinación de tasas de vinculación de Carbono Negro y Material Particulado Fino en vehículos diésel y gasolina

De la información obtenida de los artículos consultados en la revisión bibliográfica, se puede decir que existe evidencia científica que hay una correlación directa entre los niveles de emisión de material particulado y Carbono Negro en la composición de los gases de escape de los motores diésel.

En la sección anterior se explicó, a grandes rasgos, cómo es que el modelo STEP2.0 desagrega la información referente al sector transporte caminero mediante la clasificación en tipologías vehiculares y motorización. Se revisa el artículo de Ntziachristos (Ntziachristos et al., 2007) y el inventario de Bond (Tami C. Bond et al., 2004), validado y desagregado para categoría vehicular en el reporte del Banco Mundial del 2014 (The World Bank, 2014).

La ecuación (11) cuantifica las emisiones en base a la actividad y al factor de emisión asociado. Para este caso, se tiene que la actividad se da en forma de pasajeros o toneladas por kilómetro recorrido (PKM o TKM). Los FE de BC son determinados usando la expresión para BC

$$EF_{BC} = EF_{PM_{2.5}}F_{BC} \quad (12)$$

Aquí, el término F_{BC} es la fracción de material particulado que es carbono negro. Este factor es distinto para cada tecnología o norma de emisión y son determinados en los distintos artículos

consultados en la revisión bibliográfica. Además, se sabe que el crecimiento constante del parque vehicular y el deterioro de los sistemas de control de emisiones —como los convertidores catalíticos y el mantenimiento de los vehículos— implican un aumento de las emisiones (Ortuzar & Tornel, 2016) y esto es considerado como un factor tal que sea igual a 1 en caso que el deterioro sea despreciable y se tenga un funcionamiento óptimo dentro del ciclo de vida del vehículo o mayor que 1 cuando el vehículo no se encuentra en las condiciones óptimas. De esta manera, el factor de corrección por deterioro en este caso será considerado como:

$$EF_{BC} = EF_{PM_{2.5}} F_{BC} FD_{PM_{2.5}} \quad (13)$$

Donde $FD_{PM_{2.5}}$ es el factor de corrección por deterioro que aumenta las emisiones del contaminante de interés en un cierto porcentaje de manera proporcional al kilometraje del vehículo. En la literatura previa a este trabajo, existen valores propuestos de factores de deterioro para el sector transporte caminero chileno que son determinados a partir de la experiencia europea (Samaras, Ntziachristos et al. 2008) y que están en el informe *Evaluación de Nuevas Medidas de Control de Emisiones para el Sector Transporte en la Región Metropolitana* ejecutado por DICTUC S.A. para CONAMA, así como también en la *Guía Metodológica para la Estimación de Emisiones Atmosféricas de Fuentes Fijas y Móviles en el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes* del año 2009 de CONAMA. Sin embargo, estas fuentes no explicitan factores de deterioro distintos para cada estándar de emisión europeo, por lo que se opta por no incorporar estos factores al modelo actual, sino que se consideran valores en una evolución lineal hasta 2 para $PM_{2.5}$ (que depende de la tecnología y tipología vehicular) a partir del criterio experto del profesor guía, pues se considera que la modelación de factores de corrección por deterioro no es sencilla y existen artículos científicos que estudian la materia. Por ello, la determinación de estos factores se considera fuera del alcance original de este trabajo que es generar antecedentes sobre la determinación de factores de emisión de BC a partir de los de $PM_{2.5}$, dejando constancia en las recomendaciones para mejorar el modelo a futuro.

Con la definición de cómo serán determinados los FE de BC a partir de los de $PM_{2.5}$, se procede a buscar en la bibliografía consultada, valores para determinar las emisiones de BC. Como la información se encuentra desagregada por tipología vehicular como en el modelo STEP, se buscan valores que correspondan a cada tipología. En el artículo de Ntziachristos revisado (Ntziachristos et al., 2007) se entregan valores que relacionan la cantidad de EC con $PM_{2.5}$ para camiones pesados y en cada una de las normas Euro. También se consultan los valores propuestos por el reporte del Banco Mundial (The World Bank, 2014), cuyos valores propuestos están basados en el estudio realizado por (Tami C. Bond et al., 2004). Los valores entregados por el Banco Mundial (2014) son denominados

como BC/PM_{2.5}. Sin embargo, en el estudio base se menciona que los valores tomados para el inventario son reportados como proporciones de EC que, como se mencionó en las secciones anteriores, está referido al comportamiento refractario de ciertas partículas de carbono; en cambio, el término BC está referido al comportamiento óptico de las partículas, asociadas a su capacidad de absorción de la radiación electromagnética. Para efectos de estimación de los niveles de emisión del sector transporte caminero, estas cantidades se considerarán homólogas, asumiendo un error asociado a este supuesto. Fuentes como (Ntziachristos et al., 2007) también reportan proporciones con respecto a OC, cuya relevancia e inclusión será discutida en el Capítulo 4.

2.4. Estimación de las emisiones de Carbono Negro para Chile

La forma en que se realizarán los cálculos de la estimación fue descrita en las secciones anteriores. La planilla del modelo STEP2.0 realiza los cálculos desagregando por tipología y motorización para cada región, estimando su nivel de emisión que luego es sumado para estimar los niveles de emisión a nivel nacional. Una vez que se tengan los resultados se hará una comparación con resultados de inventarios ya existentes (VOCA Emissions y EDGAR v4.3.1.) para evaluar diferencias entre los órdenes de magnitud y evaluar el inventario que se realiza en base a datos que responden a la realidad operacional del sistema de transporte nacional.

2.5. Realización de campaña experimental en Los Libertadores

En el marco del proyecto FONDECYT regular 1150873 “*Modelación de la dispersión de carbono negro urbano y rural en Chile central y su deposición en la criósfera andina*”, cuyo investigador responsable es el profesor Nicolás Huneeus Lagos del Departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. El objetivo principal de este estudio es examinar la dispersión del Carbono Negro emitido en áreas urbanas y rurales de la zona central de Chile e investigar el potencial transporte de este contaminante dentro de áreas urbanas y fuera de ellas, en particular a los glaciares y áreas cubiertas de nieve en la zona central de la Cordillera de Los Andes.

Dentro de todas las metodologías de medición que se emplearon en este proyecto, la más relevante para este trabajo de memoria es la que involucra la medición directa de la concentración de BC detrás de la pluma de vehículos pesados en la ruta Los Libertadores. La forma en que se realizan estas mediciones es similar a la metodología por Wang (X. Wang et al., 2012); artículo mencionado en la sección de revisión bibliográfica.

Existen dos razones principales por las cuales el estudio se realiza en Ruta Los Libertadores. La primera tiene que ver con que este camino es un lugar donde se reúnen distintos vehículos pesados

de carga que logran transportar el nivel de concentración de BC desde las ciudades a las superficies de nieve, afectando así sus propiedades ópticas. Además, la medición de la concentración de BC de manera directa desde el escape permite estudiar si existe correlación entre el país de procedencia del vehículo y la concentración de contaminante medida con base en las políticas restrictivas de normas de emisión y la calidad del combustible que se encuentra en el país.

La segunda razón tiene relación con la ventaja que representa el medir en esta zona, pues el nivel de concentración *background* de BC y otros contaminantes es prácticamente nulo si se le compara con una zona urbana donde hay una mayor densidad de vehículos por unidad de superficie. Así, puede determinarse la relación entre la concentración de PM_{2.5} y BC para el vehículo que está siendo seguido sin la influencia que otros vehículos pueden estar ocasionando en la medición.

2.5.1. Instrumentos de medición utilizados

Para llevar a cabo las mediciones se empleó una estación de monitoreo móvil sobre una van a diésel para realizar el seguimiento. Se considera que las emisiones de la misma van no influyen en las mediciones debido a que el escape está lo suficientemente lejos de la toma de muestra, considerando además la dirección de viento cuando el vehículo se encuentra en movimiento. El vehículo está equipado con un computador para monitorear en tiempo real las mediciones de BC y un inversor de corriente.

Para poder monitorear la velocidad²¹, posición y altura geográfica del vehículo a seguir se utilizan dos VAM (Vehicle Activity Monitor) para efectos de redundancia y aumentar así la confiabilidad del equipo. Una unidad VAM está equipada con sensores que miden con precisión de 1 [Hz] la posición del vehículo por satélite y variables ambientales como la presión y la temperatura ambiente.

La medición de la concentración de material particulado se hace con el equipo Aerocet-531S Mass Particle Counter/Dust Monitor de Met One Instruments. Este instrumento mide la concentración másica en 6 rangos distintos: PM₁, PM_{2.5}, PM₄, PM₇, PM₁₀ y TSP (Total de partículas en suspensión). Las mediciones realizadas con este equipo son hechas cada 1 minuto. Detalles técnicos de este equipo son encontrados en la Tabla 2.1.

Para medir la concentración de BC se utilizan dos Aethalómetros modelo microAeth AE51. El objetivo de contar con dos de estos instrumentos es aumentar la confiabilidad de equipo y poder

²¹ Si bien la velocidad de la van no es necesariamente igual a la del vehículo seguido, la diferencia entre estos valores no debiera ser significativa pues se le sigue a una distancia que es mantenida constante dentro de lo posible.

comparar los datos con una medición hecha cada 1 segundo y otra hecha cada 10 segundos. En la Tabla 1.1 se menciona que el principio de medición de este instrumento es por absorción óptica por colección en filtros. El análisis se hace mediante la tasa de cambio en la absorción de la luz transmitida debido a la colección continua de aerosol depositado en el filtro de teflón. La medición se hace a una longitud de onda de 880 nm y esta cantidad se interpreta como concentración de BC. Mayor detalle de aspectos técnicos de este instrumento se encuentra en la Tabla 2.2.

2.5.2. Metodología de medición

La toma de la muestra de los equipos de medición de PM y BC se hace usando mangueras que absorben aire desde una de las ventanas de la van. Mientras, las VAM miden la posición usando antenas GPS imantadas que se disponen en el techo del vehículo.

Tabla 2.3. Datos técnicos del contador de partículas Aerocet-531S. Fuente: data sheet del equipo.

Característica	Descripción
Principio de operación	Cuenta de manera individual las partículas mediante el uso de luz láser retrodispersada y calcula la concentración másica equivalente usando un algoritmo patentado.
Desempeño	
<ul style="list-style-type: none"> • Concentración másica <ul style="list-style-type: none"> - Rangos de concentración de masa - Sensibilidad - Límite de concentración - Tiempo de muestreo • Cuento de partículas <ul style="list-style-type: none"> - Rango de tamaños - Límite de concentración - Tiempo de muestreo - Precisión de tamaño - Sensibilidad - Tasa de flujo 	PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₄ , PM ₇ , PM ₁₀ y TSP. Alta = 0.3 μm, Baja = 0.5 μm 0 – 1,000 μg/m ³ Cada 1 minuto. Alta sensibilidad: 0.3μm, 0.5μm, 1μm, 5μm, 10μm Baja sensibilidad: 0.5μm, 1μm, 5μm, 10μm. 105,900 partículas por litro. Cada 1 minuto ±10% 0.3μm o 0.5μm (elegible) 2.83 litros por minuto
Funcionamiento eléctrico	
<ul style="list-style-type: none"> • Fuente de luz • Batería • Comunicación • Certificaciones 	Diodo láser de 90mW, 780nm 7.4V, batería de litio. 10 horas de funcionamiento continuo RS-232, USB CE e ISO 21501
Condiciones ambientales de operación	
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura • Humedad relativa 	0 a +50°C y -20 a 60°C (T° de almacenamiento) < 95%

Los vehículos pesados en ruta son seguidos a una distancia prudente y constante para poder realizar el control a la misma velocidad a la que están operando. Para poder obtener una muestra representativa de la emisión de BC que tiene el vehículo se le sigue por un periodo de tiempo mínimo de 10 a 15 minutos.

Tabla 2.4. Datos técnicos del contador de partículas microAeth AE51. Fuente: data sheet del equipo.

Característica	Desempeño
Principio de operación	Análisis en tiempo real mediante la medición de la tasa de cambio en la absorción de la luz transmitida debido a la colección continua de aerosol depositado en el filtro. La medición se hace a 880nm y esto es interpretado como concentración de BC.
Rango de medición	De 0 a 1 mg de BC por metro cúbico ²² .
Resolución de la medición	0.01 µg/m ³ de BC
Precisión de la medición	±0.1 µg BC/m ³ , 1 min avg., 150 ml/min flow rate
Tiempo de muestreo	1, 10, 30, 60, 300 segundos (elegible)
Tasa de flujo	La bomba interna proporciona un flujo elegible de 50, 100, 150 o 200 ml/min.
Condiciones ambientales de operación	De 0 a 40°C.
Funcionamiento eléctrico	
<ul style="list-style-type: none"> • Batería 	Batería de ion de litio recargable. Fuente de poder; entrada: 100 – 240 VAC 50/60 Hz 0.2 A, salida: 5VDC / 0.5 A.
<ul style="list-style-type: none"> • Vida esperada 	Mínimo de 24 horas a un muestreo de 300 segundos y un flujo de 100ml/min. Este tiempo puede variar dependiendo de la concentración de PM en el aire.

Mientras se recorre la Ruta Los Libertadores el criterio de selección del vehículo a seguir considera:

- Inspección visual preliminar de la pluma del vehículo. Se pondrá un énfasis en aquellos cuya pluma sea notoriamente visible.
- Se le dará preferencia a aquellos vehículos que van cargados por sobre los que no transportan carga.
- Se estudiará con mayor énfasis el comportamiento de la concentración cuando se siga un vehículo que va en subida ya que en esta condición el motor realiza un mayor trabajo en ruta.

²² La vida útil del filtro de teflón dependerá de la concentración en el aire y la tasa de flujo ocupada:

- 5 µg BC/m³ para 24 horas a 100 ml/min
- 100 µg BC/m³ para 3 horas a 50 ml/min
- 1 mg BC/m³ para 15 minutos @ 50 ml/min

2.5.3. Logística de la campaña

Para realizar la campaña se definieron los horarios descritos en la Tabla 2.5.

La ruta de interés está en la fotografía vía satélite de la Figura 2.1. Esta figura solamente muestra la subida curva de interés que es donde los vehículos efectuarán la máxima potencia.

Tabla 2.5. Definición de horarios de la realización de las mediciones en Los Libertadores.

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
	05/09	06/09	07/09	08/09	09/09
Horario	14:00 a 21:00	14:00 a 21:00	07:00 a 14:00	07:00 a 14:00	07:00 a 14:00

Luego, la medición se realiza desde la ciudad de Santiago hasta Los Andes, pues es relevante conocer la carga de contaminantes que se está transportando desde el territorio urbano a las provincias. La subida por esta ruta se realiza de dos a tres veces, dependiendo del tiempo disponible.



Figura 2.1. Fotografía satelital de la subida en la ruta Los Libertadores. La medición en este tramo será la más relevante para el estudio. Imagen obtenida vía Google Maps.

Por razones de optimización de tiempo, la subida no contempla el paso por aduana, sino que se llega hasta Portillo y luego se realiza la bajada para luego seguir efectuando la medición de vehículos.

2.5.4. Procesamiento de los datos de campaña

Luego de realizada la campaña, es necesario ajustar los datos de cada instrumento de medición usado de acuerdo a la hora en que realizaron las mediciones²³. Como los datos tomados tienen distinta frecuencia de muestreo, se genera una base de datos crudos de campaña en donde se almacenan los datos de fecha, hora, latitud, longitud, altura, velocidad, concentración de BC en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ cada 1 segundo, concentración de BC en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ cada 10 segundos y concentración de material particulado 2.5 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ cada 1 minuto. Para ajustar los datos se utiliza la función de MS Excel “BUSCARV” para poder tener el dato de concentración a la hora que corresponde. Una vez ajustados los datos por hora, se debe minimizar el error de ajuste en la sincronización de los datos. Para esto, se parte de la base que el muestreo de 10 segundos del Micro Aethalómetro es un valor medio de las muestras tomadas cada un segundo²⁴, por lo que se debe buscar la mayor relación en promedio de estas dos cantidades sabiendo que deberían ser iguales para un intervalo de tiempo dado, es decir, una correlación lineal del tipo:

$$BC_{10seg} = BC_{1seg} \quad (14)$$

Para ajustar el corrimiento de las columnas se usa la función “DESREF” de MS Excel para lograr un ajuste óptimo dentro de lo posible de la data colectada. Para ello se busca maximizar el coeficiente de correlación R^2 o de determinación. Luego, se realiza el ajuste de los datos de concentración de BC y $\text{PM}_{2.5}$ buscando la mejor correlación lineal y maximizando el coeficiente R^2 :

$$\overline{BC}_{1seg} = F \cdot \text{PM}_{2.5} \quad (15)$$

Para relacionar las concentraciones de BC (mediana móvil de los datos segundo a segundo) y $\text{PM}_{2.5}$ se toma un promedio móvil²⁵ de las concentraciones de BC de los últimos 60 datos para encontrar el momento en que ambos instrumentos están midiendo las mismas condiciones ambientales. El factor F de la ecuación es la pendiente de la recta, ya que se sabe que la relación de estas dos cantidades no es 1 a 1, sino que el BC es fracción del material particulado. Una vez que los datos están ajustados de la mejor manera posible, se realiza el análisis por vehículo seguido siguiendo la bitácora donde se registró la hora en que se comenzó y terminó de seguir un vehículo y la patente del camión (también se tomaron fotografías). Se considera que un tiempo prudente de seguimiento es

²³ Las horas indicadas por cada equipo no eran necesariamente iguales. Por este motivo, se ajustó una VAM y un reloj a la hora real chilena. Luego, se determinó la diferencia de hora entre la VAM ajustada y los otros equipos para ajustar a todos los equipos en la hora real.

²⁴ Por este motivo, el fabricante de los Micro Aethalómetros no recomienda realizar mediciones cada 1 segundo, debido al error de dispersión de la toma de datos en tiempo real.

²⁵ Los datos son muy dispersos entre sí, por lo que se toma la mediana de los datos para obtener un valor más representativo de la concentración de BC de la muestra, obteniéndose valores mayores de R^2 .

de 5 a 10 minutos para un vehículo. Para cada muestra, hecha cada un minuto, se creará una base de datos para todos los BC/PM_{2.5}, identificando su nacionalidad²⁶ y su condición de trabajo (subiendo o bajando).

Finalmente, con los valores de PM y BC de cada camión seguido se determinarán los valores de máximo, mínimo y valores medios de la proporción BC/PM_{2.5} con fines comparativos a los valores que son determinados en la bibliografía consultada y así poder evaluar su variabilidad en condiciones distintas de trabajo como lo propone Wang (2011). Para esto se realizarán test de hipótesis estadísticos correspondientes según sea el caso.

²⁶ Argentina, brasileña o chilena.

3. Nivel de emisión de PM_{2.5} del sector transporte caminero nacional

3.1. Verificación de los valores de entrada por emisiones de CO₂

Antes de calcular los valores de emisiones totales de material particulado fino para el sector transporte caminero nacional, se calculan las emisiones de CO₂ usando el mismo modelo STEP 2.0 con el fin de tener una base sólida de los datos de entrada que no corresponden a factores técnico – mecánicos de las emisiones de los vehículos y validar el inventario. Estos factores son la actividad vehicular, la participación de flota y el parque vehicular. Emisiones de CO₂ han sido reportadas por otros inventarios nacionales, por lo que el resultado puede compararse de manera porcentual.

Para determinar los resultados que se presentarán a continuación se realiza la primera desagregación por tipo de combustible usado por el vehículo. En segundo nivel, la desagregación por tipología de vehículo (bus, camión, VLP, VLC, taxi) con sus respectivas categorías respecto a tamaño. Finalmente se desagrega por tecnología vehicular en donde se asocia un factor de emisión.

Usando la metodología descrita en el Capítulo 2, se determina la proyección de las emisiones de CO₂ desde 1998 al año 2050. Además, existen otros inventarios que han reportado niveles de emisión de CO₂ con los cuales se calcula el cociente entre el valor reportado por los inventarios y el valor reportado por la metodología de este trabajo de memoria (indicado como CCVC) en la Tabla 3.1 para la Región Metropolitana y para el país en la Tabla 3.2 para realizar una comparación en diferencias porcentuales.

Tabla 3.1. Valores de emisión de CO₂ reportados por distintos inventarios para el año 2013 del sector transporte caminero en la Región Metropolitana.

Inventario	Nivel de emisión de CO ₂ (Gg año ⁻¹)	Cociente
CCVC	6.647	-
USACH	6.051	0.91
MMA 2014	10.046	1.51

Tabla 3.2. Valores de emisión de CO₂ reportados por distintos inventarios para el año 2013 del sector transporte caminero a nivel nacional.

Inventario	Nivel de emisión de CO ₂ (Gg año ⁻¹)	Cociente
CCVC	17.213	-
MAPS 2013	20.763	1.20
IEA 2013	22.200	1.29

Luego, el resultado obtenido puede desagregarse en función de las categorías vehiculares y por región para el año 2013 (ver Tabla 3.3 y 3.4 respectivamente).

Tabla 3.3. Emisiones de CO₂ de la Región Metropolitana para el año 2013, desagregando por categoría vehicular, en Gg año⁻¹.

Categoría	Emisión por categoría (Gg año⁻¹)
Camiones	761
Buses	178
Vehículos livianos comerciales	1,998
Vehículos livianos de pasajeros	3,145
Taxis	575
Total RM	6,657

Tabla 3.4. Emisiones de CO₂ a nivel nacional para el año 2013, desagregando por categoría vehicular, en Gg año⁻¹

Categoría	Emisión por categoría (Gg año⁻¹)
Camiones	3,115
Buses	464
Vehículos livianos comerciales	5,590
Vehículos livianos de pasajeros	6,731
Taxis	1,315
Total nacional	17,213

Tabla 3.5. Desagregación de las emisiones de CO₂ del sector transporte caminero para cada región para el año 2013 en Gg año⁻¹.

Región	Emisión por región (Gg año⁻¹)
I Región de Tarapacá	472
II Región de Antofagasta	1,135
III Región de Atacama	730
IV Región de Coquimbo	894
V Región de Valparaíso	1,611
VI Región de O'Higgins	864
VII Región del Maule	931
VIII Región del Bío – Bío	1,805
IX Región de La Araucanía	789
X Región de Los Lagos	581
XI Región de Aysén	109
XII Región de Magallanes	109
Región Metropolitana de Santiago	6,647
XIV Región de Los Ríos	284
XV Región de Arica y Parinacota	251
Total Nacional	17,213

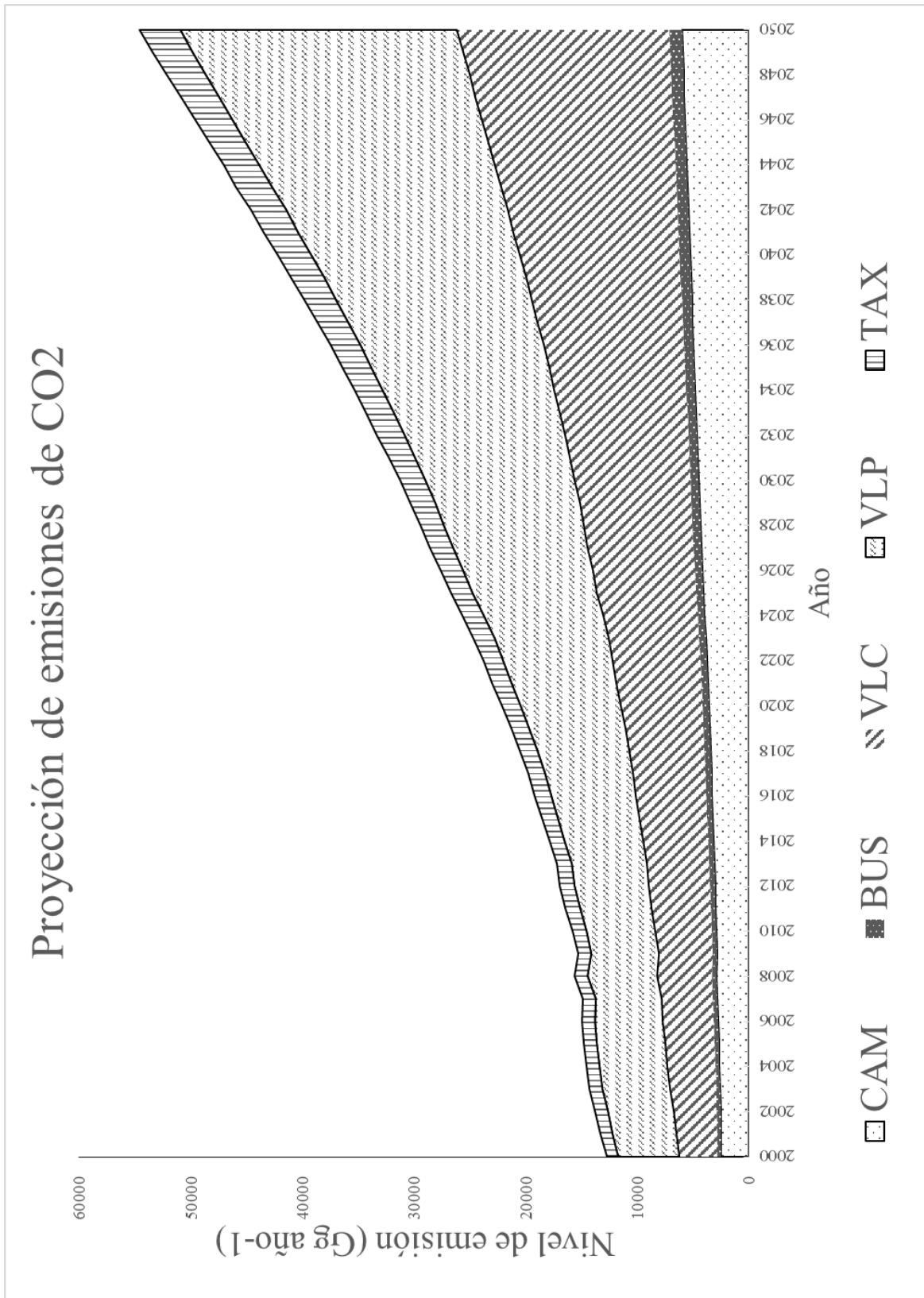


Figura 3.1. Proyección hasta el año 2050 del nivel de emisiones de CO₂ para el sector transporte caminero usando el modelo STEP 2.0.

En la Figura 3.1 se muestra la evolución de las emisiones de CO₂ para el sector transporte caminero. La proyección fue hecha desde el año 1998, pero se considera que la información para los años 1998 y 1999 se encuentra incompleta, por lo que los resultados solamente se muestran desde el año 2000. Si se quiere ver el detalle de las emisiones para estos años, se pueden consultar las planillas adjuntas a este trabajo de memoria.

Por otra parte, si se quiere verificar la actividad mediante la emisión de CO₂, se pueden graficar las razones de cambio de la actividad vehicular (veh*km) y el crecimiento de las emisiones de CO₂, tomando el 2000 como año base por las razones presentadas en el párrafo anterior. En la Figura 3.2 se puede ver que existe un desacoplamiento entre el crecimiento de la actividad y las emisiones de CO₂, lo que responde a un aumento en la eficiencia vehicular, es decir, se recorren más kilómetros por vehículo pero emitiendo una menor cantidad de gas de efecto invernadero con respecto a lo esperado si se hubiesen mantenido las tecnologías antiguas de combustión.

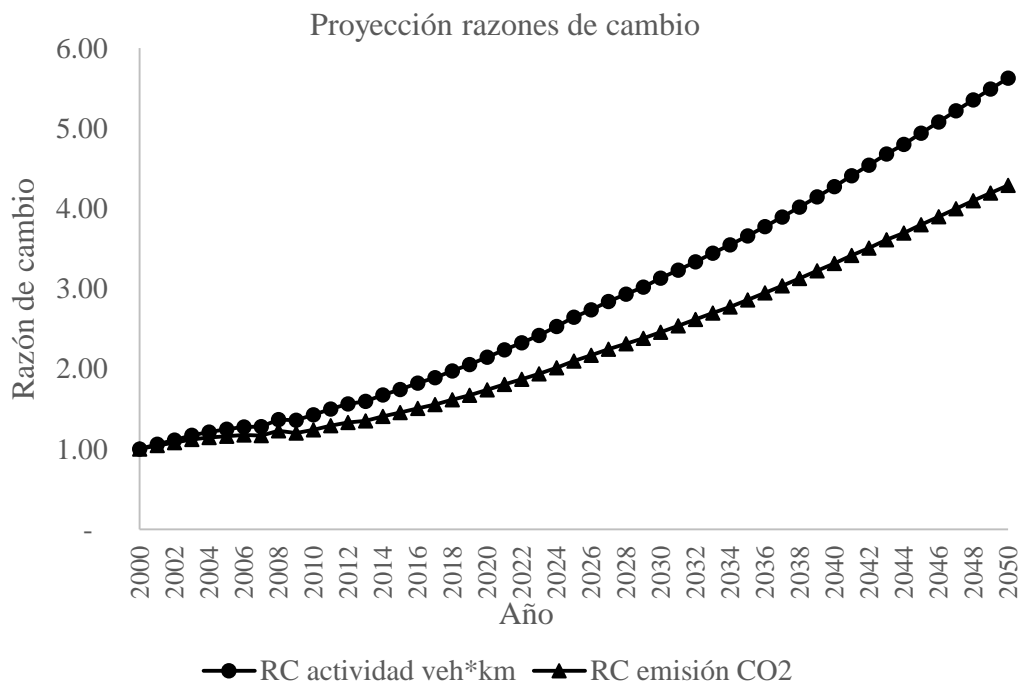


Figura 3.2. Gráfica de la proyección de las razones de cambio de la actividad (veh*km) y las emisiones de CO₂ respecto del año 2000.

En la Figura 3.2 se puede ver que se espera a que el nivel de emisiones de CO₂ se aumente en poco más de 4 veces, pero junto con ese crecimiento de emisiones se espera a que la actividad vehicular aumente en más de 5 veces si se toma como referencia el año 2000.

Como los resultados para validar los datos de entrada están dentro de lo esperado, se darán a conocer las estimaciones centrales calculadas del nivel de emisión de PM_{2.5}.

3.2. Emisiones de PM_{2.5} para el sector transporte caminero chileno

Usando todas las consideraciones y supuestos presentados en la metodología se presentarán valores de emisión totales de material particulado fino.

Para comparar con otros inventarios se tomarán los resultados de los inventarios de la Tabla 3.1 para la Región Metropolitana.

Tabla 3.6 Valores de emisión de PM_{2.5} reportados por distintos inventarios para el año 2013 del sector transporte caminero en la Región Metropolitana. Los valores a comparar se encuentran disponibles en las bases del anteproyecto PPDA.

Inventario	Nivel de emisión de PM _{2.5} (ton año ⁻¹)	Cociente
CCVC	878	-
USACH	960	1.09
MMA 2014	1,215	1.38

Las emisiones para el 2013 por categoría vehicular y por región se muestran en las tablas 3.7 y 3.8 respectivamente.

Tabla 3.7. Valores de emisión de PM_{2.5} reportados por distintos inventarios para el año 2013 del sector transporte caminero en la Región Metropolitana.

Categoría	Emisión por categoría (ton año ⁻¹)
Camiones	438
Buses	143
Vehículos livianos comerciales	167
Vehículos livianos de pasajeros	123
Taxis	6
Total RM	877

Tabla 3.8. Valores de emisión de PM_{2.5} reportados por distintos inventarios para el año 2013 del sector transporte caminero a nivel nacional.

Categoría	Emisión por categoría (ton año ⁻¹)
Camiones	1,795
Buses	394
Vehículos livianos comerciales	540
Vehículos livianos de pasajeros	371
Taxis	16
Total nacional	3,116

Tabla 3.9. Valores de emisión de PM_{2.5} reportados por distintos inventarios para el año 2013 del sector transporte caminero a nivel nacional.

Región	Emisión por región (ton año ⁻¹)
I Región de Tarapacá	70
II Región de Antofagasta	249
III Región de Atacama	197
IV Región de Coquimbo	160
V Región de Valparaíso	248
VI Región de O'Higgins	169
VII Región del Maule	217
VIII Región del Bío – Bío	418
IX Región de La Araucanía	167
X Región de Los Lagos	161
XI Región de Aysén	33
XII Región de Magallanes	27
Región Metropolitana de Santiago	878
XIV Región de Los Ríos	86
XV Región de Arica y Parinacota	35

De manera análoga, se presenta, en la Figura 3.3, la proyección de emisiones de material particulado fino. Por las mismas razones que no se mostraron las emisiones para los años 1998 y 1999, el gráfico de la proyección se muestra desde el año 2000, desagregando por categoría vehicular. Además, para evaluar la evolución de las emisiones para compararlas con la actividad vehicular se puede graficar la razón de cambio de las emisiones y de la actividad vehicular.

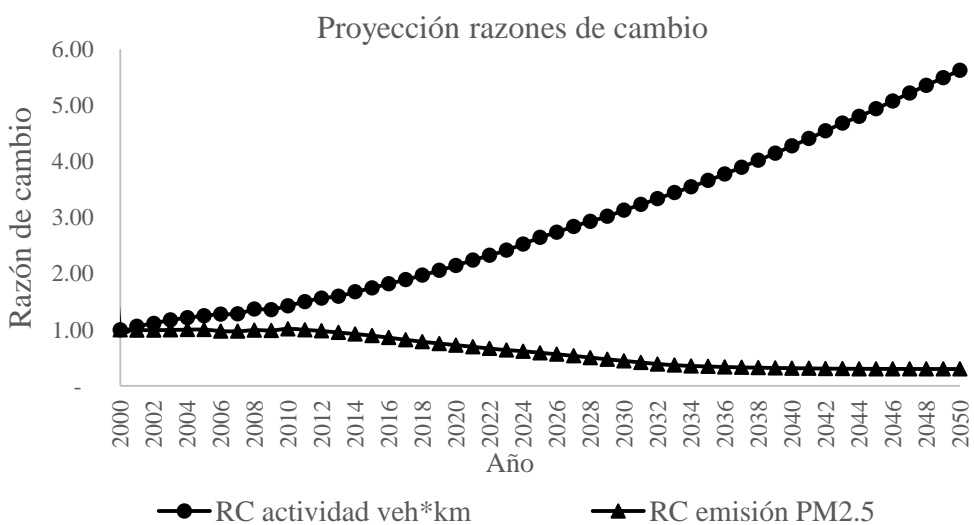


Figura 3.3. Gráfica de la proyección de las razones de cambio de la actividad (veh*km) y las emisiones de PM_{2.5} respecto del año 2000.

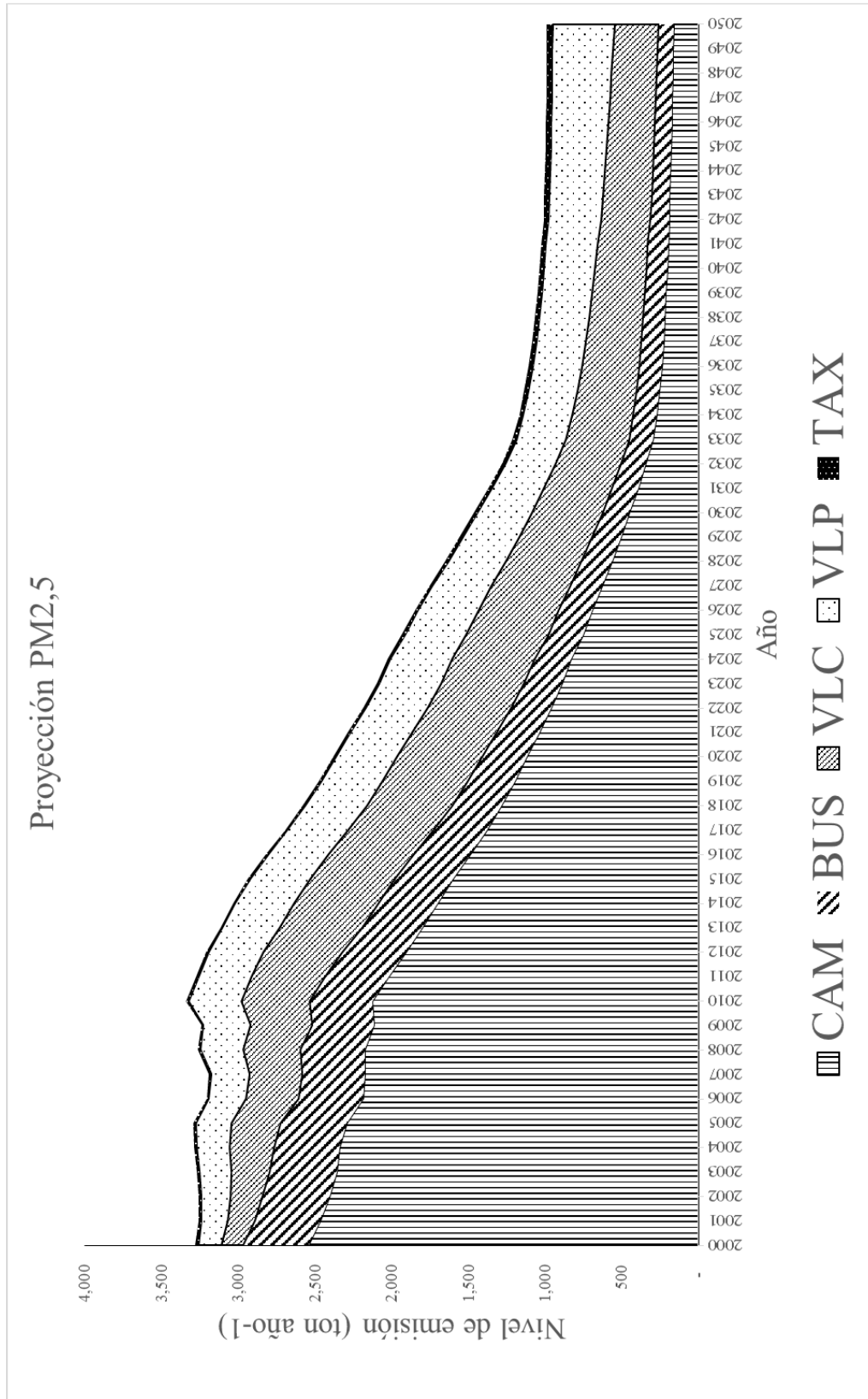


Figura 3.4. Proyección hasta el año 2050 del nivel de emisiones de PM_{2.5} para el sector transporte caminero usando el modelo STEP 2.0.

Se observa en la Figura 3.3 que a diferencia de las emisiones de CO₂, las emisiones de material particulado fino llegan a ser menores que el nivel de emisión del año base de referencia que es el año 2000. Se espera a que las emisiones de PM_{2.5} disminuyan a un poco más del 20% del nivel de emisión del año base.

3.3. Observaciones y discusión de los resultados obtenidos

- Aunque sólo existen valores de emisiones totales de PM_{2.5} para la Región Metropolitana en otros reportes, sí se puede observar que estas estimaciones están por debajo de los inventarios existentes hasta en un 38%, a diferencia de las emisiones de CO₂ que se están sobrestimando en alrededor de un 50% con respecto al reporte del MMA y un 10% estimadas por debajo del valor del reporte del inventario USACH. Esto es esperable debido a que lo que se presenta en este trabajo de memoria son estimaciones centrales y cuentan con un rango de incertidumbre²⁷ sujeto a los sesgos de algunas consideraciones asumidas para el modelo.
- Con respecto a los sesgos mencionados en el párrafo anterior, se han publicado estudios como lo propone Vilches y otros (Vilches, Ivelic, & Ferreira, 1991) en donde se plantea que la variable Tasa de Ocupación no es una variable estática con el tiempo como se ha propuesto en el modelo STEP 2.0. Existen ciertos aspectos que influyen en la determinación de este parámetro y su variabilidad como lo es la frecuencia con que se mide la variable en terreno o los sesgos inducidos por los observadores, ya que medir la cantidad de pasajeros en un bus puede estar sujeto a la experticia del observador. Si este parámetro tiene variabilidad, aportará incertidumbre al resultado final y aumentando el rango de incertidumbre de la estimación central final. Otro de los parámetros que se ha estimado constante es la participación de flota, tomando como base el año 2013 (bajo las condiciones del proyecto CCVC) pues se parte de la base que el crecimiento del parque vehicular siempre será en la misma proporción con respecto a las categorías vehiculares dadas por la clasificación del INE, considerando que las diferencias entre categorías año a año no afectará al resultado en mayor medida. Se espera a que otras variables, como la Tasa de Carga, también presenten sesgos (asumidos por el modelo). Además, como se mencionó en el Marco Teórico, otra fuente de incertidumbre es el uso de los factores de emisión que podrían no representar la operación real de los vehículos en ruta.
- El porcentaje de emisiones de particulado en vehículos diésel es mayor que el de vehículos a gasolina a diferencia del CO₂. Esto se puede deber a la mejor calidad de la combustión en este último tipo de motor. Si se considera que las categorías bus, camión y VLC son totalmente de motorización diésel y las categorías de VLP y Taxi son totalmente a gasolina, las emisiones de

²⁷ No calculado en este trabajo de memoria.

PM_{2.5} a nivel nacional de diésel representan alrededor de un 88% de las emisiones totales del transporte caminero. Sin embargo, esta diferencia de proporciones se atenúa en la proyección al 2050, donde los vehículos diésel representarán un 68% de las emisiones totales de particulado para el año 2013. Esto se explica con la introducción de normas de estándar europeo más exigentes con las emisiones de PM_{2.5} y el aumento de los vehículos particulares (VLP) en la proyección del parque. Este comportamiento también se refleja en la tendencia mostrada en el gráfico de la Figura 3.2, donde las emisiones de CO₂ no tienden a una disminución (sí se atenúa la razón de cambio año a año), pero sí se vuelven más eficientes con respecto al aumento de la actividad vehicular. Referido a lo anterior se pueden construir gráficos de torta para visualizar las proporciones de las emisiones de CO₂ y PM_{2.5} entre categorías para el año base 2013 a partir de los datos de la Tabla 3.4.

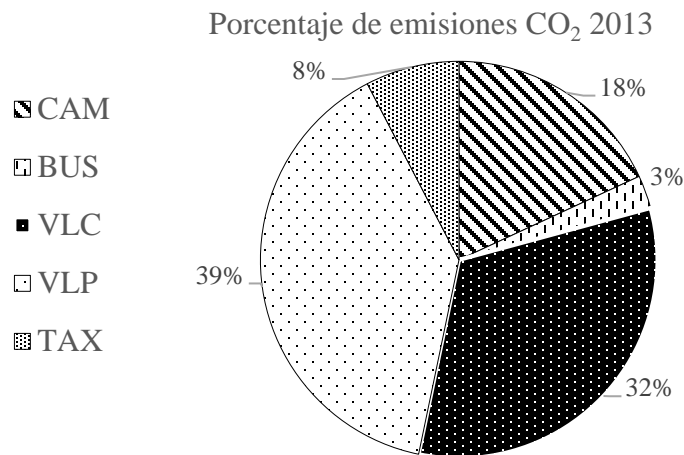


Figura 3.5. Porcentaje de distribución entre categorías para las emisiones nacionales de CO₂ en el año 2013.

Porcentajes de emisiones PM_{2.5} 2013

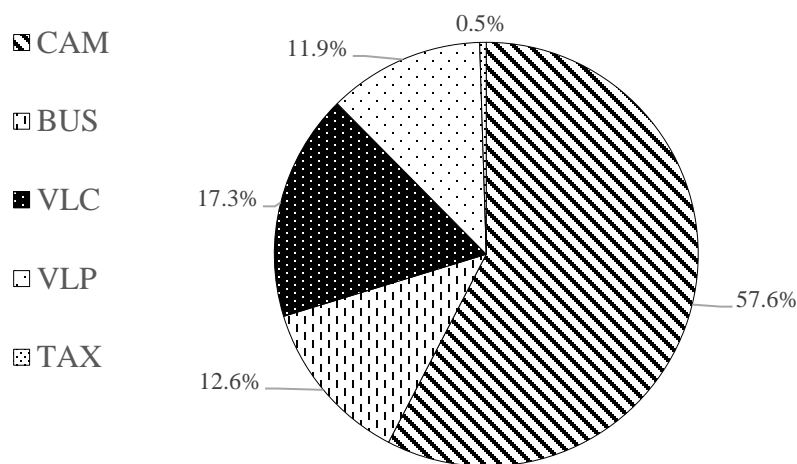


Figura 3.6. Porcentaje de distribución entre categorías para las emisiones nacionales de PM_{2.5} en el año 2013.

Observar que los camiones aportan la mayor cantidad de la emisión de particulado a nivel nacional dentro de los primeros años de la proyección, por lo que podría ser un buen punto de partida para la regulación según lo discutido en la Sección 1.1. Para el año 2013, las emisiones totales de PM_{2.5} de los camiones representar un 58% de las emisiones totales.

También puede realizarse el mismo análisis para la proyección en el año 2050. La Figura 3.7 y 3.8 muestran el gráfico de la repartición de las emisiones de CO₂ y PM_{2.5} respectivamente.

Porcentajes de emisiones CO₂ 2050

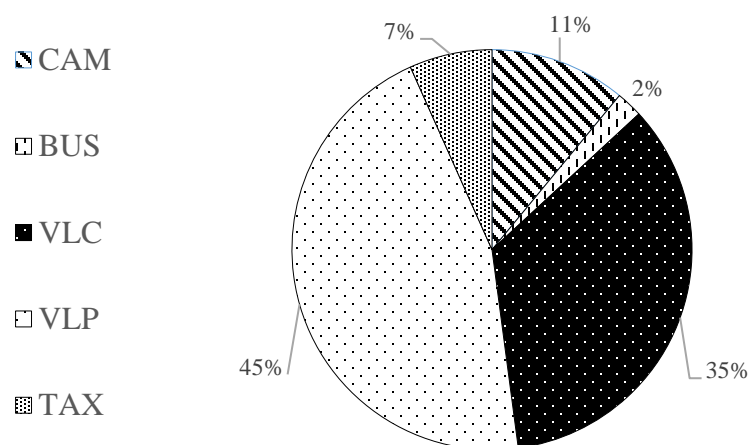


Figura 3.7. Porcentaje de distribución entre categorías para las emisiones nacionales de PM_{2.5} en el año 2050.

Porcentajes de emisiones PM_{2.5} 2050

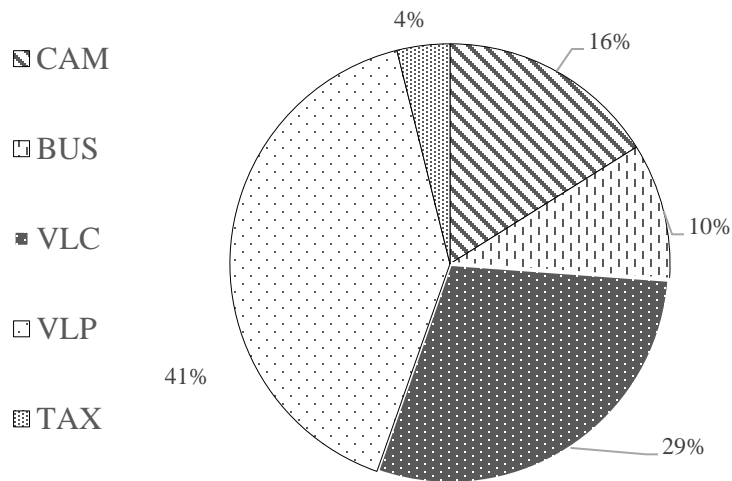


Figura 3.8 Porcentaje de distribución entre categorías para las emisiones nacionales de PM_{2.5} en el año 2050.

Dentro del escenario proyectado se espera a que la participación de cada categoría vehicular no cambie dentro de los órdenes de magnitud a partir del año base. Por el contrario se espera a que la participación de los vehículos diésel pesados disminuya en la emisión de material particulado fino con la introducción de normas Euro VI que cuentan con remoción física de hollín en el escape. Por otra parte, la participación de los vehículos de gasolina aumenta debido a la disminución que experimentan los vehículos diésel y debido al crecimiento del parque vehicular de los particulares. Más detalle de las emisiones de material particulado (y BC) se discutirá en el Capítulo 5.

3.4. Conclusiones del capítulo

A partir de los contenidos presentados en este capítulo se puede concluir que el nivel de emisión de material particulado fino para el sector transporte caminero chileno es de 3,116 toneladas para el año 2013; año base del proyecto CCVC. Junto con esto se puede concluir que estas emisiones tenderán a disminuir a un total de 985 toneladas al año 2050 en el escenario esperado con base a la validación que se tiene por emisiones de CO₂ y con respecto a la actividad vehicular puesto que las emisiones no tienden a una disminución, pero crecen a una tasa menor que la actividad vehicular nacional por la introducción de tecnologías más eficientes de emisión. Además de la verificación por CO₂, se pueden reportar los valores mencionados anteriormente a modo de conclusión ya que también hay un respaldo en la proporción por categoría vehicular de las emisiones, pues se tiene que los vehículos a gasolina (principalmente VLC y taxis) aportan una mayor cantidad de CO₂ que las otras categorías que son principalmente diésel, situación que se vuelve inversa cuando se trata de material

particulado donde las emisiones de $PM_{2.5}$ son debido a la actividad de camiones a nivel nacional. Por esto, la metodología del modelo STEP2.0 puede considerarse como válida para estimar las emisiones del transporte en ruta de Chile previa revisión de los parámetros de entrada y aceptación de los sesgos inherentes al modelo.

4. Tasas de vinculación de las emisiones de Carbono Negro y Material Particulado Fino

4.1. Consideraciones preliminares del capítulo

En este capítulo se presentará el resultado principal de la revisión bibliográfica, en donde se obtienen valores que relacionan la cantidad de material particulado fino con el carbono negro emitido por fuentes móviles, distinguiendo entre tipologías y tecnologías vehiculares como fue presentado en el capítulo de metodología. También se hará la presentación de los resultados obtenidos en la campaña experimental de Los Andes, donde se evaluará la manera en que se cumple la relación BC/PM_{2.5} para los camiones que fueron controlados en el seguimiento.

En el capítulo anterior se obtuvieron las emisiones de material particulado para el país diferenciando por región y categoría vehicular. Para transformar estas emisiones se modifica cada factor de emisión de PM_{2.5} obtenido de la modelación de FE COPERT 4. Para escoger los valores de proporción es necesario tener en cuenta lo siguiente:

- Bond (Tami C. Bond et al., 2004), Ntziachristos (Ntziachristos et al., 2007) y Chow (Chow, Watson, Lowenthal, Chen, & Motallebi, 2010) proponen tratar las cantidades de EC y BC como equivalentes asumiendo un sesgo en la estimación final del resultado, ya que la primera especie nombrada está referida al comportamiento refractario o térmico del aerosol y la segunda especie al comportamiento óptico o de absorción de luz de la muestra. Por tanto, las proporciones que se presentan como resultado corresponden a EC/PM_{2.5} en algunos casos.
- Para los valores de proporción dados se asumen estándares de composición de combustible similares a Europa en cuanto al contenido de azufre (menor a 50 ppm).
- En la ecuación (4) presentada en el Capítulo 1 se tiene que el factor de emisión está multiplicado por el recíproco de la eficiencia de remoción del contaminante. También se ha discutido que las tecnologías de tratamiento de los gases de escape pueden reducir de manera considerable las emisiones, como es el caso del DPF. Este efecto atenuador está caracterizado en cada uno de los factores que se entregarán en este capítulo.
- Tal y como en el capítulo anterior, uno de los sesgos asumidos es la condición de conducción uniforme de los vehículos en los ciclos manejo, pues es conocido que la emisión de BC es mayor cuando el motor es solicitado, además que los valores dados están dados en condiciones de laboratorio.

Hechas estas suposiciones, se pueden asumir los siguientes valores para transformar las emisiones básicas de PM_{2.5} a BC.

4.2. Factores de conversión por tipología vehicular

Cada una de las siguientes secciones presenta las tasas de vinculación encontradas en la revisión bibliográfica y estimadas convenientes para ser incorporadas al modelo STEP 2.0. Se separará por tipología vehicular para lograr mayor orden en la presentación de resultados.

4.2.1. Factores de conversión para buses

Dentro de esta categoría se tienen buses articulados, rígidos (mayores y menores a 12 metros) e interurbanos. Ntziachristos (Ntziachristos et al., 2007) propone un rango de incertidumbre para cada norma de emisión. Por ejemplo, si se presenta un valor de proporción del 50% con un rango de incertidumbre del 20%, se entenderá que la proporción BC/PM_{2.5} está en un intervalo del 40% al 60%. Para efectos de este trabajo de memoria, se generaliza la clasificación de camión pesado diésel (HDV) para buses, asumiendo este sesgo para el modelo.

Tabla 4.1. Tasas de vinculación de PM_{2.5} a BC utilizada en FE de buses para el modelo. Fuente (Ntziachristos et al., 2007).

Estándar de emisión europeo	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

4.2.2. Factores de conversión para camiones

Para tratar a esta tipología vehicular se separará por tamaño liviano, mediano y pesado para dar un orden a la presentación de resultados.

4.2.2.1. Tasas de vinculación para camiones livianos

Las tasas de vinculación son propuestas en su mayoría por Ntziachristos (Ntziachristos et al., 2007). Sin embargo, para algunas normas de emisión europeas, la fuente se encuentra incompleta, por lo que se recurre a otros inventarios para completar los valores buscados. La clasificación de la fuente corresponde a camiones livianos a diésel (LDT) para cada estándar europeo.

Tabla 4.2. Tasas de vinculación de PM2.5 a BC utilizada para FE de camiones livianos para el modelo. Fuente (Ntziachristos et al., 2007).

Estándar de emisión europeo	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 ²⁸	n.e. ²⁹

4.2.2.2. Tasas de vinculación para camiones medianos

Bond (Tami C. Bond et al., 2004) propone utilizar los factores de la Tabla 4.3 para camiones medianos. Ntziachristos no propone valores para cada norma europea para esta categoría de camiones.

Tabla 4.3. Tasas de vinculación de PM2.5 a BC utilizada para camiones medianos para el modelo. Fuente: (Tami C. Bond et al., 2004).

Estándar de emisión europeo	BC/PM _{2.5} (%)	Rango de incertidumbre (%)
Convencional	47	n.e.
Euro I	70	n.e.
Euro II	81	n.e.
Euro III	72	n.e.
Euro IV	69	n.e.
Euro V	23	n.e.
Euro VI	25	n.e.

A diferencia de los valores de proporción propuestos en el artículo de Ntziachristos, las incertidumbres quedan explicadas por el método de muestreo en que son obtenidos los factores de emisión. Se especifica que las tasas de BC se distribuyen siguiendo una tendencia tal que una distribución log – normal es la más adecuada para el estudio de los factores de emisión y poder realizar su ajuste. La incertidumbre vendrá dada en la estimación de los parámetros de tendencia central de acuerdo a esta distribución. Luego, la incertidumbre de estos valores no es presentada de manera explícita en el artículo.

²⁸ Este valor es tomado del inventario de BC de California (Chow et al., 2010).

²⁹ No especificado.

4.2.2.3. Tasas de vinculación para camiones pesados

Tabla 4.4. Tasas de vinculación de PM2.5 a BC utilizada para FE de camiones livianos para el modelo. Fuente (Ntziachristos et al., 2007).

Estándar de emisión europeo	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

Observar que los valores presentados en la Tabla 4.4 son idénticos a las tasas de conversión para buses, pues se ocupa la categoría HDV para camiones.

4.2.3. Factores de conversión para vehículos livianos de pasajeros/comerciales diésel

Los vehículos livianos de pasajeros y comerciales son considerados equivalentes en los inventarios consultados. Si se considera la clasificación presentada en el capítulo de metodología dada por el anuario ANAC, este supuesto no debiera ser significativo como sesgo para el resultado final, ya que se está usando un factor de emisión definido para la categoría específica dado por COPERT 4. La principal diferencia radica en la motorización del vehículo.

Tabla 4.5. Tasas de vinculación de PM2.5 a BC utilizada para FE de vehículos livianos (comerciales y pasajeros) diésel para el modelo. Fuente: (Tami C. Bond et al., 2004).

Estándar de emisión europeo	BC/PM _{2.5} (%)	Rango de incertidumbre (%)
Convencional	47	n.e.
Euro I	70	n.e.
Euro II	80	n.e.
Euro III	72	n.e.
Euro IV	69	n.e.
Euro V	25	n.e.
Euro VI	25	n.e.

4.2.4. Factores de conversión para vehículos livianos de pasajeros/comerciales y taxis a gasolina

A diferencia de los buses y camiones, se debe desagregar la categoría de vehículo liviano por el tipo de motorización o combustible que ocupa. Para los vehículos a gasolina se pueden encontrar tasas de vinculación en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Tasas de vinculación de PM_{2.5} a BC utilizada para FE de vehículos livianos (comerciales y pasajeros) a gasolina para el modelo. Fuente: (Ntziachristos et al., 2007). Los valores con incertidumbre no especificada son propuestos por Bond (Tami C. Bond et al., 2004).

Estándar de emisión europeo	BC/PM _{2.5} (%)	Rango de incertidumbre (%)
No catalítico	30	30
Euro I	25	25
Euro II	17	n.e.
Euro III	25	25.
Euro IV	15	15.
Euro V	17	n.e.
Euro VI	17	n.e.

Observar que estos valores son considerablemente menores a las categorías presentadas anteriormente debido al tipo de motorización de los vehículos. Esto es coherente con lo investigado, pues se plantea que el nivel de material particulado y BC emitido por los motores a gasolina es menor al emitido por los motores diésel debido a la diferencia de calidad en la combustión de ambos motores.

Los vehículos usados como taxis se consideran como vehículos livianos de pasajeros a gasolina, ya que se está asumiendo que no circulan taxis diésel en el país.

Las tablas presentadas anteriormente constituyen la propuesta de conversión desagregada de las emisiones máxicas de PM_{2.5} a BC. Luego, estas proporciones son multiplicadas por cada FE quedando en unidades de gramos por kilómetro recorrido [g/km].

4.3. Factores de emisión de BC diferenciando tecnologías vehiculares

Por consiguiente, los factores de emisión que son incorporados al modelo son lo que se muestran en las Tablas 4.7, distinguiendo entre categorías vehiculares, sus tipologías y su tecnología o estándar de emisión. Para el modelo COPERT IV y para completar todas las categorías con su respectiva norma de emisión se presentan valores que no necesariamente existen en la caracterización de la flota del transporte caminero chileno, como lo es por ejemplo el bus articulado Euro I.

Tabla 4.7. Factores de emisión de BC para las tipologías de la categoría “Buses” del modelo en gramos de BC por kilómetro recorrido.

Tipología vehicular	Estándar o tecnología de emisión						
	Convencional	Euro I	Euro II	Euro III	Euro IV	Euro V	Euro VI
	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
Articulado	0.6145	0.4039	0.2016	0.1804	0.0445	0.0445	0.0004
Rígido	0.5010	0.3309	0.1521	0.1532	0.0388	0.00388	0.0004
Interprovincial	0.1946	0.1968	0.0908	0.1044	0.0209	0.0209	0.0002

Tabla 4.8. Factores de emisión de BC para las tipologías de la categoría “Camiones” del modelo en gramos de BC por kilómetro recorrido.

Tipología	Estándar o tecnología de emisión						
	Convencional	Euro I	Euro II	Euro III	Euro IV	Euro V	Euro VI
vehicular	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
Liviano	0.2904	0.1030	0.0478	0.0575	0.0113	0.0013	0.0002
Mediano	0.2006	0.1792	0.0882	0.0801	0.0151	0.0050	0.0003
Pesado	0.3087	0.3045	0.1274	0.1448	0.0288	0.0228	0.0019

Tabla 4.9. Factores de emisión de BC para las tipologías de la categoría “Vehículos Livianos (diésel)” del modelo en gramos de BC por kilómetro recorrido.

Tipología	Estándar o tecnología de emisión						
	Convencional	Euro I	Euro II	Euro III	Euro IV	Euro V	Euro VI
vehicular	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
Comercial	0.1193	0.0549	n.a. ³⁰	0.0378	0.0189	0.0004	0.0004
Pasajeros	0.1033	0.0405	n.a.	0.0210	0.0198	0.0004	0.0004

Tabla 4.10. Factores de emisión de BC para las tipologías de la categoría “Vehículos Livianos (gasolina)” del modelo en gramos de BC por kilómetro recorrido.

Tipología	Estándar o tecnología de emisión						
	No catalítico	Euro I	Euro II	Euro III	Euro IV	Euro V	Euro VI
vehicular	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
Comercial	0.0009	0.0009	n.a.	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
Pasajeros	0.0009	0.0007	n.a.	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
Taxis	0.0009	0.0009	n.a.	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002

³⁰ No aplica para COPERT 4

4.4. Resultados de la campaña experimental de Los Libertadores

Los resultados de la campaña experimental pueden ser utilizados para analizar la concentración de BC en función de variables dinámicas, así como también estudiar la relación entre la concentración de BC y $PM_{2.5}$ al momento de iniciar el seguimiento y control de un vehículo pesado en la carretera camino a Los Andes. Se evaluará la relación BC/ $PM_{2.5}$ de la concentración en el aire para cada camión seguido y su variabilidad para estudiar cómo se comporta en distintas condiciones de trabajo del motor y averiguar si la nacionalidad del vehículo es relevante para este valor. Para esto, el porcentaje de carbono negro en la muestra será trabajado como variable aleatoria.

4.4.1. Proporción entre BC y $PM_{2.5}$ en la emisión de camiones pesados en ruta

Antes de comenzar a presentar resultados, analizar y concluir a partir de los datos obtenidos, debe considerarse que existen valores atípicos que no son de interés de estudio. Estos valores son tales que BC/ $PM_{2.5}$ es mayor a 1 (o 100%). Una vez descartados estos valores se pueden presentar los valores de concentración y su variabilidad.

Tabla 4.11. Tabla de contingencia de los camiones seguidos en la campaña. Total de camiones seguidos: **71**.

Condición	Nacionalidad		
	Argentina	Brasil	Chile
Subiendo	10	5	28
Bajando	11	3	14

El resumen de los camiones controlados en la campaña se ven en la Tabla 4.11, donde se clasifica por condición de manejo en la cordillera y nacionalidad del vehículo.

Por otra parte, se puede realizar una tabla (Tabla 4.12) de contingencia con la misma información de la Tabla 4.11 pero para los datos obtenidos, caracterizando el espacio muestral.

Tabla 4.12. Total de datos clasificados válidos para los fines de este estudio. Total de datos: **449**.

Condición	Nacionalidad		
	Argentina	Brasil	Chile
Subiendo	155	10	186
Bajando	30	15	53
Total válidos	185	25	239

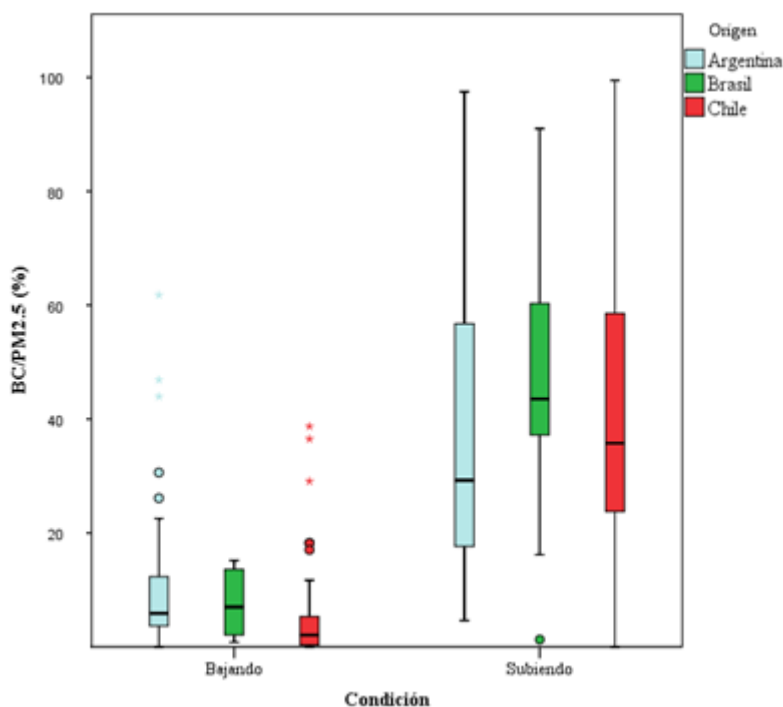


Figura 4.1. Diagramas de caja y bigotes de los valores de concentración de BC con respecto a la concentración de material particulado fino, distinguiendo entre nacionalidad y condición de operación.

Para estudiar la tendencia de los valores de concentración BC/PM2.5 se puede observar la distribución de los datos clasificando por nacionalidad y condición de operación.

El detalle de los valores que se ven en los diagramas de caja y bigotes de la Figura 4.1 se puede ver en la Tabla 4.13, donde se muestran por la clasificación escogida además de las medidas de tendencia central de los datos.

Tabla 4.13. Medidas de tendencia central de los datos válidos medidos en la campaña experimental, distinguiendo condición de operación y nacionalidad de la patente.

	Subiendo			Bajando		
	Argentina	Brasil	Chile	Argentina	Brasil	Chile
Mínimo	4.61%	1.28%	0.00%	0.00%	0.81%	0.00%
Máximo	97.49%	91.02%	99.47%	61.78%	15.16%	15.16%
Percentil 25	17.55%	31.93%	23.76%	3.34%	2.00%	2.00%
Percentil 75	56.86%	65.74%	58.79%	14.14%	13.62%	13.62%
Mediana	29.26%	43.53%	35.77%	5.87%	7.00%	7.00%
Media	37.98%	46.57%	42.91%	12.22%	7.55%	7.55%
Desviación estándar	25.12%	27.10%	25.47%	15.39%	5.56%	5.56%
Coefficiente de variación	66.14%	58.18%	59.36%	126.02%	73.62%	73.62%

De la información obtenida de estos datos, se puede observar que existe diferencia evidente en la relación BC/PM_{2.5} entre los camiones que fueron medidos subiendo y bajando la cordillera. Para respaldar esta diferencia se realiza un test de hipótesis para comparar las medias de los valores medidos en las dos condiciones. Para los seis grupos de datos (combinaciones entre condiciones y nacionalidades de la Tabla 4.12 donde se muestran los tamaños de muestra para cada grupo), se realiza un test de hipótesis para evaluar la normalidad de los datos y determinar si se usarán pruebas paramétricas o no – paramétricas.

Tabla 4.14. Resultados de la prueba de normalidad para cada grupo de datos. La prueba estadística depende del tamaño de la muestra, K – S para tamaños de muestra mayores que 50 y S – W para menos de tal cantidad. Ambas pruebas se hacen con una confianza del 95%.

Condición	Nacionalidad	Prueba estadística de normalidad	Valor de significancia
Subiendo	Argentina	Kolmogorov – Smirnov	0.000
	Brasil	Shapiro – Wilk	0.859
	Chile	Kolmogorov – Smirnov	0.000
Bajando	Argentina	Shapiro – Wilk	0.000
	Brasil	Shapiro – Wilk	0.022
	Chile	Kolmogorov – Smirnov	0.000

Observar que sólo en el caso de la condición de subida y nacionalidad brasileña del vehículo, los datos siguen una distribución normal. Sin embargo, por condiciones del experimento y distribución de los otros grupos, se considerará que este hecho no es relevante y se aplicarán pruebas no – paramétricas de comparación de medias (medianas). Por tanto, se tiene evidencia estadística que los datos no siguen una distribución normal.

Para estudiar la diferencia de las concentraciones de carbono negro con respecto al material particulado fino en diferencia de condiciones se realiza una prueba U de Mann – Whitney de los dos grupos (subiendo y bajando) considerando que son grupos de datos independientes. Considerando significancia asintótica para este caso, se tiene que el valor p es igual a 0.000, por lo que se rechaza la hipótesis nula y por tanto que no existe evidencia estadística para considerar que el comportamiento de los datos no es el mismo entre grupos, es decir, que no provienen del mismo grupo. Se puede decir con certeza que la concentración de BC en el material particulado medida es menor en condiciones de trabajo distintas del motor.

Por otra parte, si se quiere evaluar la diferencia significativa entre las distintas nacionalidades de las patentes para las dos condiciones de trabajo dadas, se puede realizar una prueba de Kruskal – Wallis. El objetivo es determinar si, en efecto, en subida o bajada, la nacionalidad del camión seguido

fue relevante al momento de comparar los valores de BC/PM2.5 en la concentración del aire, considerando que los grupos son independientes entre sí.

Considerando un nivel de significancia asintótico, para los tres grupos de nacionalidades de camiones en condición de subida, se tiene que el valor p es de $0.003 < 0.05$, por lo que no existe evidencia estadística para decir que existe diferencia entre los niveles de concentración de BC respecto a PM2.5, distinguiendo entre nacionalidades, medidos en la campaña. Por otra parte, para la condición de bajada, el valor p es de $0.06 > 0.05$, por lo que existiría una diferencia relevante en la concentración de BC, distinguiendo entre nacionalidades.

Las observaciones y la discusión de los valores obtenidos se realizarán en la siguiente sección. Si se quiere consultar más en detalle los resultados de las pruebas estadísticas se pueden revisar los archivos anexos en el CD de este trabajo de memoria, donde también está la base de datos trabajada.

4.4.2. Observaciones y discusión de los resultados obtenidos en campaña

De los resultados obtenidos en la campaña experimental se puede observar y concluir que:

- La alta variabilidad de los valores de concentración medidos (ver Figura 4.1 y Tabla 4.13) se puede atribuir a las condiciones del experimento, ya que se cuenta con la interferencia de otros vehículos en la medición, las condiciones de manejo de los camiones o el efecto del viento sobre la muestra. A pesar de esto, se presentan valores de concentración dentro de lo esperado.
- Los resultados de la campaña no escapan de lo esperado dentro de los valores dados en las tablas de vehículos pesados diésel, aunque hay que considerar la diferencia de métodos, pues en los valores de proporción o factores de conversión, se proponen valores sobre la emisión y no sobre la concentración como se hizo en la campaña experimental. Si bien los valores de concentración medidos no son equivalentes a los presentados en la Tabla 4.4 para camiones pesados, se tiene que la mediana e incluso el valor del percentil 75 están por debajo de los estándares de BC (que es alrededor del 75%) dados. Esto es razonable, ya que las condiciones del experimento cuenta con incertidumbres de distinta índole, donde se puede mencionar que se está midiendo concentración y no emisión desde el tubo de escape de manera directa. Los valores de BC/PM2.5 que están dentro del percentil 25 para todas las nacionalidades podrían explicarse debido a que en el trayecto de seguimiento a algunos camiones hubo detenciones o simplemente se les estaba haciendo el seguimiento a una distancia mayor de la prudente, disminuyendo la concentración de BC percibida por el instrumento de medición.
- La existencia de valores perdidos del sistema (mayores al 100% o menores a cero) se puede atribuir a errores de instrumento, ya que el fabricante no recomienda un muestreo de datos cada

1 segundo. También se puede deber a problemas de ajuste, ya que los equipos midieron valores extremos cuando se cruzaron túneles.

- La diferencia entre las nacionalidades para la condición bajando en los camiones puede atribuirse a las distintas condiciones y ciclos de manejo de cada conductor: puede darse que el frenado en la bajada se haga con el motor “enganchado” en los primeros cambios, usando el sistema de frenos. Ambas condiciones solicitan al motor de distintas formas, afectando a la concentración de BC del entorno, pues en bajada el consumo de combustible será menor y por lo tanto también las emisiones del escape. Por esto, la relación BC/PM es similar al nivel de concentración del nivel *background* en bajada mas no en subida, donde la combustión podría ser más ineficiente en la forma en que emite menos material orgánico volátil. Las diferencias se pueden atribuir a la distinta edad de los camiones medidos, ya que como se mencionó en el Capítulo 3, cada camión tiene asociado un factor de deterioro que puede aumentar las emisiones de PM_{2.5} o de BC. También puede deberse al número de datos de la muestra, ya que se trabaja con significancias asintóticas; si se trabaja con tamaños de muestra pequeños se espera un sesgo estadístico mayor.

4.5. Observaciones a los resultados del capítulo

Con respecto a los resultados del capítulo y el cumplimiento de los objetivos específicos asociados a esta sección se puede observar que:

- Los factores de conversión propuestos cuentan con un rango de incertidumbre (aunque no en todas las fuentes son explicitados). Esto aporta con un sesgo adicional a los resultados que serán presentados en el siguiente capítulo. Por este motivo es importante recalcar que los resultados presentados son estimaciones centrales y el rango de incertidumbre debiera ser determinado en una segunda instancia, fuera de este trabajo de memoria. Además, existe un rango de incertidumbre que responde a la forma en que estos valores son medidos como se pudo ver en la campaña experimental.
- Observar que las proporciones de BC decaen fuertemente en vehículos pesados pasando de Euro V a Euro VI. Este comportamiento no es igual para los vehículos livianos diésel. Esto se debe a que la incorporación de un medio de captación físico de hollín es impuesto para vehículos livianos a partir de Euro IV y para los vehículos pesados recién comienza a regir a partir de la norma Euro VI.
- Se ha planteado como objetivo específico determinar una tasa de vinculación entre OC y BC, sin embargo estos valores no se han presentado como resultados en el capítulo. Dentro de la metodología de trabajo, se puede notar que estimar las emisiones de OC a partir de las emisiones de BC podría tener un rango de incertidumbre muy alto, ya que las emisiones de BC están siendo

estimadas desde otra cantidad y asumiendo una serie de sesgos indicados al comienzo del capítulo, por lo que la determinación a partir de estas emisiones podrían no representar valores que concuerden con la realidad nacional. Además, Ntziachristos (Ntziachristos et al., 2007) propone tasas de conversión, pero se aclara que tienen un alto rango de incertidumbre. Por otra parte, se puede trabajar bajo el postulado que las emisiones de material particulado en vehículos diésel y a gasolina son principalmente EC y OC, por lo que a partir de los resultados podría estimarse que:

$$E_{EC} + E_{OC} \approx E_{PM} \quad (16)$$

Por lo que en consecuencia se estarían estimando las emisiones de OC al cumplir el objetivo principal de este trabajo de memoria. Además, se tiene como objetivo, documentar los efectos climáticos del BC en la atmósfera y según lo acordado en el Capítulo 1, el efecto del OC es principalmente de dispersión, afectando el efecto neto del BC según fuente de emisión (o combustible) y localización geográfica, indicando que una menor relación OC/BC estaría asociada a aerosoles absorbentes y por ende un mayor efecto neto de calentamiento de la superficie.

- Si se calcula la mediana de los datos en condición de subida (mayor esfuerzo del motor) se tiene que el valor de BC/PM_{2.5} es del 34%. La idea de calcular este valor es compararlo con la tasa de vinculación ocupada en el modelo de la norma que debería predominar en los camiones pesados en ruta. Esta norma debería estar entre Euro II – III y estos valores son 65% y 70%. Esto es esperable, ya que como se mencionó en las observaciones de la sección anterior, las condiciones del experimento realizados van a sesgar los resultados haciendo que éstos sean menos representativos de la composición de las especies que se podrían encontrar en el escape de un camión pesado.

4.6. Conclusiones del capítulo

A partir de los valores de BC/PM_{2.5} presentados en el capítulo se puede concluir que, en efecto, es objeto de estudio relevante en el ámbito de la ingeniería mecánica la relación que tienen las especies de los gases de escape de los distintos tipos de vehículos (de carga y pasajeros) cumpliendo estándares internacionales de emisión en la proporción de BC, OC y PM_{2.5}. A partir de la consulta realizada y los argumentos presentados en argumentos científicos, existe evidencia para vincular estas especies para cada tipología y tecnología vehicular considerando que las emisiones de material particulado son equivalentes a las emisiones de carbono negro más las de carbono orgánico y que la

proporción entre estos componentes será relevante al momento de caracterizar el efecto que tendrá el aerosol emitido en el clima.

Como en la bibliografía consultada las cantidades EC y BC se consideran equivalentes, se puede concluir que este es un sesgo que los inventarios Bottom – Up de transporte admiten para realizar sus estimaciones de emisiones.

Por último, se puede concluir a raíz de la campaña realizada, que podría considerarse un método factible un experimento de tales características para evaluar la relación BC/PM_{2.5} siempre y cuando se controlen más parámetros que los que se trataron en campaña así como se presenta en la ecuación (6) en la Sección 1.3. Con lo realizado en campaña se puede concluir que existe diferencia entre BC/PM_{2.5} cuando el vehículo se encuentra en diferencia de condición de subida o bajada.

5. Nivel de emisiones de BC para el sector transporte caminero nacional

5.1. Resultados obtenidos

A diferencia de los resultados presentados en el Capítulo 3, no existen inventarios nacionales de BC para el transporte caminero chileno. Sin embargo, la comparación puede realizarse con inventarios internacionales a nivel país. Aunque no se puedan comparar las estimaciones, se presentarán los niveles de emisión desagregados por región y categoría vehicular para el año 2013, ya que se ha usado como año base en el Capítulo 3 para estudiar la proporción de las emisiones.

Tabla 5.1. Total de emisiones de BC del sector transporte caminero chileno para el año 2013 desagregando por categoría vehicular.

Categoría	Nivel de emisión (ton año ⁻¹)
Camiones	1.115
Buses	217
VLC	362
VLP	222
Taxi	4
Total nacional	1,920

Tabla 5.2. Nivel de emisiones de BC del sector transporte caminero chileno para el año 2013 desagregando por región.

Región	Nivel de emisión (ton año ⁻¹)
I Región de Tarapacá	43
II Región de Antofagasta	154
III Región de Atacama	123
IV Región de Coquimbo	99
V Región de Valparaíso	152
VI Región de O'Higgins	104
VII Región del Maule	135
VIII Región del Bío – Bío	260
IX Región de La Araucanía	104
X Región de Los Lagos	101
XI Región de Aysén	21
XII Región de Magallanes	17
Región Metropolitana de Santiago	534
XIV Región de Los Ríos	54
XV Región de Arica y Parinacota	21

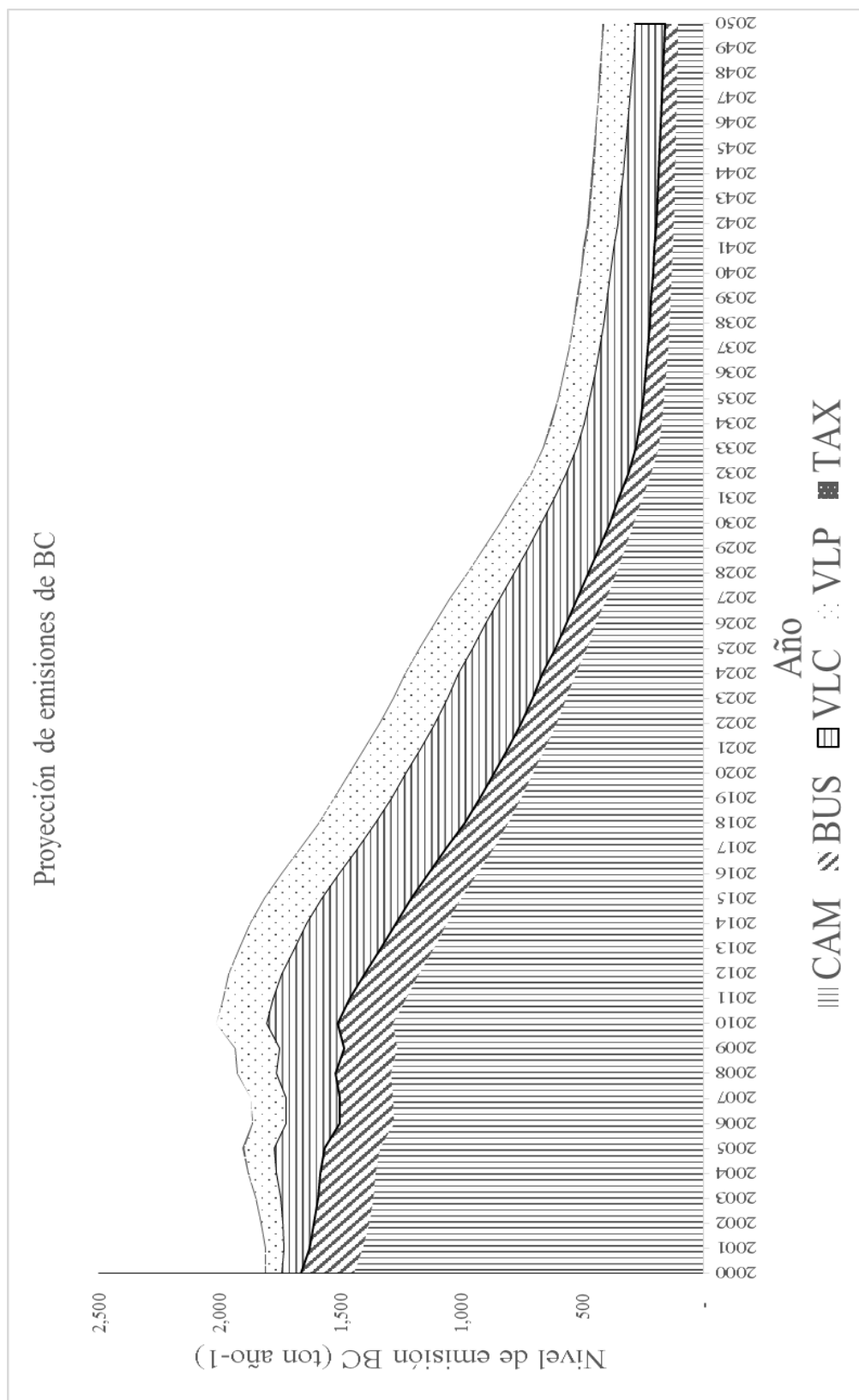


Figura 5.1. Proyección de las emisiones de BC desde 1998 hasta 2050 para el sector transporte caminero chileno, desagregando por categoría vehicular. Los primeros dos años no son mostrados en la gráfica.

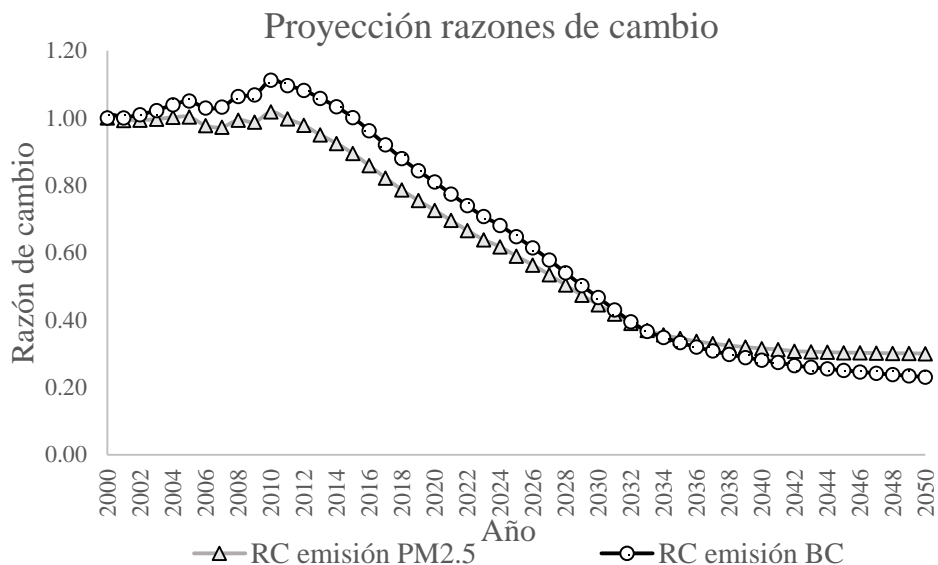


Figura 5.2. Proyección de las razones de cambio de las emisiones de PM2.5 y de BC tomando el año 2000 como referencia.

5.2. Comparación con inventarios internacionales

Se mencionó en capítulo de metodología, que si bien no existen inventarios de BC para Chile en registros nacionales, sí las emisiones han sido estimadas por modelos internacionales. Estos modelos son:

1. **EDGAR v4.3.1**³¹. Este inventario cuenta con una estimación desde 1970 al año 2010 y cuenta con la desagregación espacial de las emisiones. La categoría a comparar de este inventario con el propuesto en este trabajo de memoria figura como *road transportation* (transporte caminero). El valor reportado en este inventario de emisión nacional de BC para el año 2010 es de 6.21 Gg.
2. **VOCA Emissions Inventory**³². La estimación reportada en este inventario está basada en el inventario propuesto por CONAMA el año 2008 (el cual no contaba con CCVC). La estimación está desagregada de manera espacial y se denomina como *mobile sources* (fuentes móviles). Si se suma cada grilla se obtiene una emisión anual de 16.9 [Gg]. Sin embargo, se tiene que este valor es incluso mayor a las emisiones de PM_{2.5} reportada, por lo que se puede entender que existe valores anómalos para algunas grillas espacial. Se tiene una estimación de 7.2 [Gg] al año si se corrigen aquellos valores que pueden ser considerados como anómalos en la estimación.

³¹ <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=431> (consultada en abr-2017).

³² http://bio.cgrer.uiowa.edu/VOCA_emis/ (consultada en abr-17).

Se puede realizar una tabla comparativa con los inventarios mencionados anteriormente y el resultado obtenido usando la metodología del modelo STEP 2.0.

Tabla 5.3. Valores de emisión de BC reportados por distintos inventarios internacionales para los años 2008 y 2010 en transporte. Si bien los valores de emisiones del 2008 y 2010 no están explicitados en las secciones anteriores, se puede consultar la planilla del CD adjunto a esta memoria.

Inventario	BC reportado (Gg año ⁻¹)		Cociente	
	2008	2010	2008	2010
CCVC	1.93	2.02	-	-
EDGAR v 4.3.1.	6.23	6.21	3.23	3.03
VOCA Emissions Inventory	n.e.	7.20	-	3.57

5.3. Observaciones y discusión de los resultados

- Se cumple lo esperado en la medida en que la proporción de las emisiones de PM_{2.5} entre categorías vehiculares se mantiene para las emisiones de BC si se comparan los porcentajes de la Figura 5.3 con los de la Figura 3.6, ya que se está trabajando bajo la tesis que el BC es constituyente del material particulado fino.

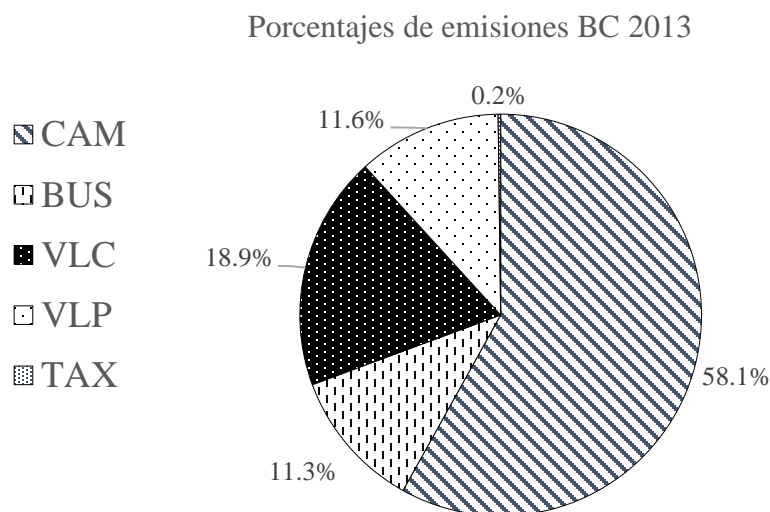


Figura 5.3. Porcentaje de distribución entre categorías para las emisiones nacionales de BC en el año 2013.

- Los factores de emisión COPERT 4 y la evolución del parque de los vehículos livianos hacen que las emisiones de BC no disminuyan en la proyección, haciendo que las emisiones de VLP sean mayores que las emitidas por camiones para el año 2050 como se indica en la Figura 5.4. Wang (Y. Wang et al., 2015) propone que las emisiones de los vehículos de gasolina podrían estar sobreestimadas. Una de las razones por las que se plantea esta tesis es debido a que los factores

de emisión usados en inventarios como Bond (Tami C. Bond et al., 2004) y Chow (Chow et al., 2010) están dados en masa de contaminante emitida por kilómetro recorrido. Estos factores de emisión son comparados con factores medidos *in-situ* y se determina que, en promedio, son menores a los estimados en condiciones de laboratorio y usados por los inventarios mencionados. Es importante mencionar este aspecto, ya que el inventario propuesto en este trabajo de memoria está basado en estos trabajos y usando factores de emisión basados en el kilometraje.

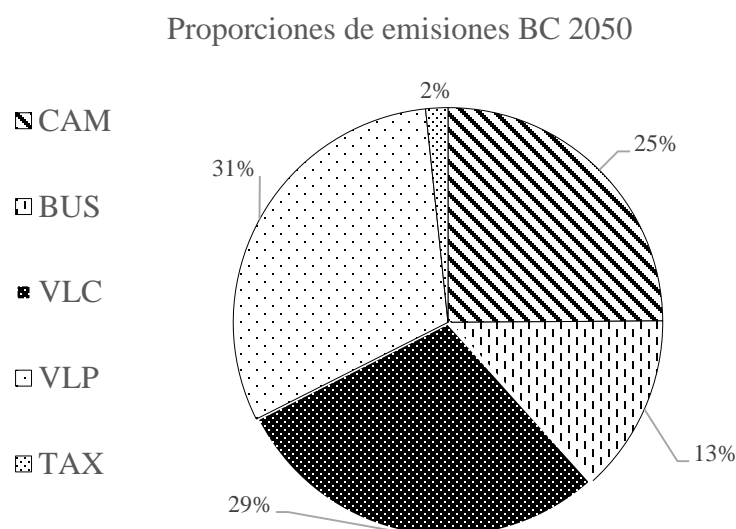


Figura 5.4. Porcentaje de distribución entre categorías para las emisiones nacionales de BC en el año 2050.

- En cuanto a la razón de cambio entre las cantidades BC y $PM_{2.5}$, se puede observar que el BC crece a una tasa mayor hasta cierto punto, luego de pasado el año 2030, se espera que las emisiones de BC decaigan en mayor medida que las de $PM_{2.5}$. Este efecto es atribuible a que el modelo STEP 2.0 considera más de la mitad de la flota con tecnología Euro VI para el 2030, reduciendo fuertemente las emisiones de BC en comparación con las de material particulado si se revisan las tasas de vinculación del Capítulo 4. La estimación de BC al año 2050 será de 418 toneladas.
- En la comparación de los niveles de emisión con otros inventarios claramente se observa que las estimaciones dadas por el inventario CCVC están subestimadas al momento de realizar el cociente entre los valores reportados resultando que los valores de emisión para Chile en inventarios internacionales están sobreestimados hasta en un factor de 3.5. Una de las razones que se pueden dar para justificar estas diferencias radica en que los valores reportados por estos inventarios internacionales están englobando las emisiones de transporte caminero y fuera de ruta en una misma categoría. Dentro del inventario del proyecto CCVC (del cual este inventario

propuesto es parte) se ha incluido un resultado de maquinaria fuera de ruta, por lo que se espera al sumar ambas emisiones, el valor se acerque a los valores reportados por EDGAR y VOCA.

5.4. Conclusiones del capítulo

Como principal conclusión de este capítulo se puede decir que las emisiones de BC para el sector transporte caminero en Chile representan 1,920 toneladas para el año base del proyecto CCVC 2013, donde el principal contribuyente en la masa emitida es la categoría vehicular de los camiones, seguida de los VLC y los buses al igual que en las emisiones de PM_{2.5} donde la motorización diésel es la protagonista de las emisiones en el contexto actual con un 88% del total. En base a lo presentado en los Capítulos 3 y 4, el resultado de este capítulo quedaría validado además de las comparaciones con inventarios internacionales donde se encuentran las mayores diferencias pero se explica debido a la diferencia entre clasificación de fuentes, pues en los inventarios internacionales se incluyen las maquinarias a diésel fuera de ruta presentando diferencias mayores que un factor de 3.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones generales

A partir de todo el trabajo realizado se puede concluir que, en base a la investigación realizada, existe evidencia científica para estimar las emisiones de BC a partir de emisiones de material particulado fino en vehículos diésel y gasolina siempre que valores validados de proporción de BC/PM_{2.5} desagregados por categoría y tecnología vehicular para relacionar los factores de emisión en un inventario Bottom – Up. Esto implica modelar la realidad operacional del transporte de pasajeros y de carga a partir de datos disponibles en modelos existentes y organismos tanto públicos como privados para caracterizar la flota vehicular: en este caso INE y ANAC principalmente. Por tanto, la metodología escogida para lograr la concreción del resultado principal, y la proyección del mismo, en este trabajo de memoria puede considerarse acertada a raíz de las validaciones hechas al inventario y la evidencia científica existente en artículos relacionados con las emisiones de carbono negro en vehículos diésel y gasolina. Como resultado de esta estimación central, se tiene que el valor de emisiones de BC para el sector transporte caminero es de 1,920 toneladas para el año 2013 con una tendencia a disminuir al año 2050 por la incorporación de tecnologías menos contaminantes a la flota nacional con un valor esperado de 418 toneladas, siendo los camiones las principales fuentes de BC en la actualidad contribuyendo con un 58.1% de las emisiones totales (ver Figura 5.3, página 82). Por lo tanto, se genera de esta forma el primer inventario de emisiones de carbono negro para el sector transporte caminero nacional.

6.2. Conclusiones específicas

- Acorde con el objetivo de estimar el nivel de material el nivel de emisión de material particulado fino para el sector transporte caminero chileno y generar una proyección del resultado se concluye que el resultado principal para el proyecto del cual este trabajo de memoria es parte, es de 3,116 toneladas para el año 2013; año base del proyecto CCVC. Junto con esto se puede concluir que estas emisiones tenderán a disminuir a un total de 985 toneladas al año 2050 en el escenario esperado con base a la validación que se tiene por emisiones de CO₂ y con respecto a la actividad vehicular puesto que las emisiones no tienden a una disminución, pero crecen a una tasa menor que la actividad vehicular nacional por la introducción de tecnologías más eficientes de emisión. Además de la verificación por CO₂, se pueden reportar los valores mencionados anteriormente a modo de conclusión ya que también hay un respaldo en la proporción por categoría vehicular de las emisiones, pues se tiene que los vehículos a gasolina (principalmente VLC y taxis) aportan

una mayor cantidad de CO₂ que las otras categorías que son principalmente diésel, situación que se vuelve inversa cuando se trata de material particulado donde las emisiones de PM_{2.5} son debido a la actividad de camiones a nivel nacional. Por esto, la metodología del modelo STEP2.0 puede considerarse como válida para estimar las emisiones del transporte en ruta de Chile previa revisión de los parámetros de entrada y aceptación de los sesgos inherentes al modelo.

- Con respecto al método de conversión de emisiones de material particulado fino se puede concluir que, en efecto, es objeto de estudio relevante en el ámbito de la ingeniería mecánica la relación que tienen las especies de los gases de escape de los distintos tipos de vehículos (de carga y pasajeros) cumpliendo estándares internacionales de emisión en la proporción de BC, OC y PM_{2.5}. A partir de la consulta realizada y los argumentos presentados en argumentos científicos, existe evidencia para vincular estas especies para cada tipología y tecnología vehicular considerando que las emisiones de material particulado son equivalentes a las emisiones de dióxido de carbono más las de carbono orgánico y que la proporción entre estos componentes será relevante al momento de caracterizar el efecto que tendrá el aerosol emitido en el clima.

Como en la bibliografía consultada las cantidades EC y BC se consideran equivalentes, se puede concluir que este un sesgo que los inventarios Bottom – Up de transporte admiten para realizar sus estimaciones de emisiones.

Luego, se puede concluir a raíz de la campaña realizada, que podría considerarse un método factible un experimento de tales características para evaluar la relación BC/PM_{2.5} siempre y cuando se controlen más parámetros que los que se trataron en campaña así como se presenta en la ecuación (6) en la Sección 1.3. Con lo realizado en campaña se puede concluir que existe diferencia entre BC/PM_{2.5} cuando el vehículo se encuentra en diferencia de condición de subida o bajada.

- Se concluye luego de la conversión entre especies que las emisiones de BC para el sector transporte caminero en Chile representan 1,920 toneladas para el año base del proyecto CCVC 2013, donde el principal contribuyente en la masa emitida es la categoría vehicular de los camiones, seguida de los VLC y los buses al igual que en las emisiones de PM_{2.5} donde la motorización diésel es la protagonista de las emisiones en el contexto actual con un 88% del total. En base a lo presentado en los Capítulos 3 y 4, el resultado de este capítulo quedaría validado además de las comparaciones con inventarios internacionales donde se encuentran las mayores diferencias pero se explica debido a la diferencia entre clasificación de fuentes, pues en los inventarios internacionales de incluyen las maquinarias a diésel fuera de ruta presentando diferencias mayores que un factor de 3.

6.3. Recomendaciones:

Luego de todo el trabajo realizado, se pueden dar las siguientes recomendaciones para seguir el perfeccionamiento de esta primera propuesta de inventario chileno de BC para fuentes móviles en ruta:

- Por falta de datos de FE y actividad es que en esta ocasión no se han modelado las emisiones de motocicletas. Además, este tipo de vehículos no es una de las prioridades de los planes de descontaminación discutidos en la Sección 1.5. A pesar de esto, el siguiente paso es inventariar las emisiones de motocicletas para ser agregados al modelo ya que se ha diseñado la planilla para su actualización.
- Las emisiones encontradas usando la metodología del modelo STEP 2.0 es una estimación central, es decir, que está calculada a partir de valores medios de los parámetros de entrada. Por esta razón, se deben dar incertidumbres a cada parámetro o un porcentaje de variación para poder dar un rango entre el cual podrían estar los niveles de emisiones de BC a nivel nacional dando una cota inferior y otra superior.
- Si bien se ha incorporado un factor de deterioro al $PM_{2.5}$ (por lo que también para BC) por mantenimiento, se debería incluir un factor de deterioro por edad vehicular para caracterizar la flota de mejor manera para representar la realidad.
- A la fecha de cierre de esta investigación, los FE de COPERT 5 no están disponibles para las clasificaciones que se tienen en el inventario. Por este motivo, la inclusión de una posible norma Euro VII en estándares internacionales ha sido omitida en esta oportunidad, por lo que si la modelación de estos FE está disponible, se recomienda incorporarlas al modelo.
- Realizar un inventario de emisiones es una tarea cíclica, es decir que no cuenta con un final determinado porque se trata de un modelo que representa una realidad cambiante con el pasar de los años. Por esta razón, el parámetro principal de la metodología STEP 2.0 el cual es la demanda, debe ser reevaluado en una segunda proyección econométrica considerando las condiciones actuales.
- Como se mencionó en el Marco Teórico de este trabajo de memoria, los inventarios son un input necesario para generar políticas públicas en pos de mejorar la calidad de vida de los habitantes de un país y mitigar los efectos de los distintos contaminantes sobre el clima. Por otra parte el valor de emisión reportado en un inventario es un valor estático que requiere ser dinamizado en una distribución espacial y temporal y así visualizar el efecto potencial real que tendrían las emisiones de BC. Por lo tanto, luego de ser determinadas las incertidumbres, se deberían usar estos resultados para realizar una distribución espacio – temporal a nivel nacional.

- El modelo propuesto puede ser utilizado para estudiar escenarios futuros y evaluar el impacto de cambios en la flota como la incorporación de vehículos híbridos o alguna tecnología de cero emisiones, así como también la influencia de otros ámbitos como el ferroviario en el transporte caminero.
- Para rectificar la campaña y poder así controlar las incertidumbres inherentes a la naturaleza del experimento de campaña con el que realizó en Los Andes, se puede seguir la metodología por Wang (Y. Wang et al., 2015) midiendo BC in situ o por Wang (X. Wang et al., 2012) donde se controla el nivel de CO₂ para obtener más información de los camiones seguidos.

Bibliografía

- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., Deangelo, B. J., ... Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *118*(11), 5380–5552. <http://doi.org/10.1002/jgrd.50171>
- Bond, T. C., Streets, D. G., Yarber, K. F., Nelson, S. M., Woo, J. H., & Klimont, Z. (2004). A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, *109*(14), 1–43. <http://doi.org/10.1029/2003JD003697>
- Chow, J. C., Watson, J. G., Lowenthal, D. H., Chen, L.-W. A., & Motallebi, N. (2010). Black and Organic Carbon Emission Inventories: Review and Application to California. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *60*(4), 497–507. <http://doi.org/10.3155/1047-3289.60.4.497>
- Chung, C. E., Ramanathan, V., Kim, D., & Podgorny, I. A. (2005). Global anthropogenic aerosol direct forcing derived from satellite and ground-based observations. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *110*(24), 1–17. <http://doi.org/10.1029/2005JD006356>
- Cortés-Hernández, V. E., & Aparicio, J. (2014). Caracterización de aerosoles por quema de biomasa en el sureste de México. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, *V*, 145–156.
- Hess, M., Koepke, P., & Schult, I. (1998). Optical Properties of Aerosols and Clouds : The Software Package OPAC. *American Meteorological Society*, 831–844.
- Li, J., Posfai, M., Hobbs, P. V., & Buseck, P. R. (2003). Individual Aerosol Particles from Biomass Burning in Southern Africa: 2. Compositions and Aging of Inorganic Particles. *Journal of Geophysical Research*, *108*, 1–12. <http://doi.org/10.1029/2002JD002310>
- Ntziachristos, L., Mellios, G., Fontaras, G., & Gkeivanidis, S. (2007). Updates of the Guidebook Chapter on Road Transport. *LAT Report*, 707.
- Ortuzar, F., & Tornel, C. (AIDA). (2016). Controlando los contaminantes climáticos de vida corta. Una oportunidad para mejorar la calidad del aire y mitigar el cambio climático. El caso de Brasil, Chile y México. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Ramanathan, V., & Carmichael, G. (2008). Global and Regional Climate Changes Due to Black Carbon. *Nat. Geosci.*, *1*, 221. <http://doi.org/10.1038/ngeo156>

- Salvador, P., & Artiñano, B. (2000). Evaluación de la contaminación atmosférica producida por partículas en suspensión en las redes de calidad del aire de la Comunidad de Madrid. *CIEMAT*, 921.
- Santamaría Antonio, J. (2010). Forzamiento radiativo y cambios químicos en la atmósfera. *Revista de La Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales (Esp)*, 4(1), 149–173.
- Schwarz, J. P., Gao, R. S., Spackman, J. R., Watts, L. A., Thomson, D. S., Fahey, D. W., ... Del Negro, L. A. (2008). Measurement of the mixing state, mass, and optical size of individual black carbon particles in urban and biomass burning emissions. *Geophysical Research Letters*, 35(13), 1–5. <http://doi.org/10.1029/2008GL033968>
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434–440. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>
- Sociedad Consultora Sistemas Sustentables Ltda. (2014). Actualización Metodológica del Modelo de Consumo Energético y Emisiones para el Sector Transporte (STEP). *Ministerio de Transportes Y Telecomunicaciones SECTRA*.
- The World Bank. (2014). Reducing Black Carbon Emissions from Diesel Vehicles : Impacts , Control Strategies , and Cost-Benefit Analysis.
- UNEP/WMO. (2011). Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone. *United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi, Kenya*. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Integrated+Assessment+of+Black+Carbon+and+Tropospheric+Ozone#5>
- Vilches, E., Ivelic, A. M., & Ferreiro, O. (1991). Revisión de la metodología de medición de las variables “Tasa de ocupación” y “Clasificación de vehículos.” Santiago: SOCHITRAN.
- Wagner, F., & Silva, a M. (2008). Some considerations about Angstrom exponent distributions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(1998), 481–489. <http://doi.org/10.5194/acp-8-481-2008>
- Wang, X., Westerdahl, D., Hu, J., Wu, Y., Yin, H., Pan, X., & Max Zhang, K. (2012). On-road diesel vehicle emission factors for nitrogen oxides and black carbon in two Chinese cities. *Atmospheric Environment*, 46, 45–55. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.10.033>
- Wang, Y., Xing, Z., Zhao, S., Zheng, M., Mu, C., & Du, K. (2015). Are emissions of black carbon

from gasoline vehicles overestimated? Real-time, in situ measurement of black carbon emission factors. *Science of the Total Environment*, 547(March), 422–428.
<http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.115>