



**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES**

**ESTIMACIÓN ESPACIOTEMPORAL DEL BLACK
CARBON EN LA CUENCA NIVAL ESTERO
JUNCALILLO: ANÁLISIS RETROSPECTIVO Y
PROYECCIONES FUTURAS**

FELIPE ANDRÉS ARANDA DELGADO

Ingeniero Civil
Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Marzo de 2024



**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES**

**ESTIMACIÓN ESPACIOTEMPORAL DEL BLACK
CARBON EN LA CUENCA NIVAL ESTERO
JUNCALILLO: ANÁLISIS RETROSPECTIVO Y
PROYECCIONES FUTURAS**

Memoria de Título y Tesis de Grado presentada por
FELIPE ANDRÉS ARANDA DELGADO

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

y al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Profesora Guía
Dra. Lina Mabel Castro Heredia
Profesor Correferente
Dr. Tomás Bolaño Ortiz
Marzo de 2024

TÍTULO DE LA TESIS:

ESTIMACIÓN ESPACIOTEMPORAL DEL BLACK CARBON EN LA CUENCA NIVAL ESTERO JUNCALILLO: ANÁLISIS RETROSPECTIVO Y PROYECCIONES FUTURAS

AUTOR

FELIPE ANDRÉS ARANDA DELGADO

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el título de **Ingeniero Civil** y el grado de **Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil** de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	Nombre	Firma
Profesor Guía	Lina Castro Heredia
Profesor Correferente	Tomás Bolaño Ortiz
Miembro Comisión 1	María F. Ruggeri
Miembro Comisión 2	Álvaro Ossandón Alvarez
Miembro Comisión 3	Mauricio Osses Alvarado

Valparaíso, Chile, Marzo de 2024

Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mi profundo agradecimiento a mi madre, quien ha sido mi mayor apoyo para poder cumplir mis objetivos personales y académicos. Agradezco también a mi Tía Marta (Q.E.P.D.), mi tía Ximena, mi maestro de karate (Alejandro Álvarez) y mi familia adoptiva de Viña (Tía Elisa y Melissa), quienes fueron pilares fundamentales para mi formación valórica, los que, con su apoyo en momentos adversos y complejos, como también en instantes felices y alegres, me impulsaron a seguir en mi camino. De cada uno de ellos aprendí la perseverancia, empatía, y constancia para cumplir todas mis metas y sueños.

A mis amigos de universidad y compañeros de deporte que, durante mis años en Valparaíso y Viña del Mar. Siempre estuvieron presentes con su apoyo incondicional, compartiendo risas, distrayéndose, viajando a lugares inolvidables y respaldándonos mutuamente en momentos cruciales. Agradezco especialmente a mis amigos: Ampuero, Paulo, Maca, Melissa, Pía y Paula.

Finalmente, pero no menos importante, quiero reconocer y agradecer a mis profesores guías, en especial a los doctores Lina Castro, Álvaro Ossandón y Tomás Bolaño, así como a todos los docentes que han compartido sus conocimientos y han brindado apoyo académico para la realización de esta investigación. Asimismo, agradecer al Departamento de Obras Civiles por proporcionarme los cimientos sólidos necesarios para adentrarme en el mundo profesional de esta apasionante carrera.

El presente trabajo de investigación se desarrolló en el marco de tres proyectos ANID: **Proyecto ANID Anillo ACONCAGUA ACT210021** *“Interactions between environmental compartments and their impact on the Andean ecohydrosphere under conditions of climate change (ACONCAGUA)”*, **ANID-FONDECYT Iniciación 11220482** *“Changes in snowmelt as a decisive issue for available water resources in Andean basins in central Chile”*, y **ANID-FONDECYT 3230555** *“Estimación espaciotemporal del impacto de las partículas absorbentes de luz en las propiedades radiativas de la nieve combinando observaciones terrestres y satelitales en los Andes Centrales de Chile”*. Además, agradecer a ANID-Subdirección de Capital Humano quien financió el segundo año académico de Magíster Nacional (ANID 2022-22220854).

Contenido

Figuras	IV
Tablas.....	V
1 Introducción.....	2
2 Materiales y Metodología	5
2.1 Zona de estudio.....	5
2.2 Datos.....	6
2.2.1 Datos meteorológicos, datos atmosféricos y forzantes meteorológicas grilladas.....	6
2.2.2 Productos Satelitales	7
2.2.3 Productos de Modelos Climáticos Globales	8
2.2.4 Tráfico Vehicular	9
2.3 Metodología.....	10
2.3.1 Estimación retrospectiva de las CBCS mediante el modelo ART	11
2.3.2 Estimación retrospectiva del BC atmosférico mediante un Modelo Estadístico	14
2.3.3 Proyecciones de BC atmosférico.....	16
2.3.4 Tendencias de los escenarios de BC atmosférico	18
3 Resultados y Discusión.....	19
3.1 Variación espaciotemporal de las CBCS con el modelo ART	19
3.2 Variabilidad del Black Carbon Atmosférico	22
3.2.1 Variación espaciotemporal del BC Atmosférico Retrospectivo	22
3.2.2 Variación del BC atmosférico con la altura y distancia a la carretera	23
3.3 Escenarios de proyecciones de BC atmosférico futuro.	24
3.3.1 Escenario Cambio Climático: Selección del GCM y SDM para predecir el BC atmosférico ...	24
3.3.2 Escenario Vehículos: Proyección de Tráfico Vehicular para predecir el BC atmosférico.....	25
3.3.3 Variación espaciotemporal del BC Atmosférico Futuro	26
3.4 Tendencia de los escenarios BC atmosférico.....	27
3.4.1 Tendencia temporal de los escenarios de BC atmosférico a escala de cuenca	27
3.4.2 Tendencia espaciotemporal de los escenarios de BC atmosférico a escala anual.....	29
4 Conclusiones.....	31
5 Anexo B	40

Figuras

Figura 1. Mapa de ubicación de la cuenca Estero Juncalillo. a) Ubicación de la zona de estudio en Chile y Sudamérica. b) Bordes de la zona de estudio, incluyendo estaciones meteorológicas, glaciares, río, laguna y carretera. c) Mapa de bandas de elevación (EB, Elevation Band) regrillada de MODIS de la zona de estudio. d) Variabilidad interanual de la altura de la nieve y temperatura del aire de la estación Portillo; y Porcentaje medio mensual del Tráfico Total Anual de la carretera CH-60. e) Serie del Tráfico Total Anual (en miles) por tipo vehículo desde 2006-2022.	6
Figura 2. Esquema resumen para estimar retrospectivamente (2006-2022) las CBCS y el BC atmosférico. .	10
Figura 3. Esquema resumen para proyectar el BC atmosférico (2023-2035) mediante un escenario de cambio climático y uno de incremento de vehículos.	11
Figura 3. Variabilidad espaciotemporal de las variables <i>CBCSacum</i> , <i>Iimp</i> , y $\Delta\alpha\%$. Cada columna representa los meses entre junio a octubre (JUN-OCT) y cada píxel representa el promedio mensual entre 2006-2022. La primera a tercera fila representan: (a-e) <i>CBCSacum</i> , (f-j) <i>Iimp</i> , y (k-o) $\Delta\alpha\%$. El título de cada gráfico representa el promedio de cada variable agregado a nivel de cuenca. El texto (un) hace referencia a las unidades del título. La línea punteada muestra la carretera.	19
Figura 4. Variación espaciotemporal del <i>BCatm</i> , <i>RCT</i> agregado a nivel mensual entre 2006-2022. La primera a quinta columna muestra los meses de JUN a OCT. Los títulos de cada imagen representan el valor promedio a nivel de cuenca para todos los píxeles. En color cian se muestra la carretera CH-60.	22
Figura 5. Comparación <i>BCatm</i> , <i>OBS</i> y <i>BCatm</i> , <i>RCT</i> . (a) Serie mensual entre <i>BCatm</i> , <i>OBS</i> y <i>BCatm</i> , <i>RCT</i> . (b) Gráfico de dispersión entre el <i>BCatm</i> , <i>RCT</i> . y el <i>BCatm</i> , <i>OBS</i> . La línea roja punteada muestra la línea 1:1.	23
Figura 6. Variación espacial e interanual del BC atmosférico retrospectivo. a) Gráfico de dispersión entre <i>BC</i> y la altura. Los puntos representan la NDH en kilómetros en escala logarítmica. En la parte superior se muestra los valores promedios de BC y NDH por cada EB b) Curvas interanuales de <i>BC</i> por EB.	23
Figura 7. Diagramas de caja de las métricas <i>rp</i> , <i>PSS</i> , y <i>PPI</i> para los a) GCMs y b) SDMs en el periodo de análisis retrospectivo (2006-2022). Para el caso b), se utiliza el GCM IPSL-CM5A-MR. El valor extremo inferior (superior) del diagrama de cajas corresponden al primer (tercer) cuartil, mientras que el valor central corresponde a la mediana. El extremo de los bigotes superior (inferior) se extiende desde el valor extremo del diagrama de caja hasta el valor más grande (más pequeño) sin exceder 1.5 rango intercuartil.	25
Figura 8. a) Pendiente grillada de regresión lineal entre MTT y <i>BCatm</i> , <i>RCT</i> a nivel mensual entre JUN a OCT. El texto (un) hace referencia a las unidades del título. b) Tasas de crecimiento (<i>TC</i>) y coeficiente de determinación (<i>R2</i>) para el MTT entre los años 2014-2018 para los vehículos ingresan y salen por la carretera CH-60. c) Tráfico Total Anual retrospectivo (<i>ATT</i> , 2006-2022) y futuro (<i>ATTFUT</i> , 2023-2035) calculada en función de las <i>TC</i> consideradas.	26
Figura 9. Variación espaciotemporal del <i>BCFUT</i> , <i>GCM</i> (primera fila) y <i>BCFUT</i> , <i>VEH</i> (segunda fila) agregado a nivel mensual entre 2023-2035. La primera a quinta columna muestra los meses de JUN a OCT. Los títulos de cada imagen representan el valor promedio a nivel de cuenca para todos los píxeles. El texto (un) hace referencia a las unidades del título. En color cian se muestra la carretera CH-60.	27
Figura 10. Serie mensuales entre JUN-OCT (color claro) y anuales (color oscuro) del BC atmosférico para los escenarios: <i>BCatm</i> , <i>RCT</i> (2006-2022), <i>BCFUT</i> , <i>GCM</i> (2023-2035) y <i>BCFUT</i> , <i>VEH</i> (2023-2035).	28
Figura 11. Variación espaciotemporal del TSEE del BC atmosférico anual para los distintos escenarios (<i>BCatm</i> , <i>RCT</i> , <i>BCFUT</i> , <i>GCM</i> , <i>BCFUT</i> , <i>VEH</i>). Los títulos de cada imagen representan el valor promedio a nivel de cuenca para todos los píxeles. El texto (un) hace referencia a las unidades del título. En color negro se muestra la carretera CH-60.	30

Tablas

Tabla 1. Descripción de estaciones de monitoreo utilizadas en el estudio.....	7
Tabla 2. Productos MODIS utilizados en el presente estudio	8
Tabla 3. Descripción de GCMs utilizados en este estudio para la SCONCBC	9
Tabla 4. Ecuaciones usadas del modelo ART adaptadas de Negi & Kokhanovsky, (2011).	12
Tabla 5. Parámetros y variables usadas del modelo ART. Parámetros usados según Zheng et al. (2022). ..	12
Tabla 6. Ecuaciones y variables de formulaciones teóricas.	14
Tabla 7. Métricas de evaluación utilizadas para seleccionar GCM y SDM.	16
Tabla 8. Descripción de Métodos de Downscaling Estadísticos utilizados en este estudio.....	17
Tabla 9. Promedios mensuales de las CBCSacum , Imp y $\Delta\alpha\%$ para las zonas NH, FH y razón NH/FH..	20
Tabla 10. Mediciones de CBCS en la Cordillera de los Andes.	21
Tabla 11. Valores de NH, FH y NH/FH para el TSSE del BC atmosférico anual por cada escenario.	30

Estimación espaciotemporal del Black Carbon en la cuenca nival Estero Juncalillo: Análisis retrospectivo y proyecciones futuras.

Resumen

El Carbono Negro (BC, *Black Carbon*) es uno de los principales contaminantes atmosféricos proveniente de la combustión incompleta de combustibles fósiles. Sobre superficies nivales, tiene la capacidad de reducir su habilidad de reflejar la radiación solar (albedo) en el rango visible, absorbiendo más calor, acelerando su ablación y reduciendo su duración. Esta reducción es especialmente importante cuando la distancia a la fuente de emisión de contaminantes atmosférico es variable, produciendo distintas concentraciones de impurezas depositadas sobre el manto nival. Por lo tanto, resulta de alto interés estudiar los cambios espaciotemporales producidos por las emisiones de BC atmosférico para comprender los efectos que estos generan sobre la criósfera. Esta investigación busca reconstruir (respecto al período 2006-2022) y generar predicciones (hacia los años 2023-2035) el BC atmosférico de manera espaciotemporal entre los meses de junio a octubre en la cuenca Estero Juncalillo, situada en los Andes Centrales de Chile, donde se ubica la carretera CH-60, la cual presenta el mayor tráfico vehicular entre Chile y Argentina. Para lograrlo, en primer lugar, se evaluarán estimaciones espaciotemporales de las concentraciones de BC en la nieve (CBCS, *Concentration of Black Carbon in Snow*) mediante un modelo simplificado de transferencia radiativo asintótico (modelo ART, *asymptotic radiative transfer model*); empleando 17 años (2006-2022) de distintos productos de Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). En segundo lugar, se desarrolló un modelo estadístico para determinar el BC atmosférico a partir de las CBCS del modelo ART obtenidas y mediante formulaciones empíricas de la velocidad de depositación seca de partículas y densidad superficial de la nieve. En último lugar, se proyectaron dos escenarios de BC atmosférico (2023-2035) mediante dos escenarios: 1) Proyecciones de cambio climático empleando Modelos Climáticos Globales (GCMs, *Global Climate Models*) del Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5) con métodos de downscaling estadístico (SDMs, *Statistical Downscaling Methods*) y 2) Incremento del tráfico vehicular de la carretera CH-60 mediante relaciones estadísticas. Los principales resultados revelaron: (1) Las CBCS promedios a nivel mensual variaron entre [160, 520] ng g⁻¹, encontrándose que en zonas cercanas a la carretera (< 1 km) fueron entre [11, 20] % mayores respecto zonas alejadas (≥ 1 km). (2) En zonas bajas de la cuenca (2200-3000 msnm), el BC atmosférico retrospectivo (2006-2022) y la distancia más cercana a la carretera varió entre [0.11, 0.24] µg m⁻³ y [0.01, 6.17] km, mientras que en las zonas altas (4000-4700 msnm) mostró una variación [0.08, 0.17] µg m⁻³ y [1.13, 11.26] km. Esto estaría indicando que el BC atmosférico aumentó a menores altitudes de la cuenca y a menor distancia con la carretera. El BC atmosférico del escenario retrospectivo, a nivel de cuenca, revela un valor promedio de 0.12 µg m⁻³ y una tendencia positiva no significativa de 2.9 ng m⁻³ year⁻¹. (3) El escenario futuro (2023-2035) del BC atmosférico asociado a las proyecciones de cambio climático es mejor representado por el GCM IPSL-CM5A-MR y el SDM asociado a Quantile Delta Mapping. A nivel de cuenca, este presentó un valor promedio de 0.10 µg m⁻³ y una tendencia negativa significativa de 1.2 ng m⁻³ year⁻¹. El escenario futuro asociado al tráfico tuvo un incremento de 0.69 a 1.41 millones de vehículos en la carretera. A nivel de cuenca, este presentó un valor promedio de 0.21 µg m⁻³ y una tendencia positiva significativa de 12.0 ng m⁻³ year⁻¹. Estos resultados respaldan la noción de que los impactos del BC atmosféricos necesitan ser apropiadamente considerados para estudios regionales, sobre todo en proyecciones futuras de cambio climático y, particularmente en zonas de la criósfera cercanas a emisión de contaminantes, como lo es la cuenca Estero Juncalillo, la cual presenta un régimen nival y el paso fronterizo con un alto flujo vehicular durante todo el año.

Palabras claves: cuenca nival, black carbon, black carbon en la nieve, cambio climático, MODIS, Andes.

1 Introducción

La criósfera se caracteriza por ser un cuerpo blanco que refleja gran cantidad de radiación solar, un componente clave en la interacción tierra-atmósfera (Brandt et al., 2011). Inicialmente el albedo de nieve recién caído es alto, generalmente alrededor de 0.7-0.9 (Hadley & Kirchstetter, 2012); pero disminuye de manera natural debido a procesos fisicoquímicos que incrementan el tamaño de grano y reducen su albedo (DeWalle & Rango, 2008). Sin embargo, en este siglo, distintas investigaciones han demostrado que las impurezas o partículas absorbentes de luz (LAPs, *Light-Absorbing Particles*), tales como el BC, carbono orgánico y el polvo mineral, aumentan la absorción de la radiación solar en el rango visible (400-750 nm, zona altamente reflectiva) y, por ende, reducen drásticamente el albedo de la nieve (Hadley & Kirchstetter, 2012; He et al., 2018; Yasunari et al., 2011, 2015), acelerando la reducción de la cobertura nival en cuencas de alta montaña (Gul et al., 2021). Entre las LAPs mencionadas con anterioridad, el BC ha ganado especial atención en la comunidad científica debido a su abundancia y efecto radiativo. Este material negro carbonoso, proveniente de la combustión incompleta de combustibles fósiles (Bond et al., 2013), presenta la mayor capacidad de absorción por unidad de masa, clasificándolo como una de las impurezas con mayor impacto en la criósfera (Doherty et al., 2010; Kang et al., 2020) y como el segundo contribuidor al cambio climático después de los gases de efecto invernadero (Bond et al., 2013).

Distintas investigaciones a nivel internacional han demostrado una disminución del albedo nival mediante mediciones puntuales de impurezas, especialmente por el efecto del BC. Por ejemplo, en las Rocallosas (Estados Unidos), la presencia de impurezas (BC y polvo mineral) provocó un incremento del 50% en la ablación de la nieve y una disminución aproximada del 35% del albedo, en comparación con otro periodo similar de cantidad de nieve pero sin impurezas (Skiles & Painter, 2017). En el Monte Yulong (Australia) se han observado reducciones de 2%-10% del albedo nival derivadas de la depositación de impurezas, como el BC (Niu et al., 2017). En la Norte Xinjiang (China), la contribución del BC depositado sobre la nieve ($32 - 8841 \text{ ng g}^{-1}$) redujo hasta un 17% el albedo por emisiones residenciales locales (Zhong et al., 2019). En el caso de los Andes Sudamericanos ($-20 - 15^{\circ}\text{S}$) se ha evidenciado una disminución entre 0.6-22.0% del albedo glaciar, debido a distintas concentraciones de las LAPs derivadas de diversas fuentes de contaminación, tales como incendios, industrias, entre otros (Gillardoni et al., 2022). Transversalmente en Chile, específicamente en la Cordillera de los Andes, se han realizado diversas mediciones puntuales de CBCS ($18-54^{\circ}\text{S}$) encontrando valores $0-153 \text{ ng g}^{-1}$, las cuales pueden reducir hasta un 6.5% el albedo de la nieve (Cordero et al., 2022; Rowe et al., 2019). En el caso de los glaciares andinos chilenos, Cereceda-Balic et al. (2020) demostraron que la proximidad a la actividad minera ha exacerbado la pérdida del área glaciar en comparación con glaciares alejados. Estos hallazgos mostraron que las CBCS en promedio fueron 61 veces mayor en el glaciar próximo a la minera (1611.9 ng g^{-1}) respecto al alejado (26.3 ng g^{-1}). Además, mediciones de albedo revelaron que el glaciar cercano a una mina tenía un albedo más bajo (0.61) en comparación con el glaciar distante (0.74) (Cereceda-Balic et al., 2022).

Estos estudios, tanto internacionales como nacionales, han evidenciado una notable disminución del albedo de la nieve debido a las concentraciones de las impurezas, especialmente por la depositación del BC. Sin embargo, estos estudios nacionales se han enfocado en realizar mediciones puntuales de las CBCS, sin generar análisis espaciotemporales, particularmente a escala de cuencas. Además, tampoco han evaluado las concentraciones del BC atmosférico dispersas por fuentes de emisión, sobre todo en cuencas nivales. Por este motivo, se vuelve necesario estimar de manera retrospectiva y evaluar proyecciones de los escenarios de BC atmosférico para generar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático, cuya información tiene el potencial de integrarse en modelos hidrológicos acoplados con modelos radiativos.

Esto brinda la oportunidad de representar con mayor precisión la escorrentía en las cuencas de alta montaña, considerando tanto el impacto climático como el efecto radiativo de la deposición de impurezas sobre el manto nival. Esta comprensión resulta especialmente relevante en zonas críticas como las cuencas de los Andes Centrales de Chile, que abastecen a más del 50% de la población total del territorio nacional, convirtiéndolos en áreas de interés vital (Correa-Ibanez et al., 2018). Por lo que entender cómo los contaminantes atmosféricos afectan este recurso y conocer la magnitud de su emisión es esencial para asegurar un suministro adecuado para las comunidades locales, particularmente en zonas de alta montaña relativas a la criósfera.

Investigaciones en China han estimado de manera retrospectiva y espaciotemporal las CBCS mediante modelos de transferencia radiativos con productos satelitales. Un ejemplo de esto es el estudio de Chen et al. (2021) en Xinjiang (China), quienes mediante modelos de transferencia radiativa combinado con productos MODIS (2001-2018) demostraron que las CBCS fueron 9 veces mayor en la región industrial (913.2 ng g^{-1}) respecto a la región rural. Similares hallazgos fueron demostrados por Zheng et al. (2022) en el Noroeste Chino utilizando el modelo ART con productos MODIS (2001-2016), donde evidenciaron valores de CBCS más altas en áreas con mayor actividad antropogénica ($1200 - 1600 \text{ ng g}^{-1}$) que zonas con actividad menor ($450 - 850 \text{ ng g}^{-1}$). Por ende, este tipo de metodología es adecuado para realizar una estimación espaciotemporal de las CBCS en zonas relativas a la criósfera, cuyo procedimiento no ha sido aplicado antes en cuencas de alta montaña de Los Andes.

El impacto del BC atmosférico que se deposita en la criósfera varía globalmente debido a diferencias en el proceso de transporte, haciendo que la distribución espacial y temporal del BC sea heterogénea (Gogoi et al., 2016). La modelación espacial y temporal de la depositación seca de BC dependen fuertemente de forzantes meteorológicas (Lapere et al., 2023), las cuales pueden ser usadas para tener un mejor entendimiento del comportamiento de las CBCS y poder estimar el BC atmosférico (Chen et al., 2012; Vong et al., 2010). En la literatura existente, se corrobora la ausencia de una metodología específica y validada para estimar retrospectivamente el BC atmosférico en la nieve mediante datos de terreno y/o satelitales. Esto ha llevado al equipo de investigación a desarrollar una propuesta de modelo estadístico propio, que tiene en cuenta la información grillada de datos meteorológicos y productos satelitales disponibles, haciendo factible estimar de manera retrospectiva y espaciotemporal el BC atmosférico en cuencas nivales de alta montaña.

Conociendo esta estimación retrospectiva del BC atmosférico, es posible evaluar las proyecciones futuras de esta variable. Un método para atender estas proyecciones es mediante los GCMs, quienes desempeñan un papel fundamental para caracterizar cómo podría evolucionar este contaminante en respuesta a influencias naturales y humanas, siendo ampliamente utilizadas para evaluaciones de modelaciones de proyecciones hidrológicas (Vidal et al., 2016). Sin embargo, varios estudios han demostrado que la selección de los GCMs es una decisión que más bien contribuye a la dispersión de resultados en la cadena de modelación (Chen et al., 2011; Vidal et al., 2016), surgiendo la necesidad de desarrollar estrategias robustas que permitan evaluar y seleccionar GCMs adecuados para reducir la dispersión de sus proyecciones. Una aproximación comúnmente utilizada es el cálculo de métricas que permitan identificar qué modelos representan adecuadamente la variable observada (Di Virgilio et al., 2022; Zhang et al., 2018). No obstante, la aplicación de este enfoque tiene importantes dificultades debido a que el mejor modelo dependerá de las características del dominio de estudio y las métricas de evaluación aplicadas (Karmalkar et al., 2019; Notz, 2015), siendo la elección de estas últimas un paso crucial en la clasificación y selección del GCM. A pesar de lo anterior, los GCMs presentan la desventaja de poseer una baja resolución espacial (100-400 km), por lo que, no proporcionan una representación precisa de la variable de análisis a nivel local (Fowler et al., 2007).

Para solucionar esto, se utiliza un proceso llamado *downscaling*, que regrilla las proyecciones climáticas a resoluciones más finas (Maraun, 2016). Existen diferentes maneras de ejecutar este proceso para mejorar la resolución espacial de los GCM, siendo los SDM los más recurrentes por las ventajas computacionales que ofrecen (Hakala et al., 2019), tales como *Scaling*, *Quantile Mapping*, *Quantile Delta Mapping*, entre otros (Cannon et al., 2015; Ines & Hansen, 2006; Jakob Themeßl et al., 2011). Si bien en el último Balance Hídrico de Chile (2017) se han seleccionado los GCMs y SDMs para representar la temperatura y precipitación futura (DGA, 2017, 2018); a la fecha, no se han encontrado estudios que exploren qué GCM y qué SDM específico representan mejor la proyección del BC atmosférico en Chile, sobre todo en cuencas nivales afectas a la emisión de contaminantes atmosféricos.

Otro enfoque para evaluar estas proyecciones de BC atmosférico es mediante el tráfico vehicular, donde distintos estudios han demostrado la dependencia en su magnitud como fuente de emisión (Cereceda-Balic et al., 2018; Gramsch et al., 2020; Ruggeri et al., 2024). Investigaciones internacionales como nacionales han usado estadísticas de vehículos en conjunto con la evolución de las normativas EURO de los vehículos para estimar las concentraciones de BC atmosférico de manera espaciotemporal (Dávila, 2015; Duarte, 2020; Osses, 2022; Y. Qin & Xie, 2012), detectando tendencias positivas. Asimismo, Ruggeri et al. (2024) en Portillo (Chile), mostraron que el tráfico vehicular en el área de estudio es el primera fuente de emisión del BC en la atmósfera local mediante un modelo de regresión estadístico.

Motivado por lo anterior, este estudio busca realizar una estimación retrospectiva (2006-2022) de las concentraciones de BC en la nieve superficial y BC atmosférico, para luego generar predicciones (2023-2035) espaciotemporales del BC atmosférico. Esto se llevará a cabo mediante un modelo de transferencia radiativa, datos de modelos climáticos globales y modelos estadísticos en los meses de mayor presencia de nieve en la cuenca Estero Juncalillo (junio a octubre), ubicada sobre la Cordillera de los Andes. Esta zona alberga la carretera CH-60, la cual presenta el paso fronterizo con el mayor tráfico vehicular entre la frontera Chile-Argentina y, por ende, una de las principales fuentes en emitir BC atmosférico sobre la nieve (Cereceda-Balic et al., 2018; Ruggeri et al., 2024). El estudio inicialmente evaluará las estimaciones espaciotemporales de las CBCS, basado en el modelo ART (Kokhanovsky et al., 2005) y distintos productos derivados de MODIS (2006-2022). En segundo lugar se desarrollará un modelo estadístico para determinar el BC atmosférico de manera espaciotemporal a partir de las CBCS del modelo ART obtenidas y mediante formulaciones empíricas de modelos de: velocidad de depositación seca de partículas de Chen et al. (2012) y de la densidad de la nieve superficial de Anderson (1976) en la zona de estudio entre 2006-2022. Para, en tercer lugar, proyectar escenarios futuros de BC atmosférico: 1) empleando GCMs del CMIP5 mediante SDMs, y 2) mediante el incremento de tráfico en la carretera CH-60 con relaciones estadísticas. Este estudio tiene, entonces, como objetivos responder las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuán mayor es el impacto radiativo de las CBCS en las zonas cercanas a la carretera respecto a zonas más alejadas? ¿Cuál es la variación espacial y temporal del BC con la altura y con la distancia a la fuente de emisión? ¿Cuál GCM y SDM es capaz de pronosticar el BC atmosférico en una cuenca nival andina con fuentes de emisión de vehículos? ¿Es previsible un incremento de las concentraciones de BC atmosférico emitido por la carretera en la cuenca para los próximos 13 años?

2 Materiales y Metodología

2.1 Zona de estudio

La zona de estudio corresponde a la cuenca Estero Juncalillo (32.81°S, 70.12°O) situada en la región de Valparaíso, Chile (**Figura 1a,b**) y ubicada dentro de la Cuenca del Aconcagua, la cual es fundamentalmente importante para los ecosistemas, generación eléctrica y suministro de agua para el consumo humano (Webb et al., 2020). El área de estudio cuenta con un total de 83.4 km² y un rango de elevaciones entre los 2200-4700 msnm (**Figura 1c**), y está conformada por: el Río Juncalillo, Laguna del Inca (1.5 km²) y principalmente glaciares rocosos. La orografía de montaña modula el clima de la zona, caracterizado por un clima mediterráneo frío y tundra de lluvia invernal (Sarricolea et al., 2017). Esta región experimenta una temporada de verano caliente y seca, mientras que el invierno es frío y lluvioso, influenciado por frentes fríos (Falvey & Garreaud, 2007). La estación nivometeorológica "Portillo" (3027 msnm, **Figura 1b**) manejada por la Dirección General de Aguas (DGA, <https://snia.mop.gob.cl/> (accedido el 25 de junio de 2023)), presenta una temperatura anual promedio de 5.2 °C (2006–2022), con una temperatura mensual promedio mínima (máxima) en invierno (verano) de -0.8 °C (11.3°C) (**Figura 1d**). En consecuencia, estas bajas temperaturas en invierno en conjunto con las precipitaciones generan nevadas en volumen significativo, alcanzando hasta 60 cm de altura en promedio (2013–2022) y una marcada estacionalidad desde junio a octubre (**Figura 1d**). El manto nival se derrite al aumentar las temperaturas en el estiaje, el cual sirve como suministro de agua para los ríos de la zona (Masiokas et al., 2020).

El área de estudio presenta la carretera CH-60 – Paso Internacional Los Libertadores que la atraviesa de oeste a este (**Figura 1b**), la cual es relevante en los niveles de BC atmosférico y deposicional en la nieve, dependientes de la cantidad de vehículos que la atraviesan (Cereceda-Balic et al., 2018; Ruggeri et al., 2024). Este tráfico varía durante el año, con una menor cantidad en invierno, debido al cierre del paso fronterizo entre 35-45 días en promedio por las nevadas; mientras que en verano se presenta el mayor flujo vehicular debido a condiciones climáticas óptimas y turismo (Manterola, 2009). Esto se corrobora con las estadísticas del tráfico vehicular de la carretera CH-60 (<https://www.aduana.cl/> (accedido el 25 de junio de 2023)) entre 2006-2022, mostrando que en junio (enero) se presenta un 5.0% (13.0%) del Porcentaje medio mensual del Tráfico Total Anual (AMPATT, *Average Monthly Percentage of Annual Total Traffic*) (**Figura 1d**). Además, este cruce se configura como el primer paso fronterizo terrestre con mayor flujo vehicular entre Chile y Argentina, concentrándose el 24% del transporte total de vehículos en el territorio nacional (Manterola, 2009). Además, se vuelve relevante su estudio, debido al aumento desde 200 hasta 900 mil unidades en la cantidad total de vehículos entre 2006-2017, conformado principalmente por autos y camiones (**Figura 1e**).

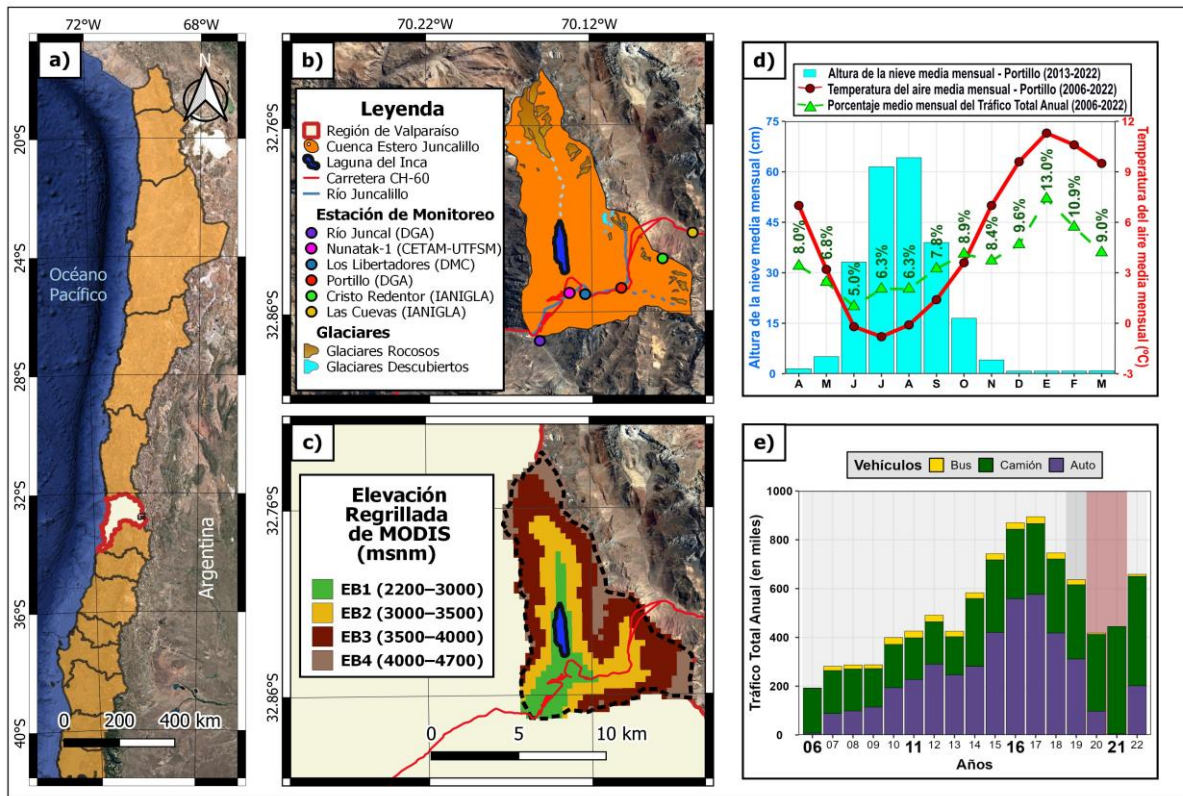


Figura 1. Mapa de ubicación de la cuenca Estero Juncalillo. a) Ubicación de la zona de estudio en Chile y Sudamérica. b) Bordes de la zona de estudio, incluyendo estaciones meteorológicas, glaciares, río, laguna y carretera. c) Mapa de bandas de elevación (EB, Elevation Band) regrillada de MODIS de la zona de estudio. d) Variabilidad interanual de la altura de la nieve y temperatura del aire de la estación Portillo; y Porcentaje medio mensual del Tráfico Total Anual de la carretera CH-60. e) Serie del Tráfico Total Anual (en miles) por tipo vehículo desde 2006-2022.

2.2 Datos

2.2.1 Datos meteorológicos, datos atmosféricos y forzantes meteorológicas grilladas

Seis estaciones de monitoreo (principalmente meteorológicas) se encuentran localizadas dentro de la cuenca (**Figura 1b**). Río Juncal y Portillo son administradas por la DGA; Cristo Redentor y Las Cuevas son manejadas por el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA, <https://www.ianigla.mendoza-conicet.gov.ar> (accedido el 20 de febrero de 2023)); y Los Libertadores es dirigida por Dirección Meteorológica de Chile (DMC; <https://www.meteochile.gob.cl> (accedido el 25 de junio de 2023)); y todas juntas proveen información horaria meteorológica de la cuenca, como datos temperatura del aire (T) y humedad relativa (RH). Adicionalmente, Portillo mide la altura de nieve (h_{snow}). Por último, es importante recalcar la presencia del Laboratorio-Refugio Nunatak-1 (Nunatak-1), perteneciente al Centro de Investigaciones Ambientales (CETAM-UTFSM). El Nunatak-1 se encuentra en las instalaciones de la Escuela de Montaña del Ejército de Chile, con el fin de recopilar información para el estudio del impacto de la contaminación ambiental en la criósfera, a través del registro del BC atmosférico (Ruggeri et al., 2024). Las características de las estaciones y datos usados en este estudio se encuentran en **Tabla 1**.

Tabla 1. Descripción de estaciones de monitoreo utilizadas en el estudio.

ID	Estación de monitoreo	Ubicación Lon/Lat	Altura (msnm)	Institución	Frecuencia	Periodo	Variables utilizadas
E1	Rio Juncal (*)	-70.15 ^o , -32.87 ^o	2229	DGA	Horaria	2015-2022	T, RH
E2	Nunatak-1 (**)	-70.13 ^o , -32.84 ^o	3000	CETAM-UTFSM	Mensual	2017-2019	$BC_{atm,OBS}$
E3	Los Libertadores	-70.12 ^o , -32.85 ^o	2951	DMC	Horaria	2012-2022	T, RH
E4	Portillo	-70.1 ^o , -32.84 ^o	3027	DGA	Horaria	2006-2022	T, RH, h_{snow}^{***}
E5	Cristo Redentor	-70.07 ^o , -32.83 ^o	3814	IANIGLA	Horaria	2018-2022	T, RH
E6	Las Cuevas	-70.05 ^o , -32.81 ^o	3182	IANIGLA	Horaria	2018-2022	T, RH

(*) Estación meteorológica y fluviométrica.

(**) Estación meteorológica y monitoreo ambiental.

(***) Solo hay datos disponibles de h_{snow} desde 2013-2022.

Para explorar la velocidad de depositación seca de las partículas en la zona de estudio, se requiere las forzantes meteorológicas grilladas asociadas a la velocidad del viento (WV), T, y RH. La WV es estimada usando la aproximación estadística de Sanllehi (2023), derivada de los valores extraídos del Explorador de Energía Eólica (Muñoz et al., 2018) (<https://eolico.minenergia.cl/>, (accedido el 1 de diciembre de 2022)) y la elevación del DEM regrillado. Para espacializar los datos de la T, se distribuyen espacialmente usando gradientes adiabáticos mensuales de temperatura, estimado a nivel horario considerando las estaciones E1, E4 y E5 de la **Tabla 1 (Figura B1a, ver Anexo B)**. La misma metodología fue usada para RH pero mediante la estimación de la temperatura de rocío (T_d) usando la ecuación de August-Roche-Magnus (Alduchov & Eskridge, 1996). Luego de calculados los gradientes con T_d (**Figura B1b, ver Anexo B**), RH es calculado nuevamente. Información faltante de las estaciones con ID E1 y E4 fue rellenada con E3, mientras que E5 fue rellenada con E6 de la **Tabla 1** mediante regresiones lineales mensuales, estimadas a nivel horario.

2.2.2 Productos Satelitales

Para el logro de los objetivos propuestos en este estudio se usará un conjunto de productos MODIS V061 para el periodo 2006-2022 con una resolución temporal diaria. Se emplearon aquellos que estuviesen relacionados con productos de la nieve (MOD10A1), reflectancia superficial (MOD09GA) y el tamaño de grano de la nieve (MCD19A3D). Estos productos fueron descargados mediante el paquete MODISp (Busetto & Ranghetti, 2016). Además, se utilizará el modelo digital de elevación (DEM, *Digital Elevation Model*) SRTMGL1 v003 proveniente del *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). En todos los casos la resolución espacial (R.E.) varió por producto entre los 30 - 1000 m, razón por la cual se resampleó (regrilló con el método bilineal) a los productos con una R.E. mayor (menor) a la escala de trabajo de este estudio que se definió como 500 m (R.E. mínima de productos MODIS usados). Para mayor detalle de las características de las variables utilizadas en este estudio, referirse a **Tabla 2**.

Tabla 2. Productos MODIS utilizados en el presente estudio

Satelite	Producto	Abreviación	Variable	R.E. (m)	Unidad	Referencia
MODIS	MOD10A1/ MYD10A1	NDSI	NDSI Cobertura Nival	500	%	(Hall & Riggs, 2021)
MODIS	MOD09GA	R ₂	Reflectancia superficial banda 2	500	-	(Vermote & Wolfe, 2021)
		R ₃	Reflectancia superficial banda 3			
		R ₄	Reflectancia superficial banda 4			
MODIS	MOD09GA	VAA	Ángulo azimut sensor	500	°	(Vermote & Wolfe, 2021)
		VZA	Ángulo cenital sensor			
		SAA	Ángulo azimut solar			
		SZA	Ángulo cenital solar			
MODIS	MOD10A1/ MYD10A1	ALB	Albedo de la Nieve	500	-	(Hall & Riggs, 2021)
MODIS	MCD19A3D	SGS	Tamaño del grano de nieve	1000	mm	(Lyapustin & Wang, 2022)
SRTM	SRTMGL1 v003	DEM	Modelo Digital de Elevación	30	m	(Farr et al., 2007)

2.2.3 Productos de Modelos Climáticos Globales

El análisis de las tendencias futuras del BC atmosférico en la zona de estudio se realiza mediante las salidas de los modelos del proyecto internacional CMIP5, las cuales desempeñan un papel fundamental para caracterizar como podría evolucionar el clima y los aerosoles en respuesta a influencias naturales y humanas (Vidal et al., 2016). Este proyecto utilizó alrededor de 40 GCMs desarrollado por diferentes instituciones científicas (Taylor et al., 2012). En el presente estudio, la selección de estos modelos se fundamenta en los siguientes criterios: presencia de la variable “concentración superficial del BC atmosférico” (SCONCBC), información disponible para el periodo retrospectivo (2006-2022) y pronóstico (2023-2035) y, presencia del *ensemble* r1i1p1. Estos criterios permitieron escoger 15 GCMs finales del CMIP5 (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/>, (accedido el 20 de enero de 2022)) descritos en la **Tabla 3**. Por otro lado, CMIP5 explora diferentes trayectorias de emisiones llamadas RCP (*Representative Concentration Pathway*), presentando un total de 4 escenarios RCP 2.6 (4.5, 6.0, y 8.5), donde el número representa el forzamiento radiativo ($W m^{-2}$). Entre estos, se estudian solo las trayectorias RCP 4.5 y 8.5, ya que, son los más comúnmente utilizados (Madeira, 2022). Finalmente, se selecciona el escenario RCP 4.5 por sobre RCP 8.5, porque sus trayectorias de BC atmosférico son mayores (**Figura B2, ver Anexo B**), lo cual ha sido observado en otros estudios en Chile. La variabilidad espacial de cada GCM en el área de estudio puede ser revisada en la **Figura B3 (ver Anexo B)**.

Tabla 3. Descripción de GCMs utilizados en este estudio para la SCONCBC

Modelo	Institución (País) (*)	Resolución espacial	
		Longitud (°)	Latitud (°)
ACCESS1-0	CAWCR (Australia)	1.88	1.25
CanESM2	CCCma (Canada)	2.81	2.77
CSIRO-Mk3.6.0	CSIRO-QCCCE (Australia)	1.88	1.85
GFDL-CM3	GFDL (Estados Unidos)	2.50	2.00
HadGEM2-CC	MOHCCP (Reino Unido)	1.88	1.25
HadGEM2-ES	MOHCCP (Reino Unido)	1.88	1.25
IPSL-CM5A-LR	IPSL (Francia)	3.75	1.89
IPSL-CM5A-MR	IPSL (Francia)	2.50	1.27
IPSL-CM5B-LR	IPSL (Francia)	3.75	1.89
MIROC-ESM-CHEM	AORI, NIES, JAMSTEC (Japón)	2.81	2.77
MIROC-ESM	AORI, NIES, JAMSTEC (Japón)	2.81	2.77
MIROC5	AORI, NIES, JAMSTEC (Japón)	1.41	1.39
MRI-CGCM3	MRI (Japón)	1.12	1.11
NorESM1-M	NorClim (Noruega)	2.50	1.89
NorESM1-ME	NorClim (Noruega)	2.50	1.89

(*) El significado completo y detallado de cada institución se puede revisar en **Tabla B1 (ver Anexo B)**.

2.2.4 Tráfico Vehicular

Otro enfoque para analizar las tendencias futuras del BC atmosférico es utilizando datos de tráfico vehicular ya que, estudios previos desarrollados en la misma zona de estudio han encontrado una alta correlación para representar el BC atmosférico (Cereceda-Balic et al., 2018; Ozdemir et al., 2014; Ruggeri et al., 2024). Se utilizan las estadísticas de tráfico terrestre de la carretera CH-60 del Servicio Nacional de Adunas entre 2006-2022, poseyendo información diaria de la cantidad de vehículos (autos, buses y camiones) que ingresan y salen del país por esta vía terrestre. Se trabajó principalmente con dos variables: El Tráfico Total Mensual (MTT, *Monthly Total Traffic*) y el Tráfico Total Anual (ATT, *Annual Total Traffic*).

2.3 Metodología

La **Figura 2** y **Figura 3** presenta un esquema resumen que abarca los datos usados, métodos, y resultados de la investigación para brindar al lector una organización conceptual simple y clara de los procedimientos utilizados. El primer procedimiento consistió en realizar una estimación retrospectiva de las CBCS acumuladas con el modelo ART ($CBCS_{acum,ART}$, 2006-2022). Para esto se detectaron los píxeles con presencia de nieve con el producto NDSI (MOD10A1, **Tabla 2**); luego se estimaron las $CBCS_{acum,ART}$ con productos de reflectancia superficial y datos geométricos (MOD09GA, **Tabla 2**); y se comparó los resultados con el índice de impurezas, calculado con productos de reflectancia superficial (Chen et al., 2021). Adicionalmente, se calcula la disminución porcentual del albedo de la nieve por efecto de las CBCS. Los detalles particulares son dados en la sección 2.3.1. El segundo procedimiento fue generar un modelo estadístico para estimar de manera retrospectiva el BC atmosférico ($BC_{atm,RCT}$, 2006-2022). Este modelo requiere como inputs principales la diferencia diaria de las CBCS acumuladas del modelo ART ($\Delta CBCS_{acum,ART}$) y dos modelos empíricos: la densidad de la nieve que depende del Albedo de la Nieve (MOD10A1, **Tabla 2**) y la velocidad de depositación seca de partículas obtenida de forzantes meteorológicas (sección 2.2.3). Los resultados son validados con el $BC_{atm,OBS}$. Los aspectos específicos son abordados en la sección 2.3.2.

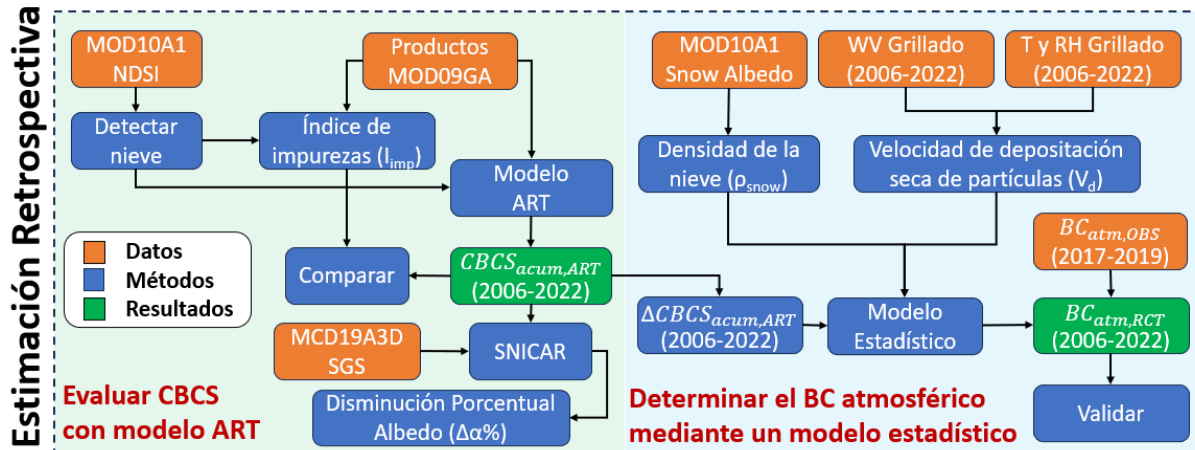


Figura 2. Esquema resumen para estimar retrospectivamente (2006-2022) las CBCS y el BC atmosférico.

El último procedimiento aborda la proyección de dos escenarios de BC atmosférico (2023-2035). Durante esta proyección, se consideraron dos escenarios con la finalidad de comparar la disminución del BC atmosférico por efecto de las tendencias de cambio climático del CMIP5 o aumento por efecto del incremento del tráfico vehicular en la carretera CH-60. El primer escenario consiste en predecir la proyección del BC atmosférico mediante de GCMs con SDMs para escenarios de cambio climático ($BC_{FUT,GCM}$, desarrollado en la sección 2.3.3.1). Para esto se comparan los GCMs (**Tabla 3**) con diversas métricas de evaluación, seleccionando el mejor GCM. Luego, a este se le aplican SDMs entre 2006-2022 con los datos de $BC_{atm,RCT}$. Este valor, se compara con métricas de evaluación y se selecciona el mejor SDM. Como paso final, se calcula el valor futuro ($BC_{FUT,GCM}$) con las proyecciones del GCM seleccionado (2023-2035) y el mejor SDM. El segundo escenario trata de predecir el BC atmosférico mediante el incremento del tráfico vehicular en la carretera CH-60 ($BC_{FUT,VEH}$, efectuado en la sección 2.3.3.2). Para esto, primero se calcula la pendiente grillada de los modelos lineales entre $BC_{atm,RCT}$ y el MTT (sección 2.2.5). Luego, se proyecta el ATT futuro (2023-2035) con la metodología del Manual de Carreteras. Para obtener MTT futuro, ATT futuro se multiplica por el AMPATT (**Figura 1d**). Por último, el $BC_{FUT,VEH}$ se obtiene mediante la multiplicación de la pendiente grillada de los modelos lineales, ATT futuro y AMPATT.

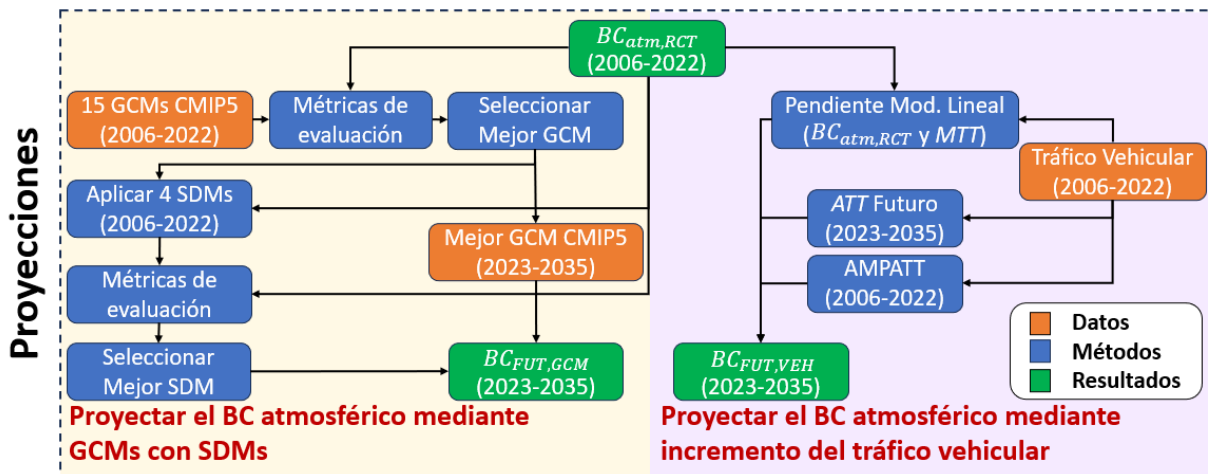


Figura 3. Esquema resumen para proyectar el BC atmosférico (2023-2035) mediante un escenario de cambio climático y uno de incremento de vehículos.

2.3.1 Estimación retrospectiva de las CBCS mediante el modelo ART

2.3.1.1 Cobertura Nival

La determinación de los píxeles con nieve fue el primer paso para simular las CBCS. Por ende, en este estudio, usamos el algoritmo de Cornwell (2012) para identificar los píxeles cubiertos con nieves mediante el producto NDSI Cobertura Nival de MOD10A1/MYD10A1 (**Tabla 2**), el cual ha sido ampliamente aplicado alrededor del mundo y los Andes (Fugazza et al., 2021; Malmros et al., 2018; Mattar et al., 2022; Rößler et al., 2021). Chávez et al. (2021) determinó un umbral $NDSI > 0.5$ para detectar los píxeles con nieve y no nieve en el Volcán Mocho-Choshuencho ($40^{\circ}S$), localizado en los Andes Chilenos. Por lo que en esta investigación todos los píxeles identificados con $NDSI > 0.5$ (≤ 0.5) son definidos con nieve (no nieve), asignándole un valor de 1 (0), y generando mapas diarios de cobertura nival con R.E. de 500×500 m. Además, la estación nivometeorológica Portillo muestra que los meses con mayor altura de la nieve se encuentran en los meses de junio a octubre (**Figura 1d**), por lo que nuestros análisis se concentrarán en dicho periodo para estimar las CBCS, siempre que se identifique la presencia de nieve en los píxeles mediante el producto NDSI de MODIS.

2.3.1.2 Parámetros y Algoritmo del Modelo ART

El modelo ART es un modelo simplificado de transferencia radiativo desarrollado por Kokhanovsky y Zege (Kokhanovsky & Zege, 2004) que utiliza datos de la reflectancia superficial en el rango visible e infrarrojo cercano y datos geométricos del sol como satélite. El modelo permite una estimación de las propiedades del manto nival a escala regional y global, como el tamaño de grano de la nieve (α_{ef}). Los autores han realizado distintas validaciones y correcciones paramétricas mediante el modelo ART y ha sido aplicado exitosamente en los Himalayas, Japón y China (Kokhanovsky et al., 2005; Negi & Kokhanovsky, 2011), con semejanzas significativas con los datos recolectados en terreno (Kokhanovsky et al., 2011; Zhang et al., 2023; Zheng et al., 2022). El modelo es conciso, eficiente y flexible al usar los principios de la óptica geométrica para calcular las características ópticas individuales de los granos de nieve y entonces usar un análisis asintótico para obtener la solución analítica del modelo de transferencia radiativo. Para cada píxel, el modelo ART utiliza R_2 y R_3 del producto MOD09GA (**Tabla 2**) para estimar los valores diarios de la concentración de BC acumulado en la nieve ($CBCS_{acum,ART,R}$) y α_{ef} de la siguiente forma:

$$R_2 = R_0(\mu, \mu_0, \varphi) \cdot \exp \left[-\frac{4 f(\mu, \mu_0, \varphi)}{\sqrt{3(1-g)}} \sqrt{\alpha_{ice,2} \cdot \beta \cdot \kappa \cdot \alpha_{ef} + \frac{2}{3} B^* \cdot \alpha_{s,2} \cdot CBCS_{acum,ART,R} \cdot \alpha_{ef}} \right] \quad (1)$$

$$R_3 = R_0(\mu, \mu_0, \varphi) \cdot \exp \left[-\frac{4 f(\mu, \mu_0, \varphi)}{\sqrt{3(1-g)}} \sqrt{\frac{2}{3} B^* \cdot \alpha_{s,3} \cdot CBCS_{acum,ART,R} \cdot \alpha_{ef}} \right] \quad (2)$$

Donde $R_0(\mu, \mu_0, \varphi)$, $f(\mu, \mu_0, \varphi)$, $\alpha_{s,i}$, $\alpha_{ice,2}$ son ecuaciones descritas en la **Tabla 4**. Mientras que g , β , κ , B^* son parámetros, y s , s_0 , μ , μ_0 , φ son variables, las cuales se describen en la **Tabla 5**.

Tabla 4. Ecuaciones usadas del modelo ART adaptadas de Negi & Kokhanovsky, (2011).

Nombre	Ecuación	Unidad
Función reflexión de la capa de nieve semi-infinita	$R_0(\mu, \mu_0, \varphi) = \frac{A + B(\mu + \mu_0) + C\mu\mu_0 + P(\theta)}{4(\mu + \mu_0)}$	-
Función de fase	$P(\theta) = 11.1e^{(-0.087\theta)} + 1.1e^{(-0.014\theta)}$	-
Ángulo de dispersión	$\theta = \cos^{-1}(-\mu \cdot \mu_0 + s \cdot s_0 \cdot \cos(\varphi))$	°
Reflectancia de la capa de nieve semi-infinita no absorbente	$f(\mu, \mu_0, \varphi) = \frac{u(\mu_0) \cdot u(\mu)}{R_0(\mu, \mu_0, \varphi)}$	-
Función escape	$u(\mu_0) = \frac{3}{7}(1 + 2\mu_0)$ $u(\mu) = \frac{3}{7}(1 + 2\mu)$	-
Coefficiente de Absorción del BC	$\alpha_{s,i} = \frac{4\pi\chi_s(\lambda)}{\lambda_i}$	mm ⁻¹
Coefficiente de Absorción de los cristales de hielo	$\alpha_{ice,2} = \frac{4\pi\chi_{ice}(\lambda)}{\lambda_2}$	mm ⁻¹

Tabla 5. Parámetros y variables usadas del modelo ART. Parámetros usados según Zheng et al. (2022).

Nombre	Fórmula/Sigla	Unidad	Valor
Concentración acumulada de BC en la nieve	$CBCS_{acum,ART,R}$	ng g ⁻¹	Variable salida
Tamaño de grano de la nieve	α_{ef}	mm	Variable salida
Parámetro de Asimetría	g	-	0.76
Constante del índice de refracción del hollín	B^*	-	0.84
Probabilidad de absorción de fotón	β	-	0.47
Parámetro de forma de las partículas	κ	-	2.63
Constante 1 de Parametrización de R_0	A	-	1.247
Constante 2 de Parametrización de R_0	B	-	1.186
Constante 3 de Parametrización de R_0	C	-	5.157
Índice de refracción del BC	$\chi_s(\lambda)$	-	0.46
Índice de refracción del hielo	$\chi_{ice}(\lambda)$	-	8.3·10 ⁻⁸
Longitud de onda banda 2 de MODIS	λ_2	mm	865·10 ⁻⁶
Longitud de onda banda 3 de MODIS	λ_3	mm	460·10 ⁻⁶
Coseno de VZA	$\mu = \cos(VZA)$	-	Variable entrada
Coseno de SZA	$\mu_0 = \cos(SZA)$	-	Variable entrada
Seno de VZA	$s = \sin(VZA)$	-	Variable entrada
Seno de SZA	$s_0 = \sin(SZA)$	-	Variable entrada
Azimut Relativo	$\varphi = SAA - VAA$	°	Variable entrada

Ingresando todos las ecuaciones, parámetros y variables dentro del modelo ART, se simula las $CBCS_{acum,ART,R}$ por cada píxel con presencia de nieve con una resolución espacial de 500x500 m. Estos resultados muestran valores puntuales sobre los 2000 ng g⁻¹, relativo a errores en la detección de reflectancia superficial del satélite (Vermote & Kotchenova, 2011). Adicionalmente, no se han detectado CBCS tan altas en los Andes Chilenos (Cereceda-Balic et al., 2022; Cordero et al., 2022; Rowe et al., 2019). Por lo anterior, eliminamos todos los valores mayores a dicho umbral. Luego, se le aplica una media móvil central de orden 7 (CMA-7, 7-Day Centered Moving Average), con el objetivo de reducir el ruido de los datos e identificar sus tendencias. Estos valores finales de BC acumulado en la nieve filtrados lo definimos como $CBCS_{acum,ART}$. Para mayor detalle de este preprocesamiento, revisar **Figura B4 (ver Anexo B)**.

2.3.1.3 Comparación con índice de impurezas

La evolución del contenido de LAPs en la nieve puede ser estimada desde las observaciones satelitales, explorando la alta sensibilidad del albedo por el contenido de impurezas en el espectro visible. Sin embargo, esta alta sensibilidad es también modulada por el tamaño de granos de la nieve, el cual varía espaciotemporalmente. Para resolver esta problemática Dumont et al. (2014) introdujeron el índice de impurezas (I_{imp}). Este índice adimensional varía entre 0.1 (CBCS = 0 ng g⁻¹) a 1.1 (CBCS = 2000 ng g⁻¹), el cual incrementa por el contenido de LAPs y es casi insensible al tamaño de granos de la nieve (**Figura B5, ver Anexo B**). Distintos estudios han mostrado que este índice tiene una alta correlación con las LAPs, obteniéndose buenos resultados en su evaluación (Chen et al., 2021; Dumont et al., 2014). Esto muestra una manera de comparar las estimaciones retrospectivas de las $CBCS_{acum,ART}$ con el I_{imp} con la finalidad de verificar cuan bien es capaz de detectar los cambios por efecto de las CBCS. Este índice utiliza la R_2 y R_4 asociado al producto MOD09GA (**Tabla 2**) para calcular el I_{imp} de la siguiente forma:

$$I_{imp} = \frac{\ln(R_4)}{\ln(R_2)} \quad (3)$$

El índice se considera válido cuando los píxeles presenten nieve y los valores se encuentren dentro del rango validez del índice de impurezas (**Figura B5, ver Anexo B**).

2.3.1.4 Disminución Porcentual del Albedo de la Nieve

Distintos estudios internacionales como nacionales muestran la disminución porcentual del albedo de la nieve debido al efecto de las CBCS acumuladas depositadas en el pack de nieve medido con datos de terreno (Cordero et al., 2022; Gilardoni et al., 2022; Kang et al., 2020; Niu et al., 2017; Rowe et al., 2019). Esta disminución se calcula restando el albedo de nieve limpia (α_{clean}) con el albedo de nieve sucia (α_{dirty}) y dividiendo la diferencia por α_{clean} , los cuales son generalmente estimados con el modelo el modelo radiativo SNICAR (Cordero et al., 2022; Skiles & Painter, 2017; Zheng et al., 2022). Para calcular el albedo de la nieve se varían los parámetros más sensibles del modelo radiativo: el tamaño de granos de la nieve y las $CBCS_{acum}$ (Beres et al., 2020; Huang et al., 2022). Para α_{clean} (α_{dirty}) se usa el tamaño de grano de nieve de MCD19A3D (**Tabla 2**), considerando $CBCS_{acum} = 0$ ($CBCS_{acum}$ obtenidas del modelo ART). Los otros parámetros usados de SNICAR se consideran constantes (**Tabla B2 y Figura B6, ver Anexo B**). Cada píxel representa el promedio mensual de los valores diarios analizados en el periodo 2006-2022, delimitados al momento en que los píxeles presentaban nieve.

2.3.2 Estimación retrospectiva del BC atmosférico mediante un Modelo Estadístico

El impacto del BC atmosférico que se deposita en la criósfera varía globalmente debido a diferencias en el proceso de transporte, haciendo que la distribución espacial y temporal del BC sea heterogénea (Gogoi et al., 2016). La modelación espacial y temporal de la depositación seca de partículas dependen fuertemente de forzantes meteorológicas, las cuales pueden ser usadas para tener un mejor entendimiento del comportamiento de las CBCS y poder estimar el BC atmosférico (Chen et al., 2012; Lapere et al., 2023; Vong et al., 2010). Para este estudio se plantea un modelo estadístico para estimar de manera retrospectiva el BC atmosférico. Este es construido en función de formulaciones teóricas de distintos estudios, las cuales son descritas en función de BCD y $CBCS_{dep}$ definidas con sus respectivas variables en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Ecuaciones y variables de formulaciones teóricas.

Nombre	Ecuación	Unidad	Referencia
Depositación de BC en la nieve	$BCD = BC_{atm} \cdot V_d \cdot t$	$\mu\text{g m}^{-2}$	(Yasunari et al., 2010)
Concentración BC en la nieve depositado	$CBCS_{dep} = \frac{BCD}{\rho_{snow} \cdot h_{BC}}$	$\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} (\text{ng} \cdot \text{g}^{-1})$	(Beres et al., 2020)

Donde BC_{atm} representa el BC atmosférico ($\mu\text{g m}^{-3}$), V_d simboliza la velocidad de depositación seca de las partículas (m s^{-1}), t expresa el intervalo de tiempo (s), ρ_{snow} expresa la densidad de la nieve (kg m^{-3}), y h_{BC} simboliza el espesor de la capa de BC superficial en la nieve (m). Reemplazando BCD en la ecuación de $CBCS_{dep}$ de la **Tabla 6**, obtenemos la siguiente expresión en función de las $CBCS$ depositadas:

$$CBCS_{dep} = \frac{BC_{atm} \cdot V_d \cdot t}{\rho_{snow} \cdot h_{BC}} \quad (4)$$

Esta ecuación demuestra que las $CBCS_{dep}$ depende principalmente del BC_{atm} , ρ_{snow} , h_{BC} y V_d por cada intervalo de tiempo. En este contexto, con la finalidad de estimar las concentraciones de BC_{atm} distribuido en la cuenca, se analiza la física del proceso de las CBCS acumuladas ($CBCS_{acum}$). La nieve recién caída suele presentar una $CBCS_{acum} \approx 0$, debido al cierre del paso fronterizo ante nevadas. Bajo condiciones climáticas óptimas se permite la circulación de vehículos en la carretera, emitiendo BC_{atm} y eventualmente depositándose sobre la criósfera. Esto produce una acumulación de las CBCS en la capa superior del manto nival en el tiempo, siempre que no se produzcan nuevas nevadas. Si se considera un periodo de 24 horas entre el inicio y fin de un día, la acumulación de las CBCS se puede representar de la siguiente forma:

$$CBCS_{acum_{i+1}} = CBCS_{acum_i} + \sum_{h=1}^{24} CBCS_{dep} \quad (5)$$

Donde $CBCS_{acum_i}$ ($CBCS_{acum_{i+1}}$) son las CBCS acumulado al inicio (final) del día (ng g^{-1}) y $\sum_{h=1}^{24} CBCS_{dep}$ representa la depositación asociada al BC_{atm} emitido por los vehículos en 24 horas (ng g^{-1}). Despejando $CBCS_{acum_i}$ hacia la izquierda y reemplazando $CBCS_{dep}$ por la ecuación (4), considerando que en 24 horas las emisiones de BC_{atm} y la ρ_{snow} son constantes (aproximación de nuestro análisis) y t como h_{BC} son fijos, el modelo estadístico para determinar el BC_{atm} queda representado de la siguiente manera:

$$\Delta CBCS_{acum} = \frac{BC_{atm} \cdot t \cdot \sum_{h=1}^{24} V_d}{\rho_{snow} \cdot h_{BC}} \rightarrow BC_{atm} = \frac{\Delta CBCS_{acum} \cdot \rho_{snow} \cdot h_{BC}}{t \cdot \sum_{h=1}^{24} V_d} \quad (6)$$

El BC_{atm} puede ser representado mediante la diferencia de CBCS acumulado entre dos días ($\Delta CBCS_{acum}$) y las variables de la **Tabla 6**. El BC_{atm} reconstruido mediante este modelo estadístico y distribuido espaciotemporalmente mediante la ecuación (6) se define como $BC_{atm,RCT,R}$. La $\Delta CBCS_{acum}$ será estimada mediante la diferencia diaria entre las $CBCS_{acum,ART}$ obtenidas de la sección 2.3.2. Adicionalmente, puede suceder que $\Delta CBCS_{acum} < 0$, debido a nevadas que disminuyen la CBCS superficial, descartándose la estimación del $BC_{atm,RCT,R}$ para los días que cumplan dicha condición. Para estimar V_d , Chen et al. (2012) desarrolló un modelo matemático en Xinjiang (China) para describirla mediante un análisis de regresión, en función de WV , T , y RH . Otras investigaciones han estimado modelos empíricos para la velocidad de depositación seca de partículas en la nieve dependientes de estas variables meteorológicas (Emerson et al., 2018; Mori et al., 2020; Sinha et al., 2018). A continuación, se detalla la ecuación del estudio:

$$V_d = 1.755 + 0.717 \cdot WV - 0.005 \cdot HR - 0.037 \cdot T \quad (7)$$

Donde WV representa la velocidad del viento ($m \cdot s^{-1}$), HR la humedad relativa (%) y T la temperatura del aire ($^{\circ}C$), las cuales pueden ser estimados con los variables meteorológicas grilladas horarias de la sección 2.2.3. La ρ_{snow} puede ser aproximada mediante la formulación de Anderson (1976), quien desarrolló una expresión para el albedo en función de la densidad superficial de la nieve en Danville (Estados Unidos) en función de un modelo y datos de terreno. Si bien es un modelo empírico, este ha sido usado ampliamente en otros estudios internacionales (Boone, 2002; Lee et al., 2023). Como nos interesa determinar la densidad de la nieve, se muestra la ecuación en función del albedo, como se muestra a continuación:

$$\rho_{snow} = \frac{(0.417 + \sqrt{10.84 - 11.96 \cdot \alpha_{snow}}) \cdot 10^3}{5.98} \quad (8)$$

Donde α_{snow} representa el albedo de la nieve (-). Esta puede ser estimada mediante el producto Albedo de la Nieve del producto MOD10A1/MYD10A1 (**Tabla 2**). Por último, se considera un análisis temporal horario y $h_{BC} = 5$ (cm), el cual es plausible según otros estudios (Beres et al., 2020; Zhong et al., 2017). Ingresando todas las variables dentro del modelo estadístico de la ecuación (6), determinamos el $BC_{atm,RCT,R}$ por cada píxel con una resolución espacial de 500x500 m. Estas estimaciones son agregadas a nivel mensual, con el objetivo final de usarlas para aplicar un downscaling estadístico. El detalle para la obtención del $BC_{atm,RCT,R}$ para un año y un píxel se encuentra descrito en la **Figura B7 (ver Anexo B)**.

Un análisis más detallado del $BC_{atm,RCT,R}$ estimado a nivel mensual, mostró que los meses de inicio y fin de la temporada (junio y octubre) presentaban una cantidad sustancial de datos no disponibles (NA, *Not Available*), asociado principalmente a la presencia de nubes y deshielo temprano de temporada. Además, existían algunas escenas entre julio a septiembre que presentaban áreas específicas con datos NA, por los mismos motivos de antes. Para resolver la problemática, se procede a realizar los siguientes pasos como metodología de relleno. En primer lugar, se detecta cuáles de estas escenas mensuales presentan más del 50% de datos con NA. Solamente hubo dos meses que presentaron dicha condición en los 17 años: junio 2015 y octubre 2019 (2/85 meses). Estas escenas fueron rellenas con el promedio de la información disponible del año anterior y posterior del mismo mes de análisis. El segundo paso correspondió a identificar por cada escena mensual los píxeles con datos NA, resultando un total de 2000 píxeles (2.7% del total de píxeles). Estos fueron rellenos espacialmente con el promedio de sus vecinos cercanos, hasta que ya no existieran NA (**Figura B8, ver Anexo B**). Los valores finales del BC atmosférico reconstruido y relleno a nivel mensual lo definimos como $BC_{atm,RCT}$.

2.3.3 Proyecciones de BC atmosférico

Para evaluar el cambio en el BC atmosférico bajo los escenarios de cambio climático, se emplearon dos enfoques: 1) Se emplearon modelos del CMIP5 para el periodo 2023 – 2035 bajo el escenario RCP 4.5; 2) Se plantea un escenario de aumento de tráfico vehicular en la carretera CH-60 para el mismo periodo.

2.3.3.1 Escenario Cambio Climático: Downscaling Estadístico del BC atmosférico

En la **Tabla 3**, se mostraron una serie de modelos del CMIP5 que podrían ser empleados para este estudio. Para seleccionar el más adecuado, se procedió a evaluar la semejanza en magnitud y variabilidad temporal del $BC_{atm,RCT}$ con el entregado por estos GCMs para el periodo 2006-2022 (análisis retrospectivo) en los meses de junio a octubre. La evaluación se llevó a cabo mediante métricas como la correlación de Pearson (r_p , Glasser & Winter, 1961), que evalúa la correlación temporal entre variables; *Perkins Skills Score* (PSS, Perkins et al., 2007), que evalúa la distribución probabilística de la serie mensual; y *Past Performance Index* (PPI, Gateño et al., 2022) para evaluar el desempeño global de las métricas anteriores (**Tabla 7**).

Tabla 7. Métricas de evaluación utilizadas para seleccionar GCM y SDM.

Métrica de evaluación	Ecuación	Seleccionar	Rango	Referencias
Correlación de Pearson (*)	$r_p = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})}}$	GCM	[-1, 1]	(Glasser & Winter, 1961)
Perkins Skills Score (**)	$PSS = \sum_1^n \min(Z_o, Z_s)$	GCM	[0, 1]	(Perkins et al., 2007)
Past Performance Index	$PPI = 1 - \sqrt{(1 - r_p)^2 + (1 - PPS)^2}$	GCM	[-1.2, 1]	(Gateño et al., 2022)
Kling-Gupta Efficiency (***)	$KGE = 1 - \sqrt{(1 - r_p)^2 + (1 - \beta)^2 + (1 - \gamma)^2}$	SDM	[-∞, 1]	(Gupta et al., 2009)

(*) O_i y S_i representan los valores observados (BC_{RCT}) y simulados (BC del GCM o SDM), respectivamente; \bar{O} y \bar{S} simbolizan el promedio de los valores observados y simulados, respectivamente.

(**) n representa el número de intervalos utilizados para calcular la función de densidad de probabilidad para una región dada y Z_o (Z_s) es la frecuencia de valores observados (simulados) en un intervalo dado.

(***) $\beta = \frac{\bar{S}}{\bar{O}}$ y $\gamma = \frac{\sigma_S}{\sigma_O}$. Donde σ_o (σ_s) representa la desviación estándar observada (simulada)

Una vez seleccionado el modelo GCM con mejor desempeño ($BC_{GCM,select}$), se procede a realizar el downscaling estadístico mediante 4 SDMs (Cannon et al., 2015; Ines & Hansen, 2006; Jakob Themeßl et al., 2011) que se listan en la **Tabla 8**. En ellos se asume como dato real el $BC_{atm,RCT}$ y se aplican los métodos de downscaling al $BC_{GCM,select}$. El desempeño de esta desagregación se evalúa solo mediante la métrica Kling-Gupta Efficiency (KGE, Gupta et al., 2009), ya que se busca evaluar cuan bien se ajustan los SDMs a valores del $BC_{atm,RCT}$, en función de su correlación temporal, varianza y promedio (**Tabla 7**). Tras elegir el SDM con mejor desempeño, se estima la proyección del BC atmosférico mensual en 2023-2035 con dicho método, definido como $BC_{FUT,GCM}$.

Tabla 8. Descripción de Métodos de Downscaling Estadísticos utilizados en este estudio.

Métodos de Downscaling Estadísticos	Descripción	Referencias
Scaling Additive (SA)	Escala la simulación con la diferencia (aditiva) entre el promedio de lo observado y simulado en el periodo de entrenamiento.	(Ines & Hansen, 2006)
Scaling Multiplicative (SM)	Escala la simulación con la diferencia (multiplicativa) entre el promedio de lo observado y simulado en el periodo de entrenamiento.	(Ines & Hansen, 2006)
Empirical Quantile Mapping (EQM)	Este método está diseñado para corregir el sesgo, el cual consiste en ajustar la función de distribución acumulada (CDF) mediante la adición de los cambios medios individuales a los cuantiles observados.	(Jakob Themeßl et al., 2011)
Quantile Delta Mapping (QDM)	Este método está diseñado para corregir el sesgo, el cual consiste en ajustar CDF mediante la adición de los cambios medios individuales a los cuantiles observados.	(Cannon et al., 2015)

2.3.3.2 Escenario Vehículos: Incremento del tráfico para predecir el BC atmosférico

La segunda estrategia de evaluación consistió en estimar el BC atmosférico (2023-2035) en función del tráfico vehicular. Para ello se emplearon la base de datos del MTT en la carretera CH-60 (sección 2.2.5) para el periodo retrospectivo (2006-2022). Se generó una ecuación de regresión simple por cada mes del año y píxel entre el $BC_{atm,RCT}$ y MTT registrado en carretera CH-60, como se muestra a continuación:

$$BC_{RCT,p,m} = Slope_{p,m} \cdot MTT_m \quad (9)$$

Los subíndices p y m representan cada píxel de la cuenca y los meses de análisis, respectivamente. $Slope$ simboliza la pendiente de la regresión lineal ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\text{veh}^{-1}$). Una vez obtenidas los valores de estas ecuaciones, solo se requiere el Tráfico Total Mensual Futuro (MTT_{FUT}). Este puede ser estimado como el AMPATT por el Tráfico Total Anual futuro (ATT_{FUT} , **Figura 1d**). Para esto, se calcula la proyección del tráfico de la carretera CH-60 por cada tipo de vehículo, a partir de la metodología del Manual de Carreteras (MOP-DGOP-DV, 1997). Utilizando la siguiente ecuación:

$$Veh_i(t) = Veh_{i_0} \cdot (TC + 1)^{t-t_0} \quad (10)$$

Donde Veh_i corresponde a la cantidad total por vehículo, t corresponde al año de análisis, TC corresponde a la tasa de crecimiento, y el subíndice "0" indica la cantidad inicial del periodo de análisis. Una vez obtenida TC por cada tipo de vehículo, se calcula el tráfico total anual de vehículos futuros y se suman para obtener el ATT_{FUT} . El BC atmosférico futuro asociado a los vehículos ($BC_{FUT,VEH}$, 2023-2035) puede ser estimado entonces como la multiplicación entre $Slope$, AMPATT y ATT_{FUT} , como se muestra a continuación:

$$BC_{FUT,VEH,p,m,y} = Slope_{p,m} \cdot AMPATT_m \cdot ATT_{FUT,y} \quad (11)$$

Donde y simboliza cada año entre 2023-2035.

2.3.4 Tendencias de los escenarios de BC atmosférico

Para estudiar cómo ha evolucionado temporalmente el BC atmosférico a nivel agregado de la cuenca, se generan las series anuales y mensuales para tres escenarios analizados: retrospectivo ($BC_{atm,RCT}$, 2006-2022), proyecciones de cambio climático ($BC_{FUT,GCM}$, 2023-2035) e incremento de vehículos en la carretera CH-60 ($BC_{FUT,VEH}$, 2023-2035). Adicionalmente, se utiliza la Prueba de Tendencia de Mann-Kendall (MKTT, *Mann-Kendall Trend Test*) (Kendall, 1975; Mann, 1945) para detectar tendencias temporales de las variables analizadas. Una vez aplicada la MKTT, estos resultados son indicados si se presentó una tendencia negativa (TD (-)) o positiva (TD (+)), incluyendo su significancia con una confianza del 95%. Además, se calcula el estimador de pendiente de Thiel-Sen (TSEE, *Theil Sen's Slope Estimator*) (Sen, 1968) para obtener la magnitud de las tendencias de BC atmosférico por cada escenario.

3 Resultados y Discusión

3.1 Variación espaciotemporal de las CBCS con el modelo ART

Mediante el uso del modelo ART se pudo estimar las CBCS acumuladas ($CBCS_{acum}$) de forma continua en toda la cuenca. Para el análisis de las estimaciones se empleó un criterio por distancia. Aquellos píxeles cercanos a la carretera CH-60 con una distancia menor a 1 km, se les definió como NH (Near Highway) y aquellas alejadas, más allá de 1 km, como FH (Far Highway). Adicionalmente, se definió la razón NH/FH con el fin de conocer cuán mayor son las CBCS acumuladas cercanas a la carretera respecto a zonas alejadas. En la **Figura 4** se muestran las $CBCS_{acum}$ ($ng\ g^{-1}$), el índice de impurezas (-) y la disminución porcentual del albedo de la nieve ($\Delta\alpha\%$, %) debido al efecto de las $CBCS_{acum}$.

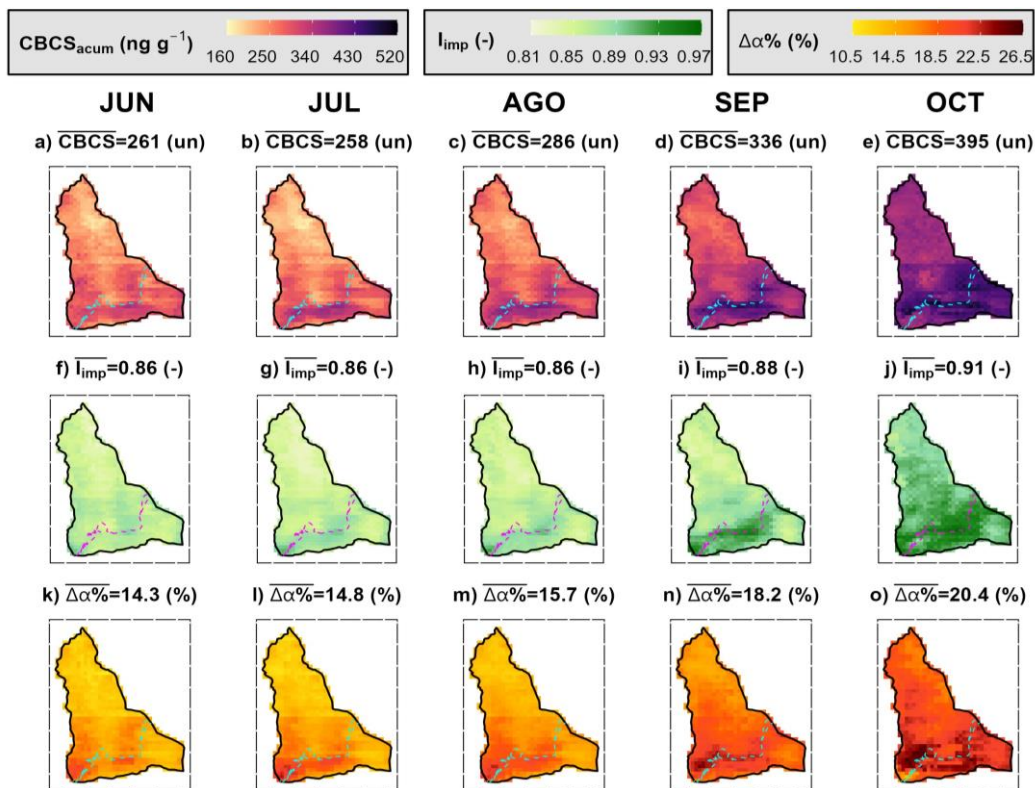


Figura 4. Variabilidad espaciotemporal de las variables $CBCS_{acum}$, I_{imp} , y $\Delta\alpha\%$. Cada columna representa los meses entre junio a octubre (JUN-OCT) y cada píxel representa el promedio mensual entre 2006-2022. La primera a tercera fila representan: (a-e) $CBCS_{acum}$, (f-j) I_{imp} , y (k-o) $\Delta\alpha\%$. El título de cada gráfico representa el promedio de cada variable agregado a nivel de cuenca. El texto (un) hace referencia a las unidades del título. La línea punteada muestra la carretera.

Respecto a las $CBCS_{acum}$ (**Figura 4a-e**), se muestra una variabilidad promedio entre $[160, 520]$ $ng\ g^{-1}$ entre JUN-OCT. Temporalmente se visualiza que CBCS son mínimas en los meses de JUN y JUL ($\overline{CBCS} = 258$ y $261\ ng\ g^{-1}$), meses donde se concentran las nevadas y hay una disminución de la cantidad de vehículos que circulan por la carretera CH-60 (**Figura 1d**). A medida que nos adentramos en la primavera hay un aumento promedio de las $CBCS_{acum}$ desde AGO ($\overline{CBCS} = 286\ ng\ g^{-1}$) hasta OCT ($\overline{CBCS} = 395\ ng\ g^{-1}$), concordante con una disminución de las precipitaciones sólidas, aumento del tráfico y mayor emisión de BC atmosférico.

Tabla 9. Promedios mensuales de las $CBCS_{acum}$, I_{imp} y $\Delta\alpha\%$ para las zonas NH, FH y razón NH/FH.

Mes	Indicador	$CBCS_{acum}$ (ng g ⁻¹) (*)	I_{imp} (-)	$\Delta\alpha\%$ (%)
JUN	NH	282	0.867	16.1
	FH	254	0.856	13.7
	NH/FH	1.11	1.01	1.18
JUL	NH	292	0.873	17.2
	FH	247	0.851	13.9
	NH/FH	1.18	1.03	1.23
AGO	NH	323	0.877	18.0
	FH	274	0.856	14.9
	NH/FH	1.18	1.02	1.21
SEP	NH	386	0.903	20.5
	FH	320	0.867	17.5
	NH/FH	1.20	1.04	1.17
OCT	NH	426	0.927	21.8
	FH	384	0.901	20.0
	NH/FH	1.11	1.03	1.09

(*) NH/FH es adimensional debido a que es una razón entre ambos valores.

Respecto al I_{imp} (**Figura 4f-j**), se observa una variabilidad entre [0.81, 0.97], mostrando un comportamiento espaciotemporal similar a las $CBCS_{acum}$ (**Figura 4a-e**), visualizándose un aumento en promedio del índice desde JUN ($\overline{I_{imp}} = 0.86$) hasta OCT ($\overline{I_{imp}} = 0.91$), por las mismas razones explicadas anteriormente. Para verificar la efectividad del modelo ART, se calculó la r_p a nivel mensual entre el I_{imp} y $CBCS_{acum}$ entre los años 2006-2022 en los meses de JUN-OCT por cada píxel. Los resultados muestran que se alcanzan valores de [0.61, 0.94], con un valor promedio agregado a nivel de cuenca ($\overline{r_p}$) de 0.88, comprobándose una alta correlación con el índice de impurezas (**Figura B9, ver Anexo B**). Acorde a la literatura, este índice ha sido utilizado anteriormente para verificar el desempeño de los LAPS, tal como el análisis en Xinjiang (China), donde encontraron una correlación con el I_{imp} de 0.68 (Chen et al., 2021). Respecto a $\Delta\alpha\%$ (**Figura 4k-o**), muestra un rango de variación en promedio entre [10.5, 26.5] %. En su distribución temporal, se observa que $\Delta\alpha\%$ es mínima en JUN ($\overline{\Delta\alpha\%} = 14.3$ %), alcanzando los máximos valores en OCT ($\overline{\Delta\alpha\%} = 20.4$ %), lo cual es concordante con una mayor $CBCS_{acum}$, debido a un mayor tiempo de la depositación de BC atmosférico en la nieve proveniente de los autos que circulan por la carretera CH-60 (**Figura 1d**).

Para analizar el efecto de la carretera en la cuenca, en la **Tabla 9** se muestra el cálculo de NH, FH y la razón NH/FH por cada mes. En todos los casos la razón NH/FH es mayor a la unidad para todos los meses, demostrando que la CBCS es mayor en las áreas más cercanas a la carretera CH-60. Por otra parte, en la primera columna de la **Tabla 9** se observa que las mayores $CBCS_{acum}$ se encuentran en la zona NH ([282, 426] ng g⁻¹) respecto a FH ([254, 384] ng g⁻¹), alcanzando una razón de NH/FH entre [1.11, 1.20]. Es decir, las $CBCS_{acum}$ cercanas a la carretera son 11–20% mayores que las zonas lejanas. Estas pueden ser explicadas por una cercanía a la fuente de emisión y, por ende, una mayor depositación del BC atmosférico sobre el manto nival en dicha zona (NH). Similarmente en la segunda columna de la **Tabla 9**, se aprecia que el I_{imp} presenta mayores valores en la zona NH ([0.867, 0.927]) respecto a FH ([0.856, 0.901]), presentándose una razón NH/FH entre [1.01-1.04] veces mayor. Por último, en la tercera columna de la **Tabla 9**, $\Delta\alpha\%$ muestra mayores valores en la zona NH ([16.1, 21.8] %) respecto a FH ([13.7, 20.0] %), con una razón entre NH/FH

entre [1.09, 1.23]. Esto quiere decir que entre 9–23 % de la $\Delta\alpha\%$ es mayor en la zona cercana a la carretera que las zonas lejanas. Esto se explica porque existe una presencia mayor de las $CBCS_{accum}$, las cuales producen una mayor reducción del albedo de la nieve, acelerando su ablación y, por ende, un menor aprovechamiento para el periodo de deshielo.

Otros estudios internacionales que utilizan productos satelitales con modelos radiativos, han informado CBCS acumuladas entre 650-1500 ng g⁻¹ entre los años 2000-2018 en el noroeste de China (Zheng et al., 2022), superando entre tres a cuatro veces la magnitud de los hallazgos de este estudio, pero en concordancia de que las zonas más cercanas a las fuentes de emisión de contaminantes presentan mayores CBCS. Respecto a los estudios efectuados en la Cordillera de los Andes (8–55°S), estos demuestran que nuestros resultados se encuentran entre los límites mínimos y máximos de las CBCS registradas en la región andina (**Tabla 10**). Dentro de estas investigaciones destacamos dos que realizaron mediciones puntuales en la zona de estudio (Cordero et al., 2022; Rowe, 2019). Estas mediciones alcanzaron valores entre 4-28 ng g⁻¹, siendo bastante bajas en comparación a los valores medios mensuales obtenidos. Esto se explica porque estas muestras (21/07/2015 y 28/08/2018) fueron recogidas entre 5 a 8 días después de nevadas ocurridas en la zona de estudio (13/07/2015 y 23/08/2018, información extraída de la estación Portillo).

Tabla 10. Mediciones de CBCS en la Cordillera de los Andes.

Localización	Tipo de Localización	Rango CBCS (ng g ⁻¹)	Método utilizado	Referencias
Andes Tropicales	Glaciares de la Cordillera Blanca, Perú (8–10°S)	0 - 80	Single-Particle Soot Photometer (SP2)	(Schmitt et al., 2015)
Andes Chilenos	Diferentes zonas montañosas de los Andes Chilenos (18–41°S)	1 - 153	SP2 & Integrating Sandwich/Integrating Sphere (ISSW)	(Rowe et al., 2019)
Andes Chilenos	Diferentes zonas montañosas de los Andes Chilenos (32–55°S)	0 - 105	Meltwater Filtration (MF)	(Cordero et al., 2022)
Andes Centrales Chilenos	Extracción muestras de Glaciares Olivares Alfa y Glaciar Bello (33–34°S)	20 - 1984	Filter-Based Optical Method (FBOM)	(Cereceda-Balic et al., 2022)

3.2 Variabilidad del Black Carbon Atmosférico

3.2.1 Variación espaciotemporal del BC Atmosférico Retrospectivo

Mediante el modelo estadístico planteado y sus entradas grilladas ($\Delta C_{BCS_{acum.ART}}$, V_d , y ρ_{snow}) se reconstruyó el BC atmosférico retrospectivo (2006-2022) en una resolución temporal diaria y una resolución espacial de 500x500 m en la zona de estudio. Estos datos son agregados a nivel mensual (para posteriormente aplicarles downscaling estadístico) y rellenados mediante la metodología detallada en la sección 2.3.2, obteniéndose el $BC_{atm,RCT}$. En la **Figura 5**, se muestra el $BC_{atm,RCT}$ agregado a escala mensual (JUN a OCT) por cada píxel de la cuenca entre los años 2006-2022. Estos resultados revelan una variabilidad promedio entre $[0.06, 0.27] \mu\text{g m}^{-3}$, presentándose temporalmente sus valores mínimos entre JUN a AGO ($\overline{BC} = 0.11 \mu\text{g m}^{-3}$), meses donde se concentran las nevadas y hay menor cantidad de vehículos que emiten BC atmosférico (**Figura 1d**). A medida que ingresamos al final de la temporada, hay un aumento promedio del BC atmosférico desde SEP ($\overline{BC} = 0.12 \mu\text{g m}^{-3}$) hasta OCT ($\overline{BC} = 0.15 \mu\text{g m}^{-3}$), lo cual concuerda con el aumento del tráfico y, por ende, una mayor emisión de las concentraciones de BC atmosférico.

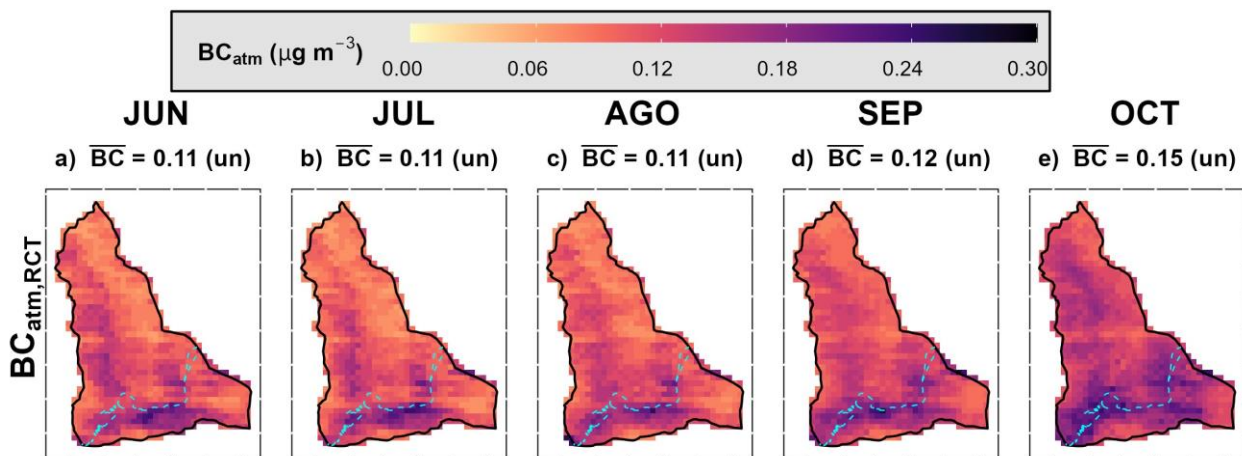


Figura 5. Variación espaciotemporal del $BC_{atm,RCT}$ agregado a nivel mensual entre 2006-2022. La primera a quinta columna muestra los meses de JUN a OCT. Los títulos de cada imagen representan el valor promedio a nivel de cuenca para todos los píxeles. En color cian se muestra la carretera CH-60.

Para corroborar los resultados obtenidos se comparan las mediciones del BC atmosférico provenientes del Nunatak-1 ($BC_{atm,OBS}$ publicadas por Ruggeri et al. (2024)) con la serie mensual del $BC_{atm,RCT}$ asociada a la misma localización de su píxel. En la **Figura 6a** se muestra la comparación de ambas series entre los años 2017-2019, donde solamente existían datos disponibles de $BC_{atm,OBS}$ en los años 2017 y 2019. Este contraste evidencia que existe una similitud en magnitud y temporalidad para estos dos años de información disponible. Adicionalmente en la **Figura 6b** se comparan ambas series mediante un gráfico de dispersión, demostrándose una correlación media ($r_p = 0.45$) entre ambas series y se observa que el $BC_{atm,RCT}$ subestima la magnitud del $BC_{atm,OBS}$. Esto puede ser explicado debido a que el $BC_{atm,RCT}$ presenta una resolución gruesa (500 m), en comparación a la medición puntual del $BC_{atm,OBS}$. La escala espacial del proceso físico de depositación de partículas ocurre a una escala microscópica en comparación a la escala del producto reconstruido. Esta diferencia espacial introduce errores al detectar la concentración del contaminante atmosférico, introduciéndose errores en la teledetección exacta del BC atmosférico. Sin embargo, se observa que se logra detectar los cambios temporales de manera correcta con la metodología utilizada.

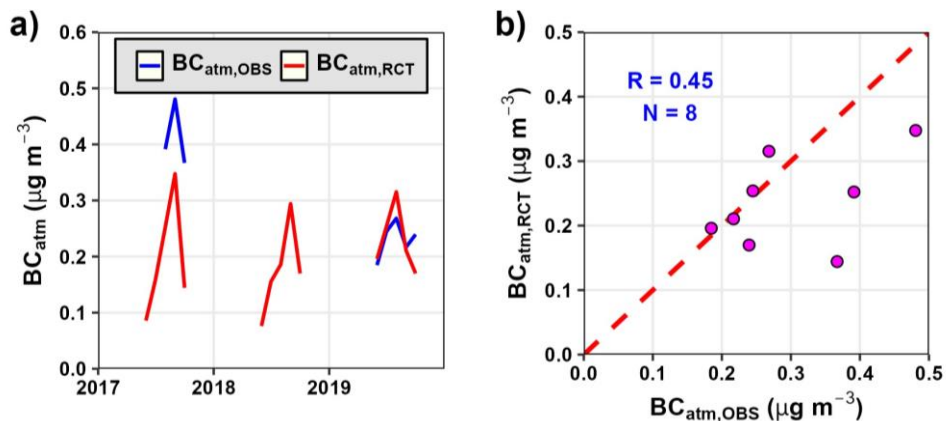


Figura 6. Comparación $BC_{atm,OBS}$ y $BC_{atm,RCT}$. (a) Serie mensual entre $BC_{atm,OBS}$ y $BC_{atm,RCT}$. (b) Gráfico de dispersión entre el $BC_{atm,RCT}$ y el $BC_{atm,OBS}$. La línea roja punteada muestra la línea 1:1.

3.2.2 Variación del BC atmosférico con la altura y distancia a la carretera

Para estudiar cómo varía espacialmente el BC atmosférico con la altura y la distancia a la carretera CH-60 se introduce una nueva métrica llamada “Distancia más cercana a la carretera” (NDH, *Nearest Distance to Highway*), que representa la distancia más corta entre la carretera y cada píxel en la cuenca en kilómetros (km). En la **Figura 7a**, se muestra un gráfico de dispersión entre el BC atmosférico promedio entre 2006-2022 y la elevación regrillada MODIS (**Tabla 2**). El color de cada punto representa la NDH en la cuenca, los colores del fondo representan las distintas EB (definidas en **Figura 1c**), y los títulos superiores muestran los valores promedio del BC atmosférico y NDH por EB. Estos resultados demuestran que el BC atmosférico promedio varía entre $[0.08, 0.24] \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ y la NDH varía entre $[0.01, 11.26]$ km para todos los píxeles de la cuenca. En particular la zona más baja (EB1) presentó una variación del BC atmosférico y NDH de $[0.11, 0.24] (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$ y $[0.01, 6.17]$ (km), respectivamente ($\overline{BC} = 0.16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\overline{NDR} = 1.2$ km). Mientras que en la zona más alta (EB4) reveló una variación del BC atmosférico y NDH de $[0.08, 0.17] (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$ y $[1.13, 11.26]$ (km), respectivamente ($\overline{BC} = 0.12 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\overline{NDR} = 5.9$ km). Esto demuestra que existe una disminución BC atmosférico ante un aumento de la elevación y aumento la distancia con la carretera.

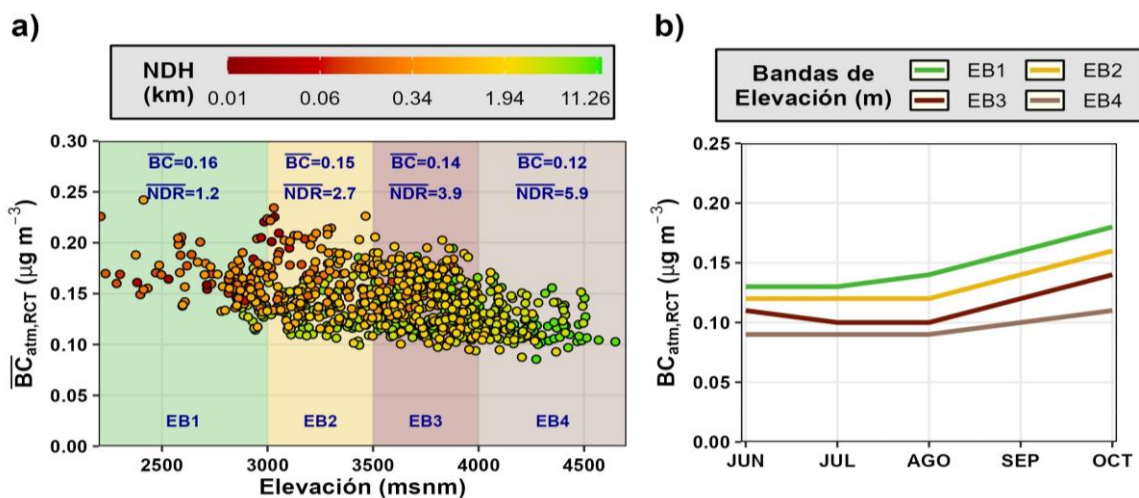


Figura 7. Variación espacial e interanual del BC atmosférico retrospectivo. a) Gráfico de dispersión entre \overline{BC} y la altura. Los puntos representan la NDH en kilómetros en escala logarítmica. En la parte superior se muestra los valores promedio de BC y NDH por cada EB b) Curvas interanuales de \overline{BC} por EB.

Estos resultados respaldan que el BC atmosférico se dispersa debido al transporte del viento en la cuenca. Esto ocasiona que las partículas del contaminante se alejen de la fuente de emisión y disminuya su magnitud con la distancia. Por lo tanto, las concentraciones de BC atmosférico más elevadas se localizarán en áreas más cercanas a la carretera, es decir, a menor elevación y menor NDH. Estos hallazgos son consistentes con otros estudios que abordan mediciones espaciotemporales del BC atmosférico emitidos en carreteras (Kimbrough et al., 2018).

En la **Figura 7b** se muestra las curvas interanuales del BC atmosférico agregadas por cada EB. Estas curvas muestran para EB1 (zona más baja) que JUN presenta un BC atmosférico de $0.13 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, el cual se mantiene constante en JUL, para luego aumentar continuamente hasta OCT donde alcanza un valor de $0.18 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. En el caso de EB4 (zona más alta), se puede apreciar que se mantiene constante en 0.09 entre JUN-AGO y luego aumenta hasta OCT en $0.11 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Estos resultados evidencian que la variación interanual del BC atmosférico tiene sentido. Las menores emisiones se concentran en JUN-JUL debido al cierre del paso fronterizo por nevadas. Esto produce que se interrumpa el tráfico vehicular durante algunos días (o incluso semanas), disminuyendo así las concentraciones de BC atmosférico emitido en dichos meses. La magnitud de BC atmosférico debería ir aumentando al ingresar a la época estival, a propósito de las mejores condiciones climáticas y condiciones óptimas del paso fronterizo (**Figura 1d**) (Manterola, 2009).

Esta variación interanual del BC atmosférico ha sido registrada anteriormente en otros estudios nacionales de alta montaña relativa a la criósfera. Por ejemplo, el estudio de La Parva (2800 msnm, Santiago, Chile) de Gramsch et al. (2020), registraron concentraciones de BC atmosféricas similares en magnitud en invierno ($0.18\text{-}0.22 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ entre JUN-JUL) comparándolas con las obtenidas en el presente estudio y un comportamiento interanual semejante (menores concentraciones en invierno y mayores en verano), contrario a lo que sucede en las grandes ciudades (Molina et al., 2017). Este comportamiento interanual es también reportado y reafirmado por las mediciones de BC atmosférico en Nunatak-1, cercano a la carretera CH-60 (Ruggeri et al., 2024). Estas mayores concentraciones de BC atmosférico en verano genera relevancia, ya que, ante estas mejores condiciones climáticas, se produce un incremento de la circulación montaña-valle impulsada por el aumento de la radiación solar (Lapere et al., 2023). Esto provocará un mayor transporte del BC atmosférico en zonas más altas, pudiendo llegar a afectar a glaciares de zonas elevadas (Cerededa-Balic et al., 2022; Gramsch et al., 2020; Lapere et al., 2023; Ruggeri et al., 2024).

3.3 Escenarios de proyecciones de BC atmosférico futuro.

3.3.1 Escenario Cambio Climático: Selección del GCM y SDM para predecir el BC atmosférico

Con la finalidad de pronosticar el BC atmosférico asociado a un escenario de cambio climático, se analizará cual GCM y SDM describen de manera óptima al $BC_{atm,RCT}$. Para esto, primero se compara el $BC_{atm,RCT}$ y con el BC atmosférico provenientes de los GCMs (**Tabla 3**), utilizando las métricas de evaluación de la **Tabla 7**. La **Figura 8a** muestra los boxplots de dichas métricas, observándose que los tres modelos del IPSL (ID GCMs 7-9, **Tabla 3**) presentan el mejor desempeño ($r_p = [-0.20, 0.66]$; PSS = [0.00, 0.79]; PPI = [-0.38, 0.47]). Entre estos tres, el $BC_{GCM,select}$ corresponde al modelo IPSL-CM5A-MR (ID 8, **Tabla 3**), presentando el mejor desempeño entre todos los otros modelos ($r_p = [-0.20, 0.66]$; PSS = [0.38, 0.79]; PPI = [-0.26, 0.47]). En segundo, se procede a realizar el downscaling estadístico mediante 4 SDMs (**Tabla 8**), utilizando la métrica de evaluación de la **Tabla 7**. En ellos se asume como dato real el $BC_{atm,RCT}$ y se aplican los SDMs al $BC_{GCM,select}$. La **Figura 8b** exhibe que el SDM que representó de mejor manera al BC atmosférico en el periodo retrospectivo correspondió al QDM, ya que presentó el mayor rango con un $KGE = [-0.30, 0.59]$ y la mayor

mediana ($KGE=0.15$). Los resultados anteriores demuestran que para representar el $BC_{FUT,GCM}$ con una resolución temporal mensual y una resolución espacial de 500×500 m en la zona de estudio, se debe utilizar el GCM asociado IPSL-CM5A-MR y el SDM relativo a QDM. Si bien no se ha explorado cuál GCM y SDM se adapta mejor a la variable de BC atmosférico en zonas de alta montaña, el último Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017, 2018) seleccionó uno de los modelo IPSL para las forzantes meteorológicas en Chile. Asimismo, se seleccionó la misma SDM para aplicar un downscaling estadístico al producto. Para mayores detalles de los resultados obtenidos, revisar **Tabla B3 (ver Anexo B)**.

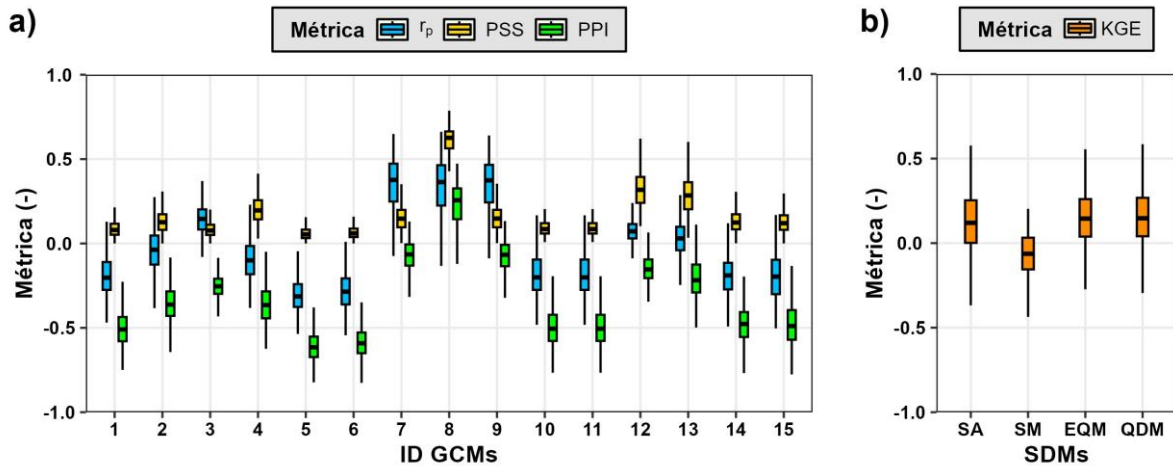


Figura 8. Diagramas de caja de las métricas r_p , PSS, y PPI para los a) GCMs y b) SDMs en el periodo de análisis retrospectivo (2006-2022). Para el caso b), se utiliza el GCM IPSL-CM5A-MR. El valor extremo inferior (superior) del diagrama de cajas corresponden al primer (tercer) cuartil, mientras que el valor central corresponde a la mediana. El extremo de los bigotes superior (inferior) se extiende desde el valor extremo del diagrama de caja hasta el valor más grande (más pequeño) sin exceder 1.5 rango intercuartil.

3.3.2 Escenario Vehículos: Proyección de Tráfico Vehicular para predecir el BC atmosférico

Con la finalidad de pronosticar el BC atmosférico asociado a un escenario de vehículos, se estudiará la relación entre $BC_{atm,RCT}$ con el tráfico mensual y el incremento de los vehículos en la carretera CH-60. En primer lugar, se calcularon las ecuaciones de regresión lineal entre $BC_{atm,RCT}$ y el MTT en el periodo retrospectivo (2006-2022), obteniéndose la pendiente (*Slope*) grillada con una resolución espacial de 500×500 m por cada mes de análisis. La **Figura 9a** muestra que *Slope* varía entre $[1.5, 8.5] \cdot 10^{-6} \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{veh}^{-1}$ con un coeficiente de determinación entre 0.67-0.83, a nivel agregado de cuenca, para los meses de análisis (**Figura B10, ver Anexo B**). Luego, se evaluó las *TC* por cada tipo de vehículo entre los años 2014-2018. Se seleccionó este periodo debido a una disminución del tráfico por el estallido social chileno a finales de 2019 (Curilef et al., 2021) y cierre de fronteras por la crisis sanitaria del COVID-19 entre los años 2020-2021 (Benítez et al., 2020). La **Figura 9b** muestra las *TC* obtenidas por cada tipo de vehículos y sus coeficientes de determinación. Estos resultados para autos ($TC = 11.7\%$), buses ($TC = 2.4\%$) y camiones ($TC = 1.5\%$) se encuentran dentro de los rangos recomendados por la Dirección de Vialidad (<http://servicios.vialidad.cl/censo/objet4.htm>). Utilizando estas *TC* y considerando como condición inicial los vehículos de 2022, se calculó el ATT_{FUT} de los vehículos entre 2023-2035. Mostrando un aumento de 0.69 a 1.41 millones de vehículos en la carretera (**Figura 9c**). Por último, utilizando los datos grillados de *Slope*, AMPATT, y ATT_{FUT} con la ecuación (11), se calcula el $BC_{FUT,VEH}$ a una resolución temporal mensual y una resolución espacial de 500×500 m en la zona de estudio.

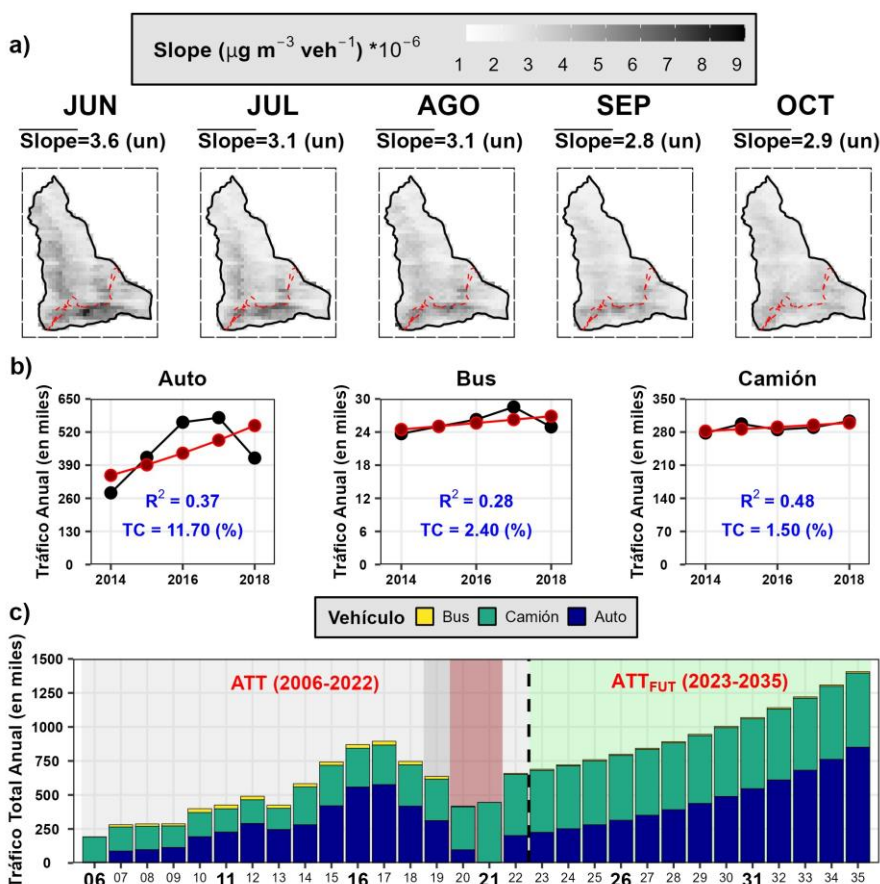


Figura 9. a) Pendiente grillada de regresión lineal entre MTT y $BC_{atm,RCT}$ a nivel mensual entre JUN a OCT. El texto (un) hace referencia a las unidades del título. b) Tasas de crecimiento (TC) y coeficiente de determinación (R^2) para el MTT entre los años 2014-2018 para los vehículos ingresan y salen por la carretera CH-60. c) Tráfico Total Anual retrospectivo (ATT, 2006-2022) y futuro (ATT_{FUT} , 2023-2035) calculada en función de las TC consideradas.

3.3.3 Variación espaciotemporal del BC Atmosférico Futuro

La **Figura 10** muestra el pronóstico del BC atmosférico (2023-2035) mediante los escenarios de cambio climático ($BC_{FUT,GCM}$, primera fila) y el escenario de vehículos ($BC_{FUT,VEH}$, segunda columna) descritos con anterioridad. Los píxeles muestran el promedio del BC atmosférico por cada mes (JUN a OCT) entre los años 2023-2035 y los títulos muestran el valor promedio a escala de cuenca. Para $BC_{FUT,GCM}$, los resultados revelan una variabilidad promedio entre $[0.03, 0.34] \mu\text{g m}^{-3}$. Temporalmente, el BC atmosférico comienza en JUN con $\overline{BC} = 0.08 \mu\text{g m}^{-3}$, el cual disminuye en JUL ($\overline{BC} = 0.05 \mu\text{g m}^{-3}$) y aumentando desde AGO hasta OCT ($\overline{BC} = 0.10$ y $0.17 \mu\text{g m}^{-3}$). Comparando a nivel de cuenca el $BC_{atm,RCT}$ (**Figura 5**) con este escenario futuro, las concentraciones son menores entre $[-0.06, -0.01]$ para JUN a AGO. Sin embargo, tienden a aumentar entre $[+0.01, +0.02]$ para SEP y OCT. Los resultados del segundo escenario ($BC_{FUT,VEH}$) muestran una variabilidad promedio entre $[0.09, 0.47] \mu\text{g m}^{-3}$. Temporalmente, el BC atmosférico comienza en JUN con $\overline{BC} = 0.18 \mu\text{g m}^{-3}$ y aumenta hasta OCT ($\overline{BC} = 0.25 \mu\text{g m}^{-3}$). Comparando nuevamente con $BC_{atm,RCT}$, se nota que para todos los meses existe un aumento del BC atmosférico entre $[+0.07, +0.10]$. Estos resultados revelan en general un aumento en la magnitud del BC atmosférico a finales de la temporada. Sin embargo, para tener una noción del cambio temporal de su serie, se estudiará a nivel de cuenca como espaciotemporalmente las tendencias del BC atmosférico de todos los escenarios estudiados.

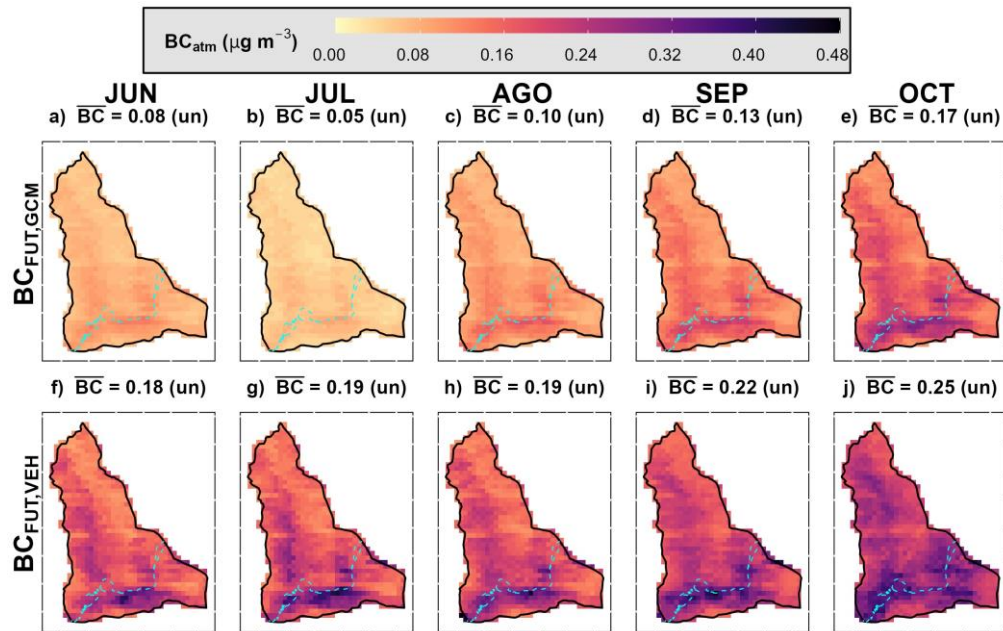


Figura 10. Variación espaciotemporal del $BC_{FUT,GCM}$ (primera fila) y $BC_{FUT,VEH}$ (segunda fila) agregado a nivel mensual entre 2023-2035. La primera a quinta columna muestra los meses de JUN a OCT. Los títulos de cada imagen representan el valor promedio a nivel de cuenca para todos los píxeles. El texto (un) hace referencia a las unidades del título. En color cian se muestra la carretera CH-60.

3.4 Tendencia de los escenarios BC atmosférico

3.4.1 Tendencia temporal de los escenarios de BC atmosférico a escala de cuenca

En la **Figura 11** se exhiben las series anuales (color oscuro) y mensuales entre JUN a OCT (color claro) del BC atmosférico por cada escenario. Respecto al escenario retrospectivo asociado al $BC_{atm,RCT}$, se observa una variabilidad mensual del BC atmosférico entre $[0.05, 0.22] \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ($\overline{BC} = 0.12 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) con una tendencia positiva no significativa ($p > 0.05$) de $2.9 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{year}^{-1}$. Esta tendencia no significativa puede ser explicada por el cierre de fronteras internacionales por el COVID-19 (Benítez et al., 2020), que produjo una disminución abrupta del tráfico vehicular de la carretera CH-60 (2020-2021, **Figura 1e**) y, por tanto, una disminución del BC atmosférico emitido (Adasme et al., 2022). Lo anterior es visible en la baja abrupta del BC atmosférico durante el año 2020 (**Figura 11**). Adicionalmente, años hidrológicos húmedos asociados al fenómeno de El Niño (Garreaud et al., 2017) ocasionaron un cierre prologando del paso fronterizo producto de nevadas copiosas, como fue observado en el año 2015, provocando una disminución del BC atmosférico y magnitud de su tendencia.

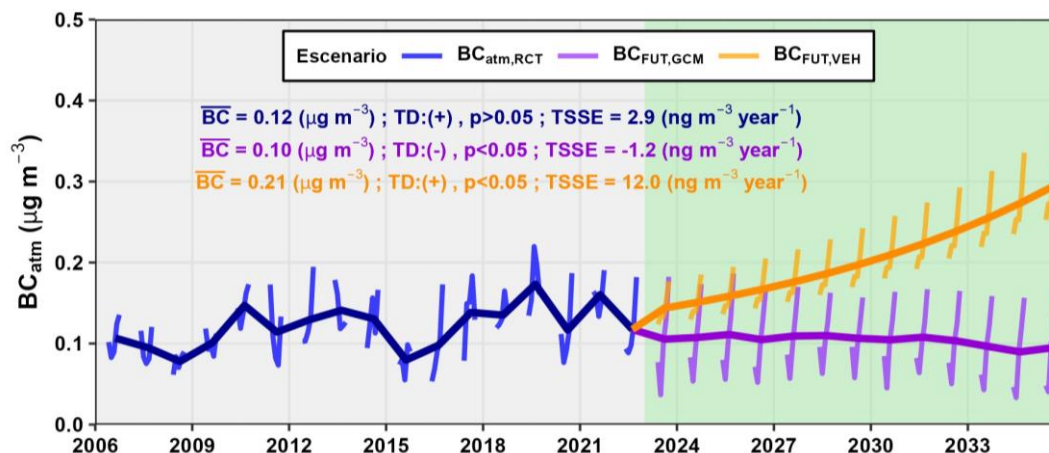


Figura 11. Serie mensuales entre JUN-OCT (color claro) y anuales (color oscuro) del BC atmosférico para los escenarios: $BC_{atm,RCT}$ (2006-2022), $BC_{FUT,GCM}$ (2023-2035) y $BC_{FUT,VEH}$ (2023-2035).

Respecto al escenario $BC_{FUT,GCM}$, muestra una variabilidad mensual del BC atmosférico entre $[0.03, 0.19] \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ($\overline{BC} = 0.10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), los cuales son un 17% menores respecto al escenario $BC_{atm,RCT}$. Este escenario presenta una tendencia negativa significativa ($p < 0.05$) de $1.2 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{year}^{-1}$. Esta tendencia negativa se basa en la ejecución de políticas estrictas de emisiones de gases de efecto invernadero (Van Vuuren et al., 2007), la cual es genérica para todos los GCMs como RCPs del CMIP5 (**Figura B2, ver Anexo B**). Además, se basa en el uso de nuevas tecnologías que reduzcan la concentración de estas emisiones (Bond et al., 2013; ZOU et al., 2021). Respecto al escenario $BC_{FUT,VEH}$, revela una variabilidad mensual entre $[0.12, 0.36] \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ($\overline{BC} = 0.21 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), las cuales son 75% mayores respecto al escenario $BC_{atm,RCT}$. Este escenario exhibe una tendencia positiva significativa de $12.0 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{year}^{-1}$. Esta tendencia positiva se basa en el supuesto que habrá un aumento de vehículos progresivo de la carretera CH-60, observado según las estadísticas históricas en la carretera CH-60 (2006-2017, **Figura 1e**) y respaldado mediante diversos estudios que han mostrado una fuerte correlación entre las concentraciones de BC atmosféricas con la cantidad de vehículos en carreteras y/o rutas (De Miranda et al., 2019; Ozdemir et al., 2014; Ruggeri et al., 2024).

Si bien ha habido un aumento de las emisiones de aerosoles debido a la industrialización desde finales del Siglo XIX, distintos estudios internacionales con zonas de alto flujo vehicular han detectado tendencias positivas desde 1980 hasta 2010 (Mao et al., 2023; Réveillet et al., 2022; Sun et al., 2020; Tao et al., 2021). Por ejemplo, en Beijing, China detectaron una tendencia positiva desde 4.1 a $8.6 \mu\text{g m}^{-3}$ entre 1980 y 2014 (Qin et al., 2019). Sin embargo, esta tendencia se ha vuelto relativamente estable durante la segunda década del presente siglo, derivado de la mejora de las tecnologías de combustibles (Qin et al., 2019; S. Zhang et al., 2021). Otro estudio de la cuenca Nainital (Himalayas), se registró una tendencia del BC atmosférico de $23.0 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{year}^{-1}$ ($p < 0.05$) entre 2004-2016, debido al aumento de la quema de biomasa en la zona (Joshi et al., 2022). Lo anterior representa una magnitud ocho veces mayor a la encontradas en el presente estudio ($2.9 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{year}^{-1}$), concordante con que las mayores emisiones de BC atmosférico en nieve ocurren principalmente en Asia (Kang et al., 2020). En Chile (18.5 - 53.2°S). Estos resultados son apoyados por el estudio de Osses et al. (2022), quienes detectaron un aumento del BC atmosférico desde 1990 hasta el año 2012 asociado al aumento de la cantidad de vehículos en circulación. A pesar de este incremento, se ha observado una disminución del BC atmosférico por vehículo, atribuido a una incorporación de nuevos vehículos equipados con tecnologías de combustibles más avanzadas (Taiebat et al., 2018). Estos resultados son consistentes con los hallazgos del presente estudio, donde se identificó una tendencia positiva pero no significativa en las concentraciones del BC atmosférico durante el periodo retrospectivo.

Para las proyecciones del BC atmosférico, distintos estudios internacionales han estimado una reducción entre un 9-34% en la tendencia de estas emisiones globales para 2030, debido principalmente a la mejora de tecnologías de combustibles y políticas (Bond et al., 2013; Cofala et al., 2007; Streets, 2007). Esto concuerda con el escenario de proyecciones de cambio climático del CMIP5 (Moss et al., 2010), donde se detecta una disminución del 17% de las emisiones futuras (2023-2035) respecto al periodo retrospectivo. Esta tendencia es reforzada en Chile mediante la aprobación de la Estrategia Nacional de Electromovilidad (ENE, Ministerio de Energía, 2022), cuyo propósito es la progresiva integración de vehículos eléctricos y el compromiso de que la totalidad de vehículos en venta sean eléctricos para el año 2035. Esto marcará el comienzo en la disminución de emisiones de contaminantes atmosféricos, tal como lo es el BC atmosférico (Ministerio de Energía, 2022). Sin embargo, en la actualidad, el parque automovilístico de este tipo de vehículos solo representa un 0.1% del total de en circulación (ANAC 2020, INE, 2023), existiendo una brecha aun significativa para la incorporación total de cero emisiones.

Si bien se ha notado una mejora de las tecnologías y una disminución de las emisiones por vehículo, es esperable un aumento del tráfico vehicular de la carretera CH-60 (2006-2017, **Figura 1e**) debido a su importancia comercial y turística internacional (Manterola, 2009; Ruggeri et al., 2024). Esto producirá un aumento inevitable de las emisiones de BC atmosférico en la cuenca. Adicionalmente, como distintos estudios han resaltado, la principal variable que modula la depositación de partículas corresponde a la velocidad del viento (Chen et al., 2012; Lapere et al., 2023; Wang et al., 2017), la cual se espera que aumente en los próximos años ante distintos escenarios de cambio climático (Lapere et al., 2023). Esto ocasionará un aumento en la dispersión del BC atmosférico y velocidad de depositación de las partículas, ocasionando una mayor propensión del BC atmosférico a depositarse sobre la criósfera. Estos hallazgos permiten evidenciar que las tendencias entre 2023-2035 será probablemente una curva intermedia entre $BC_{FUT,GCM}$ y $BC_{FUT,VEH}$ (**Figura 11**). Pero si es claro que desde 2035 en adelante, la cuenca de estudio y en Chile habrá un aumento de los de vehículos eléctricos en circulación, produciendo una disminución de las emisiones de BC atmosférico en las distintas vías de transporte terrestre.

3.4.2 Tendencia espaciotemporal de los escenarios de BC atmosférico a escala anual

Con la finalidad de conocer cuanto aumentará o disminuirá el BC atmosférico en la carretera CH-60, se analizan las tendencias espaciotemporales del BC atmosférico de todos los escenarios anteriores. Para llevarlo a cabo se agrega el BC atmosférico a nivel anual por cada píxel de la cuenca y calculamos el TSEE por cada serie, generando sus respectivos mapas especiales de 500x500 m. La **Figura 12** muestra el TSEE del BC atmosférico anual para los escenarios: retrospectivo ($BC_{atm,RCT}$, 2006-2022), proyecciones de cambio climático ($BC_{FUT,GCM}$, 2023-2035) e incremento de vehículos en la carretera CH-60 ($BC_{FUT,VEH}$, 2023-2035). A nivel de cuenca, los resultados de TSEE del BC atmosférico en la cuenca revelaron lo siguiente: el $BC_{atm,RCT}$ presenta un rango de variabilidad principalmente positivo entre $[-0.2, 8.4] \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{year}^{-1}$ ($\overline{TSEE}=2.5 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{year}^{-1}$); $BC_{FUT,GCM}$ exhibe un rango de variabilidad negativo con valores entre $[-3.2, -0.4] \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{year}^{-1}$ ($\overline{TSEE}= -1.1 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{year}^{-1}$); y $BC_{FUT,VEH}$ muestra el rango con mayor magnitud y positivo, con datos que varían entre $[6.9, 22.2] \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{year}^{-1}$ ($\overline{TSEE}=12.0 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{year}^{-1}$). Una inspección más detallada a las zonas aledañas a la carretera CH-60, muestran las mayores magnitudes del TSEE por cada escenario. Para verificar la hipótesis anterior, se efectúa el mismo análisis de la sección 3.1, calculando NH, FH y NH/FH por cada escenario, presentado en la **Tabla 11**. El escenario retrospectivo del $BC_{atm,RCT}$ muestra que hay una tendencia positiva en NH de $3.40 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{year}^{-1}$ en promedio, mientras que FH solo presentó $2.21 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{year}^{-1}$. Esto implicó que la zona de la carretera fue 54% mayor respecto a FH. El escenario $BC_{FUT,GCM}$ exhibe tendencias negativas en NH de $1.48 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{year}^{-1}$ y FH de $1.02 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{year}^{-1}$. Provocando que NH fuera 45%

mayor respecto a FH. Por último, el escenario $BC_{FUT,VEH}$ muestra tendencias positivas en NH de $15.00 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{year}^{-1}$ y FH de $10.96 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{year}^{-1}$. Lo que conlleva a que NH fuera 37% mayor respecto a FH. Todos estos resultados exhiben que la carretera CH-60 es la zona donde se concentran las mayores magnitudes del contaminante atmosférico, las cuales son entre [37, 54] % mayores respecto a las zonas alejadas. Además, la zona NH presenta las mayores magnitudes en tendencia al aumento y/o disminución del BC atmosférico, dependiendo del escenario de estudio.

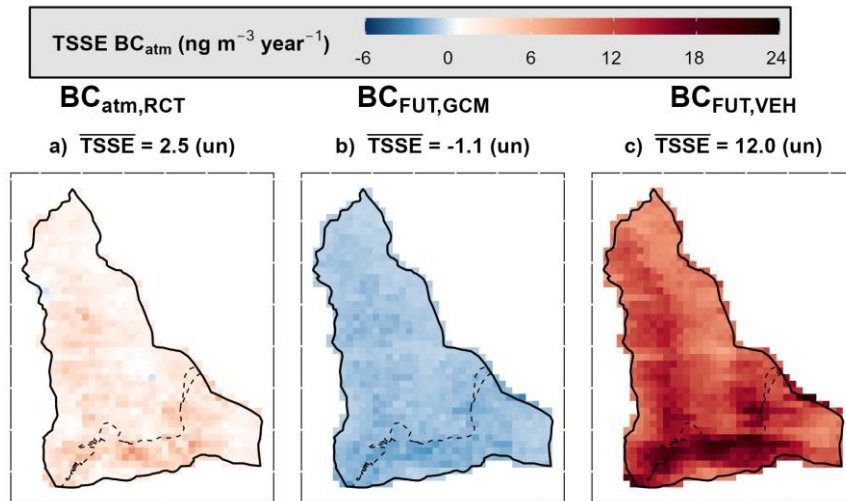


Figura 12. Variación espaciotemporal del TSEE del BC atmosférico anual para los distintos escenarios ($BC_{atm,RCT}$, $BC_{FUT,GCM}$, $BC_{FUT,VEH}$). Los títulos de cada imagen representan el valor promedio a nivel de cuenca para todos los píxeles. El texto (un) hace referencia a las unidades del título. En color negro se muestra la carretera CH-60.

Tabla 11. Valores de NH, FH y NH/FH para el TSEE del BC atmosférico anual por cada escenario.

Indicador	TSEE BC_{atm} ($\mu\text{g m}^{-3} \text{ year}^{-1}$)		
	$BC_{atm,RCT}$ (2006-2022)	$BC_{FUT,GCM}$ (2023-2035)	$BC_{FUT,VEH}$ (2023-2035)
NH	3.40	-1.48	15.00
FH	2.21	-1.02	10.96
NH/FH (*)	1.54	1.45	1.37

(*) NH/FH es adimensional debido a que es una razón entre ambos valores.

Estos resultados distribuidos implicaron una tendencia negativa en el periodo retrospectivo del BC atmosférico, una tendencia negativa para el escenario de cambio climático y una tendencia positiva para el escenario del incremento de vehículos. El BC atmosférico obtenido de manera espacial y temporal en todos los escenarios analizados mediante la metodología aplicada en el presente estudio presentan el potencial de ser utilizado en un modelo hidrológico acoplado con un modelo radiativo. Esto con la finalidad de predecir de manera más precisa la escorrentía de una cuenca nival andina, considerando los efectos del cambio climático en los forzantes meteorológicos como también el efecto fisicoquímico en la depositación de los contaminantes atmosféricos sobre la criósfera, sobre todo en zonas relativas a la criósfera con fuentes de emisión próximas.

4 Conclusiones

Este estudio busca reconstruir y generar predicciones espaciotemporales del BC atmosférico en la cuenca Estero Juncalillo (2200–4700 msnm), ubicada en los Andes chilenos (32.81°S, 70.12°O), donde se encuentra el paso fronterizo Los Libertadores, el cual presenta la carretera CH-60 con el mayor tráfico vehicular entre Chile y Argentina. Esta investigación evaluó estimaciones espaciotemporales de las concentraciones de BC en la nieve (CBCS) mediante un modelo simplificado de transferencia radiativo asintótico (modelo ART) empleando 17 años (2006-2022) de distintos productos de MODIS, corroborando la efectividad de las CBCS con un índice de impurezas. En segundo lugar, se desarrolla un modelo estadístico para determinar el BC atmosférico a partir de datos grillados de las CBCS del modelo ART, de velocidades de depositación seca de partículas y de la densidad superficial de la nieve. En tercero, se generaron dos enfoques para evaluar BC atmosférico futuro (2023-2035): 1) Empleando GCMs del CMIP5 con distintas SDMs y 2) Planteando un incremento del tráfico vehicular de la carretera CH-60.

Se concluye que las CBCS entre los meses de junio a octubre en la cuenca Estero Juncalillo presentaron una variabilidad entre [160, 520] ng g⁻¹ en promedio mensual, los cuales produjeron una disminución del albedo de la nieve en la cuenca entre 10.5-26.5%. Un análisis especial demostró que las zonas más cercanas a la carretera (< 1 km) presentaron CBCS entre 11-20% mayores respecto a zonas alejadas (>1 km), las cuales produjeron una reducción entre 9-23% mayor al albedo de la nieve. Como se esperaba, en zonas bajas de la cuenca (2200-3000 msnm) el BC atmosférico (2006-2022) y la distancia más cercana a la carretera varió entre [0.11, 0.24] µg m⁻³ y [0.01, 6.17] km, mientras que en las zonas altas (4000-4700 msnm) mostró una variación [0.08, 0.17] µg m⁻³ y [1.13, 11.26] km. Este análisis reveló que el BC atmosférico disminuye a mayores altitudes de la cuenca y a mayor distancia con la carretera CH-60, debido al efecto de dispersión de las partículas por el transporte del viento. Asimismo, se corroboró que las concentraciones mínimas ocurren entre junio y agosto, las cuales aumentan entre septiembre a octubre, ante mejores condiciones climáticas y aumento del tráfico vehicular en la carretera. El BC atmosférico de este escenario, a escala de cuenca, reveló un \overline{BC} =0.12 µg m⁻³, aumentado de manera no significativa a una tasa de 2.9 ng g⁻¹ year⁻¹. El escenario de cambio climático (2023-2035) muestra que el GCM y SDM que mejor representa al BC atmosférico retrospectivo corresponde al IPSL-CM5A-MR y QDM, respectivamente. Las proyecciones de este escenario, a nivel de cuenca, presentaron un \overline{BC} =0.10 µg m⁻³ (17% menor respecto al escenario retrospectivo), disminuyendo de manera significativa a una tasa de 1.2 ng g⁻¹ year⁻¹. El escenario de incremento vehicular (2023-2035) muestra que, a nivel de cuenca, para un aumento de 0.65 a 1.45 millones de vehículos en la carretera CH-60, presentó \overline{BC} =0.21 µg m⁻³ (75% mayor respecto al escenario retrospectivo), aumentando de manera significativa a una tasa de 12.0 ng g⁻¹ year⁻¹.

Esta metodología tiene el potencial de ser utilizada en otras zonas asociadas a la criósfera que estén

Todos estos resultados presentan el potencial de identificar la magnitud de las concentraciones BC atmosférico de manera retrospectiva como proyecciones emitidas en cuencas nivales de alta montaña. Estas pueden ser utilizadas para ingresarlas dentro de un modelo hidrológico acoplado con un modelo radiativo para considerar tanto el impacto del cambio climático sobre las forzantes meteorológicas como el impacto radiativo de las impurezas sobre la nieve, lo que sería útil para una predicción de la disponibilidad hídrica futura a los gestores de agua y los sectores interesados durante los periodos secos. La efectividad potencial de este enfoque podría expandirse para cubrir otras zonas altas de alta montaña, las cuales presenten fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos relevantes y siempre que haya datos satelitales e información de estaciones de monitoreo adecuados en la zona de estudio. Por ejemplo, algunas zonas

interesantes a explorar serían otros pasos fronterizos entre Chile y Argentina, los cuales atraviesan la Cordillera de Los Andes y presentan emisión del BC atmosférico emitido por vehículos. Adicionalmente, estudiar el impacto en la criósfera por la actividad de mineras a tajo abierto ubicadas en zonas cordilleranas. Esto permitiría examinar el BC atmosférico distribuido en la cuenca e identificar zonas más propensas a la depositación de estas impurezas, las cuales acelerarán la ablación del manto nival, impactando el manto nival en cuencas nivales, que suministran agua dulce para actividades socioeconómicas en la temporada seca.

Referencias

- Adasme, C., Villalobos, A. M., & Jorquera, H. (2022). Spatiotemporal Analysis of Black Carbon Sources: Case of Santiago, Chile, under SARS-CoV-2 Lockdowns. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(24). <https://doi.org/10.3390/ijerph192417064>
- Alduchov, O. A., & Eskridge, R. E. (1996). Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure. *Journal of Applied Meteorology*, 35(4). [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1996\)035<0601:IMFAOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1996)035<0601:IMFAOS>2.0.CO;2)
- Anderson, E. a. E. a. (1976). A point energy and mass balance model of a snow cover. In *Energy* (Vol. 114, Issue D24).
- Benítez, M. A., Velasco, C., Sequeira, A. R., Henríquez, J., Menezes, F. M., & Paolucci, F. (2020). Responses to COVID-19 in five Latin American countries. *Health Policy and Technology*, 9(4). <https://doi.org/10.1016/j.hlpt.2020.08.014>
- Beres, N. D., Lapuerta, M., Cereceda-Balic, F., & Moosmüller, H. (2020). Snow surface albedo sensitivity to black carbon: Radiative transfer modelling. *Atmosphere*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/atmos11101077>
- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., Deangelo, B. J., Flanner, M. G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P. K., Sarofim, M. C., Schultz, M. G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., ... Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(11). <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>
- Boone, A. (2002). *Description du Schema de Neige ISBA-ES*. 63.
- Brandt, R. E., Warren, S. G., & Clarke, A. D. (2011). A controlled snowmaking experiment testing the relation between black carbon content and reduction of snow albedo. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116(8). <https://doi.org/10.1029/2010JD015330>
- Busetto, L., & Ranghetti, L. (2016). MODISstp: An R package for automatic preprocessing of MODIS Land Products time series. *Computers and Geosciences*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.08.020>
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28(17). <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>
- Cereceda-Balic, F., Ruggeri, M. F., Vidal, V., Ruiz, L., & Fu, J. S. (2022). Understanding the role of anthropogenic emissions in glaciers retreat in the central Andes of Chile. *Environmental Research*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113756>
- Cereceda-Balic, F., Vidal, V., Moosmüller, H., & Lapuerta, M. (2018). Reduction of snow albedo from vehicle emissions at Portillo, Chile. *Cold Regions Science and Technology*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.11.008>
- Cereceda-Balic, F., Vidal, V., Ruggeri, M. F., & González, H. E. (2020). Black carbon pollution in snow and its impact on albedo near the Chilean stations on the Antarctic peninsula: First results. *Science of the*

- Total Environment*, 743, 140801. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140801>
- Chávez, R. O., Briceño, V. F., Lastra, J. A., Harris-Pascal, D., & Estay, S. A. (2021). Snow Cover and Snow Persistence Changes in the Mocho-Choshuenco Volcano (Southern Chile) Derived From 35 Years of Landsat Satellite Images. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9(September), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.643850>
- Chen, J., Brissette, F. P., Poulin, A., & Leconte, R. (2011). Overall uncertainty study of the hydrological impacts of climate change for a Canadian watershed. *Water Resources Research*, 47(12). <https://doi.org/10.1029/2011WR010602>
- Chen, L., Peng, S., Liu, J., & Hou, Q. (2012). Dry deposition velocity of total suspended particles and meteorological influence in four locations in Guangzhou, China. *Journal of Environmental Sciences*, 24(4). [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(11\)60805-X](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(11)60805-X)
- Chen, W., Wang, X., Cui, J., Cao, X., Pu, W., Zheng, X., Ran, H., & Ding, J. (2021). Radiative forcing of black carbon in seasonal snow of wintertime based on remote sensing over Xinjiang, China. *Atmospheric Environment*, 247. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118204>
- Cofala, J., Amann, M., Klimont, Z., Kupiainen, K., & Höglund-Isaksson, L. (2007). Scenarios of global anthropogenic emissions of air pollutants and methane until 2030. *Atmospheric Environment*, 41(38). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.07.010>
- Cordero, R. R., Sepúlveda, E., Feron, S., Wang, C., Damiani, A., Fernandez, F., Neshyba, S., Rowe, P. M., Asencio, V., Carrasco, J., Alfonso, J. A., MacDonell, S., Seckmeyer, G., Carrera, J. M., Jorquera, J., Llanillo, P., Dana, J., Khan, A. L., & Casassa, G. (2022). Black carbon in the Southern Andean snowpack. *Environmental Research Letters*, 17(4). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5df0>
- Cornwell, E. (2012). *Reconstrucción del equivalente en agua de nieve mediante imágenes MODIS incorporadas a un balance de masa-energía*. 116.
- Correa-Ibanez, R., Keir, G., & McIntyre, N. (2018). Climate-resilient water supply for a mine in the Chilean Andes. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*, 171(4). <https://doi.org/10.1680/jwama.16.00129>
- Curilef, S., González, D., & Calderón, C. (2021). Analyzing the 2019 Chilean social outbreak: Modelling Latin American economies. *PLoS ONE*, 16(8 August). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256037>
- Dávila, C. (2015). *Desagregación Espacio-Temporal del inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos por fuentes fijas y móviles en Cundinamarca* (Vol. 3, Issue 1) [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/55541>
- de Miranda, R. M., Perez-Martinez, P. J., de Fatima Andrade, M., & Ribeiro, F. N. D. (2019). Relationship between black carbon (BC) and heavy traffic in São Paulo, Brazil. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 68. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.09.002>
- DeWalle, D. R., & Rango, A. (2008). Principles of snow hydrology. In *Principles of Snow Hydrology* (Vol. 9780521823623). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535673>
- DGA. (2017). Actualización del Balance Hídrico Nacional. *SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado Por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile*, 378. <https://snia.mop.gob.cl/sad/REH5796v1.pdf>
- DGA. (2018). Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro. *SIT N° 435. Realizado por Universidad de Chile y Pontificia Universidad Católica. Gobierno de Chile Ministerio de Obras Públicas*, 44. <http://sad.dga.cl/ipac20/ipac.jsp?session=1WI988L943043.908461&profile=cirh&source=~!biblioteca&view=subscriptionssummary&uri=full=3100001~!6095~!25&ri=4&aspect=subtab39&menu=search&ipp=20&sp=20&staffonly=&term=balance+hidrico+nacional&index=.GW&uindex=&a>

- Di Virgilio, G., Ji, F., Tam, E., Nishant, N., Evans, J. P., Thomas, C., Riley, M. L., Beyer, K., Grose, M. R., Narsey, S., & Delage, F. (2022). Selecting CMIP6 GCMs for CORDEX Dynamical Downscaling: Model Performance, Independence, and Climate Change Signals. *Earth's Future*, 10(4). <https://doi.org/10.1029/2021EF002625>
- Doherty, S. J., Warren, S. G., Grenfell, T. C., Clarke, A. D., & Brandt, R. E. (2010). Light-absorbing impurities in Arctic snow. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(23). <https://doi.org/10.5194/acp-10-11647-2010>
- Duarte, A. (2020). *Evaluación espaciotemporal de contaminantes en la ciudad de Barranquilla* (Vol. 2507, Issue February) [Universidad de la Costa CUC]. <https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/7079>
- Dumont, M., Brun, E., Picard, G., Michou, M., Libois, Q., Petit, J. R., Geyer, M., Morin, S., & Josse, B. (2014). Contribution of light-absorbing impurities in snow to Greenland's darkening since 2009. *Nature Geoscience*, 7(7). <https://doi.org/10.1038/ngeo2180>
- Emerson, E. W., Katich, J. M., Schwarz, J. P., McMeeking, G. R., & Farmer, D. K. (2018). Direct Measurements of Dry and Wet Deposition of Black Carbon Over a Grassland. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(21). <https://doi.org/10.1029/2018JD028954>
- Falvey, M., & Garreaud, R. (2007). Wintertime precipitation episodes in Central Chile: Associated meteorological conditions and orographic influences. *Journal of Hydrometeorology*, 8(2). <https://doi.org/10.1175/JHM562.1>
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. E. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2). <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Fowler, H. J., Blenkinsop, S., & Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. In *International Journal of Climatology* (Vol. 27, Issue 12). <https://doi.org/10.1002/joc.1556>
- Fugazza, D., Manara, V., Senese, A., Diolaiuti, G., & Maugeri, M. (2021). Snow cover variability in the greater alpine region in the modis era (2000–2019). *Remote Sensing*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/rs13152945>
- Garreaud, R., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Pablo Boisier, J., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12). <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>
- Gateño, F., Vargas, X., & Mendoza, P. (2022). ¿Cómo Seleccionar Modelos De Circulación General Para Estudios Regionales? Propuesta Metodológica Basada En El Desempeño Histórico. *Xxv Congreso Chileno De Ingeniería Hidráulica*, 60.
- Gilardoni, S., Di Mauro, B., & Bonasoni, P. (2022). Black carbon, organic carbon, and mineral dust in South American tropical glaciers: A review. In *Global and Planetary Change* (Vol. 213). <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103837>
- Glasser, G. J., & Winter, R. F. (1961). Critical Values of the Coefficient of Rank Correlation for Testing the Hypothesis of Independence. *Biometrika*, 48(3/4). <https://doi.org/10.2307/2332767>
- Gogoi, M. M., Babu, S. S., Moorthy, K. K., Thakur, R. C., Chaubey, J. P., & Nair, V. S. (2016). Aerosol black carbon over Svalbard regions of Arctic. *Polar Science*, 10(1). <https://doi.org/10.1016/j.polar.2015.11.001>
- Gramsch, E., Muñoz, A., Langner, J., Morales, L., Soto, C., Pérez, P., & Rubio, M. A. (2020). Black carbon transport between Santiago de Chile and glaciers in the Andes Mountains. *Atmospheric Environment*, 232, 117546. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117546>
- Gul, C., Mahapatra, P. S., Kang, S., Singh, P. K., Wu, X., He, C., Kumar, R., Rai, M., Xu, Y., & Puppala, S. P.

- (2021). Black carbon concentration in the central Himalayas: Impact on glacier melt and potential source contribution. *Environmental Pollution*, 275, 116544. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116544>
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Hadley, O. L., & Kirchstetter, T. W. (2012). Black-carbon reduction of snow albedo. *Nature Climate Change*, 2(6), 437–440. <https://doi.org/10.1038/nclimate1433>
- Hakala, K., Addor, N., Teutschbein, C., Vis, M., Dakhlou, H., & Seibert, J. (2019). Hydrological Modeling of Climate Change Impacts. *Encyclopedia of Water, February*, 1–20. <https://doi.org/10.1002/9781119300762.wsts0062>
- Hall, D. K., & G. A. Riggs. (2021). MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m SIN Grid, Version 61 USER GUIDE. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD10A1.061>.
- He, C., Flanner, M. G., Chen, F., Barlage, M., Liou, K. N., Kang, S., Ming, J., & Qian, Y. (2018). Black carbon-induced snow albedo reduction over the Tibetan Plateau: Uncertainties from snow grain shape and aerosol-snow mixing state based on an updated SNICAR model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(15). <https://doi.org/10.5194/acp-18-11507-2018>
- Huang, H., Qian, Y., He, C., Bair, E. H., & Rittger, K. (2022). Snow Albedo Feedbacks Enhance Snow Impurity-Induced Radiative Forcing in the Sierra Nevada. *Geophysical Research Letters*, 49(11). <https://doi.org/10.1029/2022GL098102>
- Ines, A. V. M., & Hansen, J. W. (2006). Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 138(1–4). <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.03.009>
- Jakob Themeßl, M., Gobiet, A., & Leuprecht, A. (2011). Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *International Journal of Climatology*, 31(10). <https://doi.org/10.1002/joc.2168>
- Joshi, H., Naja, M., Srivastava, P., Gupta, T., Gogoi, M. M., & Suresh Babu, S. (2022). Long-Term Trends in Black Carbon and Aerosol Optical Depth Over the Central Himalayas: Potential Causes and Implications. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.851444>
- Kang, S., Zhang, Y., Qian, Y., & Wang, H. (2020). A review of black carbon in snow and ice and its impact on the cryosphere. *Earth-Science Reviews*, 210(September), 103346. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103346>
- Karmalkar, A. V., Thibeault, J. M., Bryan, A. M., & Seth, A. (2019). Identifying credible and diverse GCMs for regional climate change studies — case study: Northeastern United States. *Climatic Change*, 154(3–4). <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02411-y>
- Kendall, M. (1975). Rank correlation methods (4th edn.). *Charles Griffin. San Francisco, CA.*
- Kimbrough, S., Hanley, T., Hagler, G., Baldauf, R., Snyder, M., & Brantley, H. (2018). Influential factors affecting black carbon trends at four sites of differing distance from a major highway in Las Vegas. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 11(2). <https://doi.org/10.1007/s11869-017-0519-3>
- Kokhanovsky, A. A., Aoki, T., Hachikubo, A., Hori, M., & Zege, E. P. (2005). Reflective properties of natural snow: Approximate asymptotic theory versus in situ measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(7). <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.848414>
- Kokhanovsky, A. A., & Zege, E. P. (2004). Scattering optics of snow. *Applied Optics*, 43(7). <https://doi.org/10.1364/AO.43.001589>
- Kokhanovsky, A., Rozanov, V. V., Aoki, T., Odermatt, D., Brockmann, C., Krüger, O., Bouvet, M., Drusch, M., & Hori, M. (2011). Sizing snow grains using backscattered solar light. *International Journal of*

- Remote Sensing*, 32(22). <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.560621>
- Lapere, R., Huneeus, N., Mailler, S., Menut, L., & Couvidat, F. (2023). Meteorological export and deposition fluxes of black carbon on glaciers of the central Chilean Andes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(2). <https://doi.org/10.5194/acp-23-1749-2023>
- Lee, W. Y., Gim, H. J., & Park, S. K. (2023). Parameterizations of Snow Cover, Snow Albedo and Snow Density in Land Surface Models: A Comparative Review. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13143-023-00344-2>
- Lyapustin, A., Wang, Y. (2022). MODIS/Terra+Aqua BRDF Model Parameters Daily L3 Global 1km SIN Grid V061.
- Madeira, C. (2022). A review of the future impact of climate change in Chile: economic output and other outcomes. In *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* (Vol. 27, Issue 8). <https://doi.org/10.1007/s11027-022-10034-5>
- Malmros, J. K., Mernild, S. H., Wilson, R., Tagesson, T., & Fensholt, R. (2018). Snow cover and snow albedo changes in the central Andes of Chile and Argentina from daily MODIS observations (2000–2016). *Remote Sensing of Environment*, 209(February 2017), 240–252. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.072>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 245–259.
- Manterola, L. (2009). *Control fronterizo integrado los libertadores*.
- Mao, M., Zhou, Y., & Zhang, X. (2023). Evaluation of MERRA-2 Black Carbon Characteristics and Potential Sources over China. *Atmosphere*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/atmos14091378>
- Maraun, D. (2016). Bias Correcting Climate Change Simulations - a Critical Review. In *Current Climate Change Reports* (Vol. 2, Issue 4). <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0050-x>
- Masiokas, M., Rabatel, A., Rivera, A., Ruiz, L., Pitte, P., Ceballos, J. L., Barcaza, G., Soruco, A., Bown, F., Berthier, E., Dussaillant, I., & MacDonell, S. (2020). A Review of the Current State and Recent Changes of the Andean Cryosphere. In *Frontiers in Earth Science* (Vol. 8). <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00099>
- Mattar, C., Fuster, R., & Perez, T. (2022). Application of a Cloud Removal Algorithm for Snow-Covered Areas from Daily MODIS Imagery over Andes Mountains. *Atmosphere*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/atmos13030392>
- Ministerio de Energía. (2022). *Electro movilidad*. <http://biblioteca.digital.gob.cl/handle/123456789/3773>
- Molina, C., ToroA, R., MoralesS, R. G. E., Manzano, C., & Leiva-Guzmán, M. A. (2017). Particulate matter in urban areas of south-central Chile exceeds air quality standards. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 10(5). <https://doi.org/10.1007/s11869-017-0459-y>
- MOP-DGOP-DV. (1997). *Manual de Carreteras Volumen 1 Tomo II Evaluación de Proyectos Viales Interurbanos*.
- Mori, T., Kondo, Y., Ohata, S., Zhao, Y., Sinha, P. R., Oshima, N., Matsui, H., Moteki, N., & Koike, M. (2020). Seasonal Variation of Wet Deposition of Black Carbon in Arctic Alaska. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(16). <https://doi.org/10.1029/2019JD032240>
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. In *Nature* (Vol. 463, Issue 7282). <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Muñoz, R. C., Falvey, M. J., Arancibia, M., Astudillo, V. I., Elgueta, J., Ibarra, M., Santana, C., & Vásquez, C. (2018). Wind energy exploration over the atacama desert : A numerical model-guided

- observational program. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(10).
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0019.1>
- Negi, H. S., & Kokhanovsky, A. (2011). Retrieval of snow grain size and albedo of western Himalayan snow cover using satellite data. *Cryosphere*, 5(4). <https://doi.org/10.5194/tc-5-831-2011>
- Niu, H., Kang, S., Shi, X., Paudyal, R., He, Y., Li, G., Wang, S., Pu, T., & Shi, X. (2017). In-situ measurements of light-absorbing impurities in snow of glacier on Mt. Yulong and implications for radiative forcing estimates. *Science of the Total Environment*, 581–582.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.032>
- Notz, D. (2015). How well must climate models agree with observations? *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373(2052).
<https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0164>
- Osses, M. (2022). High-definition spatial distribution maps of on-road transport exhaust emissions in Chile, 1990–2020. *Earth System Science Data ESSD2021-208, Special Issue Surface Emissions for Atmospheric Chemistry and Air Quality Modelling, August*, 1–27.
- Osses, M., Rojas, N., Ibarra, C., Valdebenito, V., Laengle, I., Pantoja, N., Osses, D., Basoa, K., Tolvett, S., Huneeus, N., Gallardo, L., & Gómez, B. (2022). High-resolution spatial-distribution maps of road transport exhaust emissions in Chile, 1990–2020. *Earth System Science Data*, 14(3).
<https://doi.org/10.5194/essd-14-1359-2022>
- Ozdemir, H., Pozzoli, L., Kindap, T., Demir, G., Mertoglu, B., Mihalopoulos, N., Theodosi, C., Kanakidou, M., Im, U., & Unal, A. (2014). Spatial and temporal analysis of black carbon aerosols in Istanbul megacity. *Science of the Total Environment*, 473–474. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.102>
- Perkins, S. E., Pitman, A. J., Holbrook, N. J., & McAneney, J. (2007). Evaluation of the AR4 climate models' simulated daily maximum temperature, minimum temperature, and precipitation over Australia using probability density functions. *Journal of Climate*, 20(17). <https://doi.org/10.1175/JCLI4253.1>
- Qin, W., Zhang, Y., Chen, J., Yu, Q., Cheng, S., Li, W., Liu, X., & Tian, H. (2019). Variation, sources and historical trend of black carbon in Beijing, China based on ground observation and MERRA-2 reanalysis data. *Environmental Pollution*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.063>
- Qin, Y., & Xie, S. D. (2012). Spatial and temporal variation of anthropogenic black carbon emissions in China for the period 1980–2009. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(11), 4825–4841.
<https://doi.org/10.5194/acp-12-4825-2012>
- Réveillet, M., Dumont, M., Gascoïn, S., Lafaysse, M., Nabat, P., Ribes, A., Nheili, R., Tuzet, F., Ménégoz, M., Morin, S., Picard, G., & Ginoux, P. (2022). Black carbon and dust alter the response of mountain snow cover under climate change. *Nature Communications*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32501-y>
- Rößler, S., Witt, M. S., Ikonen, J., Brown, I. A., & Dietz, A. J. (2021). Remote sensing of snow cover variability and its influence on the runoff of sápmi's rivers. *Geosciences (Switzerland)*, 11(3), 1–24.
<https://doi.org/10.3390/geosciences11030130>
- Rowe, P. M. (2019). Black carbon and other light-absorbing impurities in snow in the Chilean Andes. *Scientific Reports*, July 2018, 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39312-0>
- Rowe, P. M., Cordero, R. R., Warren, S. G., Stewart, E., Doherty, S. J., Pankow, A., Schrempf, M., Casassa, G., Carrasco, J., Pizarro, J., MacDonell, S., Damiani, A., Lambert, F., Rondanelli, R., Huneeus, N., Fernandoy, F., & Neshyba, S. (2019). Black carbon and other light-absorbing impurities in snow in the Chilean Andes. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39312-0>
- Ruggeri, M. F., Bolaño-Ortiz, T., & Cereceda-Balic, F. (2024). Atmospheric black carbon in a key location of the Chilean Central Andes: Identifying patterns, sources, and potential impacts. *Atmospheric Environment*, 318, 120273. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2023.120273>

- Sanllehi, A. (2023). *Integración y evaluación de modelo de derretimiento y acumulación de nieve y hielo glaciar a modelo hidrológico USM*. 138.
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2). <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592>
- Schmitt, C. G., All, J. D., Schwarz, J. P., Arnott, W. P., Cole, R. J., Lapham, E., & Celestian, A. (2015). Measurements of light-absorbing particles on the glaciers in the Cordillera Blanca, Peru. *Cryosphere*, 9(1). <https://doi.org/10.5194/tc-9-331-2015>
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324). <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Sinha, P. R., Kondo, Y., Goto-Azuma, K., Tsukagawa, Y., Fukuda, K., Koike, M., Ohata, S., Moteki, N., Mori, T., Oshima, N., Førland, E. J., Irwin, M., Gallet, J. C., & Pedersen, C. A. (2018). Seasonal Progression of the Deposition of Black Carbon by Snowfall at Ny-Ålesund, Spitsbergen. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(2). <https://doi.org/10.1002/2017JD028027>
- Skiles, S. M. K., & Painter, T. (2017). Daily evolution in dust and black carbon content, snow grain size, and snow albedo during snowmelt, Rocky Mountains, Colorado. *Journal of Glaciology*, 63(237). <https://doi.org/10.1017/jog.2016.125>
- Streets, D. G. (2007). Dissecting future aerosol emissions: Warming tendencies and mitigation opportunities. *Climatic Change*, 81(3–4). <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9112-8>
- Sun, J., Birmili, W., Hermann, M., Tuch, T., Weinhold, K., Merkel, M., Rasch, F., Müller, T., Schladitz, A., Bastian, S., Löschau, G., Cyrus, J., Gu, J., Flentje, H., Briel, B., Asbach, C., Kaminski, H., Ries, L., Sohmer, R., ... Wiedensohler, A. (2020). Decreasing trends of particle number and black carbon mass concentrations at 16 observational sites in Germany from 2009 to 2018. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(11). <https://doi.org/10.5194/acp-20-7049-2020>
- Taiebat, M., Brown, A. L., Safford, H. R., Qu, S., & Xu, M. (2018). A review on energy, environmental, and sustainability implications of connected and automated vehicles. In *Environmental Science and Technology* (Vol. 52, Issue 20). <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00127>
- Tao, S., Xu, H., Ren, Y., Zhang, W., Meng, W., Yun, X., Yu, X., Li, J., Zhang, Y., Shen, G., Ma, J., Li, B., Cheng, H., Wang, X., & Wan, Y. (2021). Updated global black carbon emissions from 1960 to 2017: Improvements, trends, and drivers. *Environmental Science and Technology*, 55(12). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03117>
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. In *Bulletin of the American Meteorological Society* (Vol. 93, Issue 4). <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Van Vuuren, D. P., Den Elzen, M. G. J., Lucas, P. L., Eickhout, B., Strengers, B. J., Van Ruijven, B., Wonink, S., & Van Houdt, R. (2007). Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: An assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change*, 81(2). <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9172-9>
- Vermote, E., R. W. (2021). *MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 1km and 500m SIN Grid V061. 1*, 1–36. <http://modis-sr.ltdri.org>
- Vermote, E., & Kotchenova, S. (2011). MODIS directional surface reflectance product: Method, error estimates and validation. In *Remote Sensing and Digital Image Processing* (Vol. 11). https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6749-7_23
- Vidal, J. P., Hingray, B., Magand, C., Sauquet, E., & Ducharne, A. (2016). Hierarchy of climate and hydrological uncertainties in transient low-flow projections. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(9). <https://doi.org/10.5194/hess-20-3651-2016>
- Vong, R. J., Vong, I. J., Vickers, D., & Covert, D. S. (2010). Size-dependent aerosol deposition velocities during BEARPEX'07. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(12). <https://doi.org/10.5194/acp-10-5749->

2010

- Wang, Q., Zhao, Z., Tian, J., Zhu, C., Ni, H., Zhang, Y., Zhang, N., Shen, Z., Han, Y., & Cao, J. (2017). Seasonal Transport and Dry Deposition of Black Carbon Aerosol in the Southeastern Tibetan Plateau. *Aerosol Science and Engineering*, 1(4). <https://doi.org/10.1007/s41810-017-0016-y>
- Webb, M. J., Winter, J. M., Spera, S. A., Chipman, J. W., & Osterberg, E. C. (2020). Water, agriculture, and climate dynamics in central Chile's Aconcagua River Basin. *Physical Geography*. <https://doi.org/10.1080/02723646.2020.1790719>
- Yasunari, T. J., Bonasoni, P., Laj, P., Fujita, K., Vuillermoz, E., Marinoni, A., Cristofanelli, P., Duchi, R., Tartari, G., & Lau, K. M. (2010). Estimated impact of black carbon deposition during pre-monsoon season from Nepal Climate Observatory - Pyramid data and snow albedo changes over Himalayan glaciers. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(14). <https://doi.org/10.5194/acp-10-6603-2010>
- Yasunari, T. J., Koster, R. D., Lau, K. M., Aoki, T., Sud, Y. C., Yamazaki, T., Motoyoshi, H., & Kodama, Y. (2011). Influence of dust and black carbon on the snow albedo in the NASA Goddard Earth Observing System version 5 land surface model. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116(2). <https://doi.org/10.1029/2010JD014861>
- Yasunari, T. J., Koster, R. D., Lau, W. K. M., & Kim, K. M. (2015). Impact of snow darkening via dust, black carbon, and organic carbon on boreal spring climate in the earth system. *Journal of Geophysical Research*, 120(11). <https://doi.org/10.1002/2014JD022977>
- Zhang, F., Zhang, L., Zheng, Y., Wang, S., & Huang, Y. (2023). Remote Sensing-Based Simulation of Snow Grain Size and Spatial–Temporal Variation Characteristics of Northeast China from 2001 to 2019. *Remote Sensing*, 15(20). <https://doi.org/10.3390/rs15204970>
- Zhang, S., Wu, X., Zheng, X., Wen, Y., & Wu, Y. (2021). Mitigation potential of black carbon emissions from on-road vehicles in China. *Environmental Pollution*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116746>
- Zhang, Y., You, Q., Chen, C., Ge, J., & Adnan, M. (2018). Evaluation of downscaled CMIP5 Coupled with VIC model for flash drought simulation in a humid subtropical basin, China. *Journal of Climate*, 31(3). <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0378.1>
- Zheng, Y., Zhang, L., Li, W., Zhang, F., & Zhong, X. (2022). Spatial-Temporal Variation of Snow Black Carbon Concentration in Snow Cover in Northeast China from 2001 to 2016 Based on Remote Sensing. *Sustainability (Switzerland)*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/su14020959>
- Zhong, E., Li, Q., Sun, S., Chen, S., & Chen, W. (2017). Analysis of euphotic depth in snow with SNICAR transfer scheme. *Atmospheric Science Letters*, 18(12). <https://doi.org/10.1002/asl.792>
- Zhong, X., Kang, S., Zhang, W., Yang, J., Li, X., Zhang, Y., Liu, Y., & Chen, P. (2019). Light-Absorbing impurities in snow cover across Northern Xinjiang, China. *Journal of Glaciology*, 65(254), 940–956. <https://doi.org/10.1017/jog.2019.69>
- ZOU, C., XIONG, B., XUE, H., ZHENG, D., GE, Z., WANG, Y., JIANG, L., PAN, S., & WU, S. (2021). The role of new energy in carbon neutral. *Petroleum Exploration and Development*, 48(2). [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(21\)60039-3](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(21)60039-3)

5 Anexo B

Tabla B1. Nombre de las instituciones asociadas a los GCMs utilizados.

Abreviación	Institución
CAWCR	Centre for Australian Weather and Climate Research
CCCma	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization/
QCCCE	Queensland Climate Change Centre of Excellence
GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
MOHCCP	Met Office Hadley Centre
IPSL	Institut Pierre-Simon Laplace
AORI	Atmosphere and Ocean Research Institute
NIES	National Institute for Environmental Studies
JAMSTEC	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
MRI	Meteorological Research Institute
NorClim	Norwegian Climate Centre

Tabla B2. Parámetros del modelo radiativo SNICAR utilizados para calcular el albedo de la nieve.

Variable	Tipo/Producto	Descripción, valor o rango	Unidad
Tipo de Haz Solar	Constante	Directo	-
Tipo del grano de nieve	Constante	Placa hexagonal	-
Índice de refracción del hielo	Constante	Picard et al. (2016)	-
Factor de forma	Constante	He et al. 2017	-
Ángulo Cenit Solar	Constante	45	°
Densidad de la nieve	Constante	300	kg m ⁻³
Altura de nieve	Constante	0.5	m
Albedo del suelo	Constante	0.2	-
CBCS acumulada	$CBCS_{accum,ART}$ (*)	0 - 2000	ng g ⁻¹
Tamaño de grano de la nieve	MOD19A3D	50 - 3000	mm

(*) CBCS acumulada es 0 si se analiza el caso de albedo de la nieve recién caído (α_{clean}).

Tabla B3. Mediana estadística de cada métrica de evaluación (r_p , PSS, PPI, y KGE) para la comparación entre el $BC_{atm,RCT}$ con los GCM (primeras 15 filas) y $BC_{atm,RCT}$ con SDM (últimas 4 filas).

ID - GCM	Métrica de evaluación			
	r_p (-)	PSS (-)	PPI (-)	KGE (-)
1	-0.20	0.08	-0.51	-
2	-0.04	0.13	-0.36	-
3	0.15	0.08	-0.25	-
4	-0.10	0.20	-0.36	-
5	-0.31	0.05	-0.62	-
6	-0.29	0.06	-0.59	-
7	0.38	0.15	-0.06	-
8	0.36	0.63	0.26	-
9	0.37	0.15	-0.07	-
10	-0.20	0.09	-0.50	-
11	-0.20	0.09	-0.50	-
12	0.07	0.32	-0.15	-
13	0.03	0.28	-0.22	-
14	-0.19	0.12	-0.48	-
15	-0.20	0.12	-0.49	-
SDM	Métrica de evaluación			
	r_p (-)	PSS (-)	PPI (-)	KGE (-)
SA	-	-	-	0.120
SM	-	-	-	-0.063
EQM	-	-	-	0.145
QDM	-	-	-	0.157

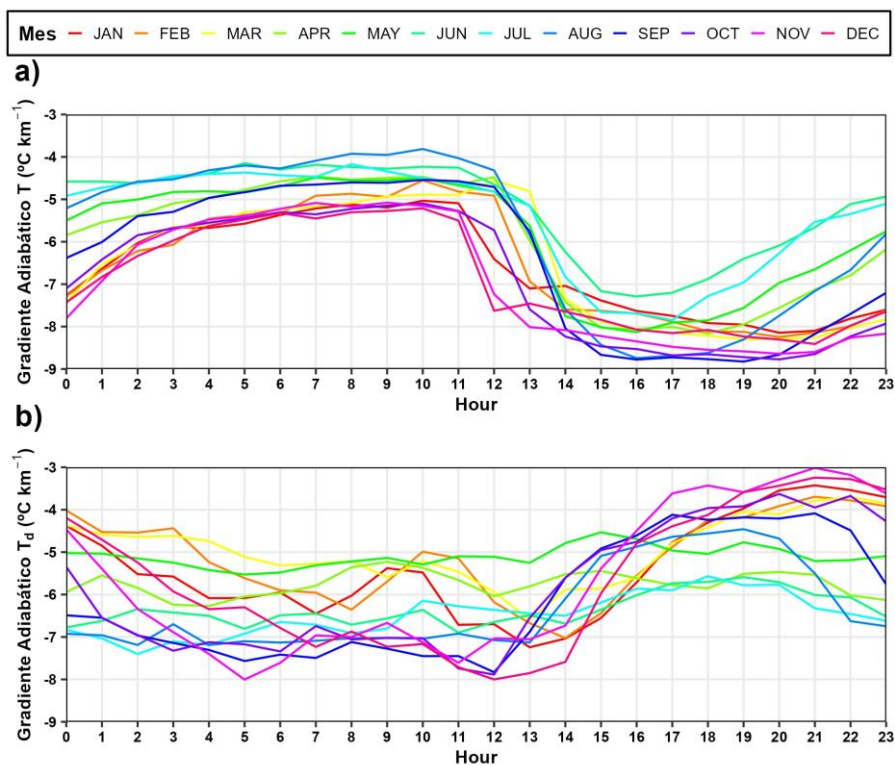


Figura B1. Promedio del gradiente adiabático para temperatura del aire (T) y temperatura de rocío (T_a) por cada hora y cada mes entre los años 2018-2022 para las estaciones meteorológicas Rio Juncal, Portillo y Cristo Redentor.

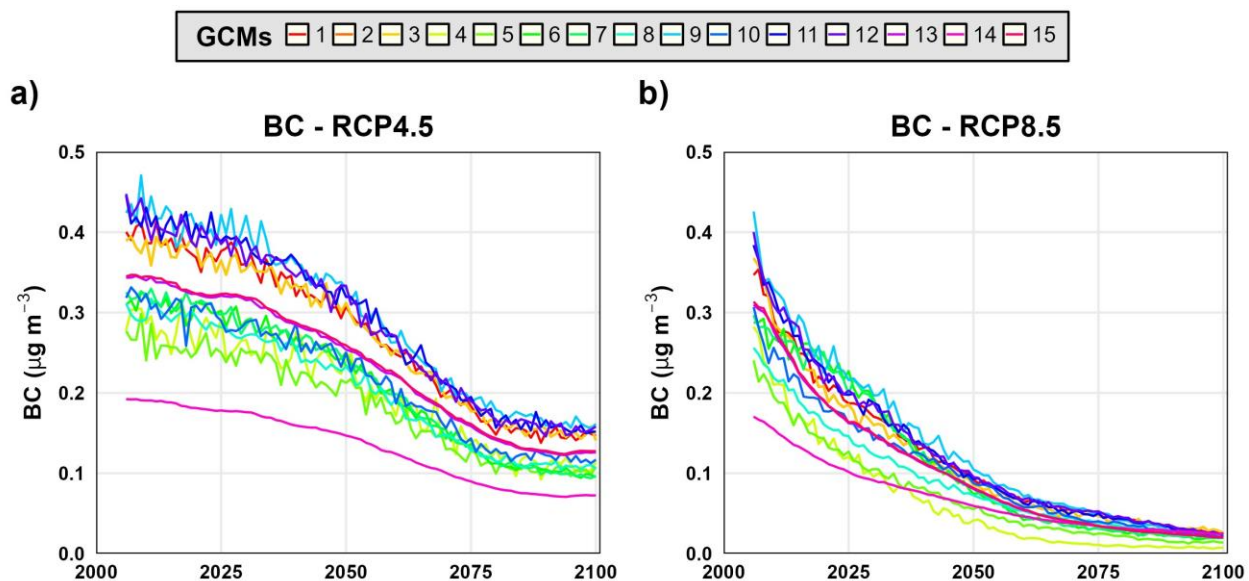


Figura B2. Serie promedio anual de BC superficial atmosférico de los GCMs entre 2006-2100 para los escenarios RCP 4.5 (a) y RCP 8.5 (b).

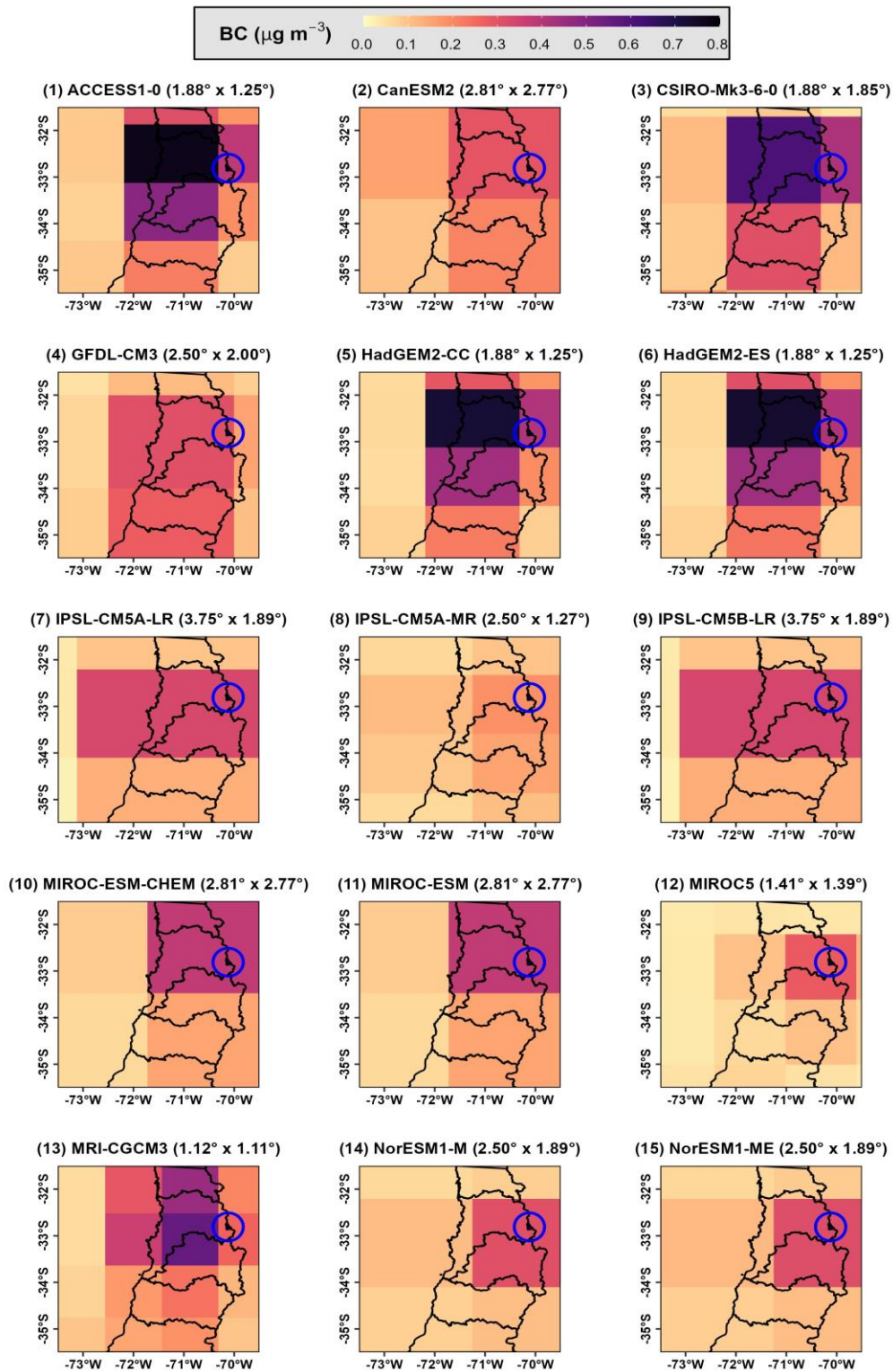


Figura B3. BC GCMs promediados entre 2006-2022 mostrando su ID, nombre del modelo y resolución espacial en grados (longitud y latitud). En un círculo azul se muestra la ubicación de la zona de estudio.

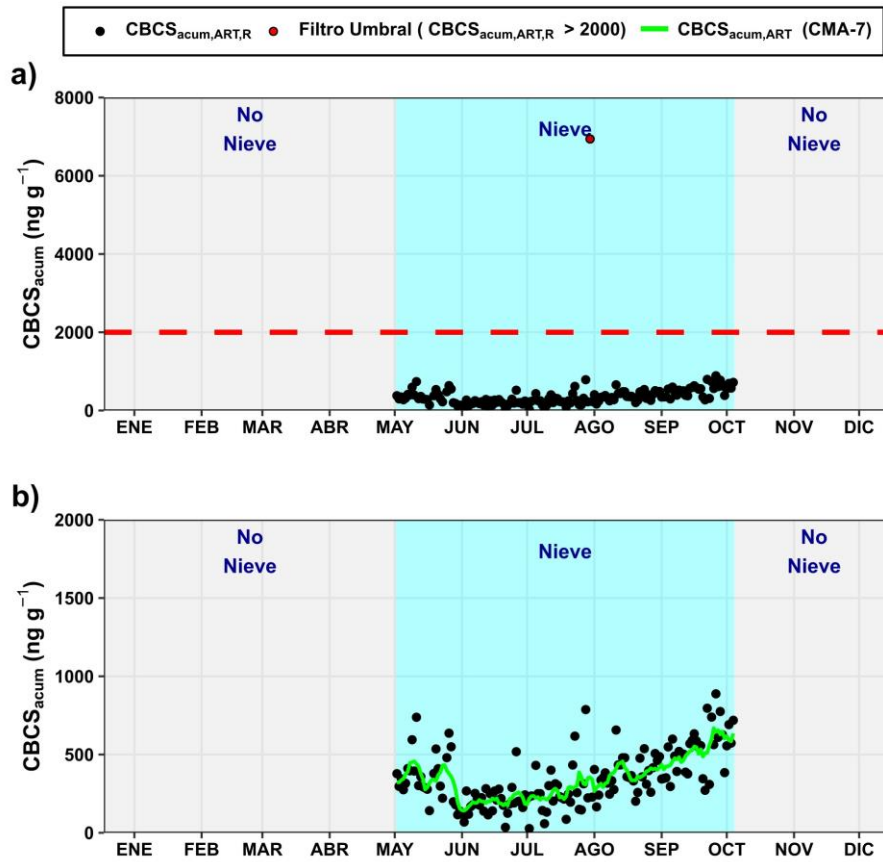


Figura B4. Procesamiento de CBCS (Píxel NNTK-1 – Año 2007). a) Filtro umbral $> 2000 \text{ ng g}^{-1}$, los puntos rojos son eliminados. b) Media Movil Central de 7 días (CMA-7) aplicada a los datos.

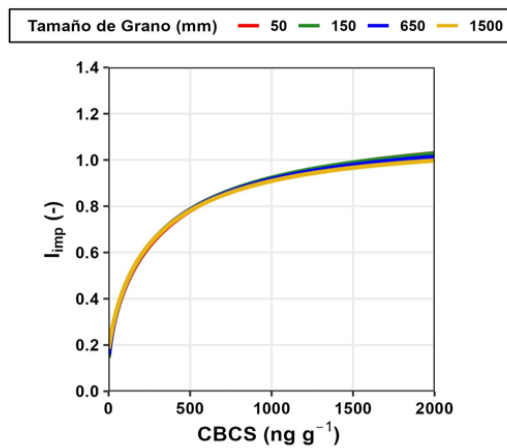


Figura B5. Índice de impurezas (I_{imp}) vs $CBCS_{acum}$. Este índice fue calculado en el modelo radiativo SNICAR, considerando los parámetros de la **Tabla B2**.

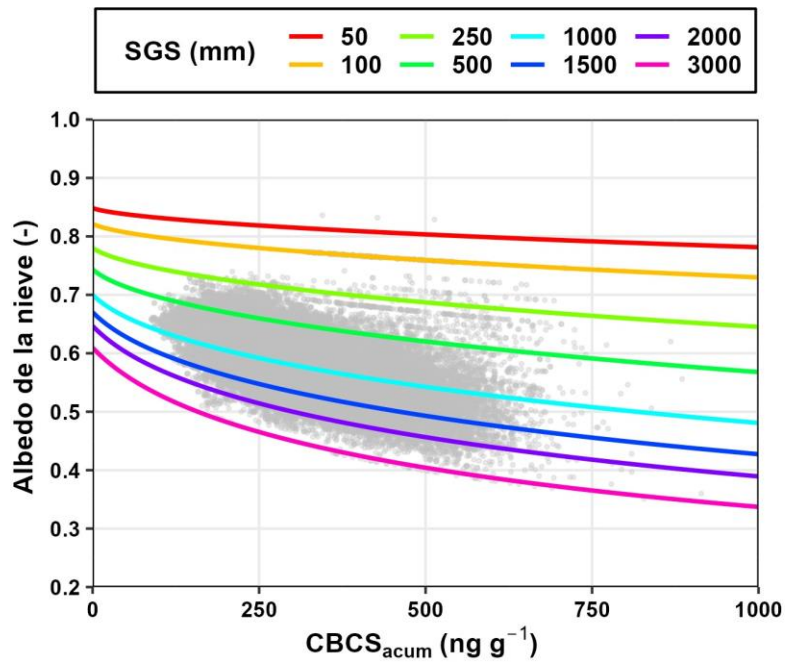


Figura B6. Variabilidad del Albedo de la Nieve en función de la $CBCS_{acum,ART}$ y del tamaño de grano de la nieve según los parámetros de **Tabla B2**. En color gris se muestran todos los valores de $CBCS_{acum,ART}$ y α_{dirty} en una resolución mensual entre JUN a OCT por cada píxel de 500x500 m en la cuenca entre 2006-2022.

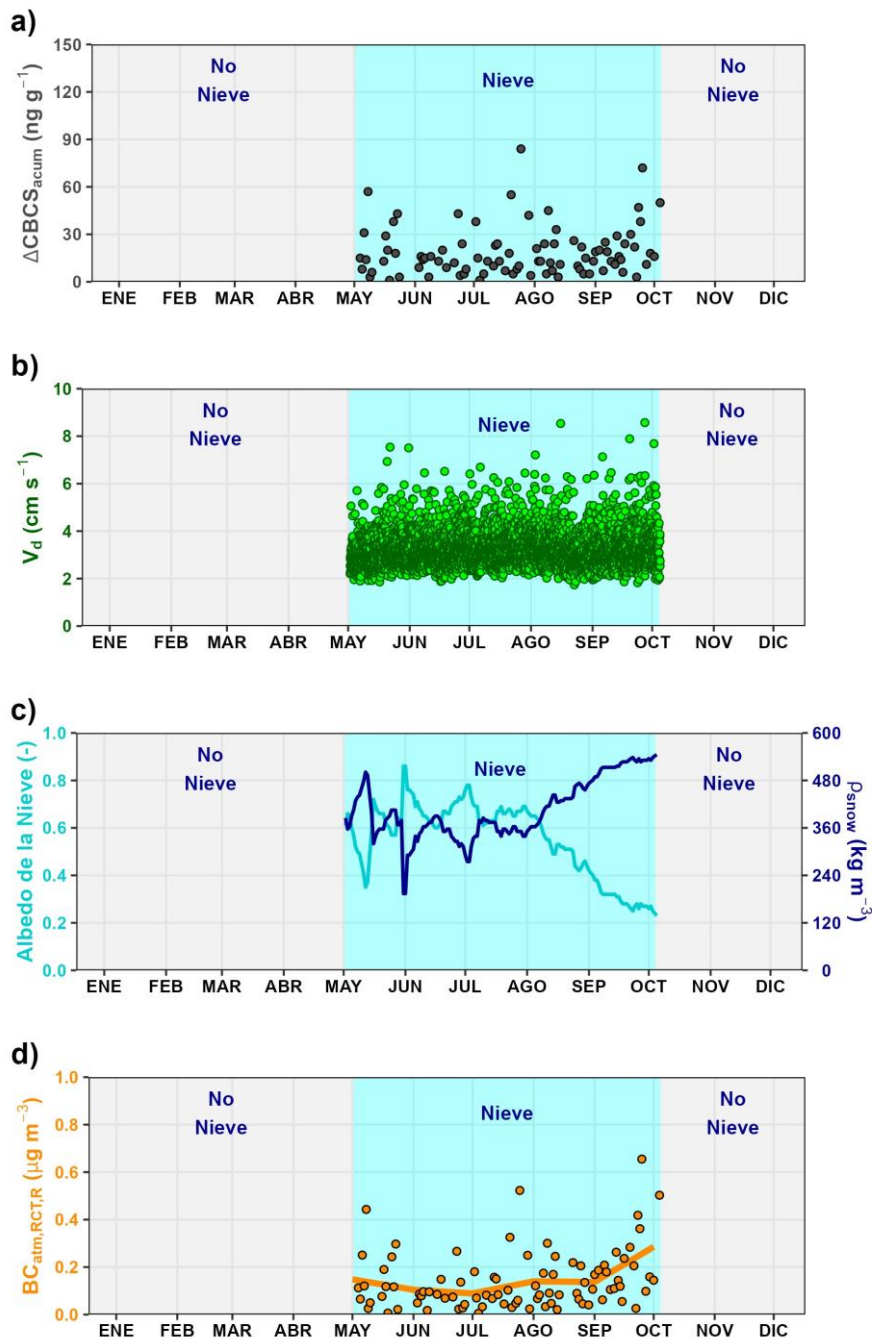


Figura B7. Pasos de cálculo de BC_{atm} (Píxel NNTK-1 - Año 2007). (a) Diferencia de CBCS acumuladas ($\Delta CBCS_{acum,ART}$) a escala diaria cuando $\Delta CBCS_{acum} > 0$. b) Velocidad de deposición seca de las partículas (V_d) a escala horaria utilizando el modelo empírico de Chen et al. (2012). c) Albedo de la nieve del producto MOD10A1/MYD10A1 y densidad superficial de la nieve (ρ_{snow}) reconstruido con la fórmula de Anderson (1976). d) BC_{atm} estimado con modelo estadístico según ecuación (9). Los puntos representan el BC_{atm} a nivel diario, mientras que la línea sólida representa el promedio mensual.

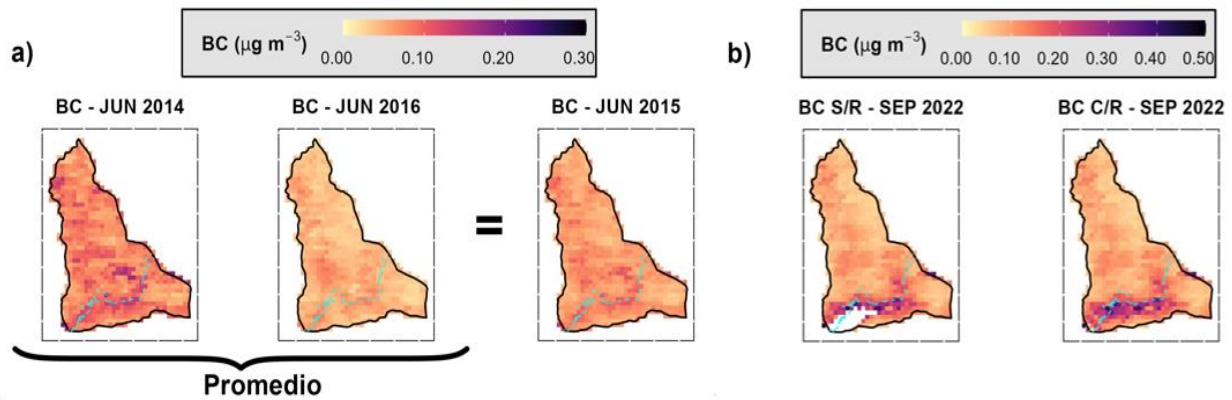


Figura B8. Metodología de relleno de BC atmosférico retrospectivo. (a) Promedio entre el año anterior y posterior para el mes conflictivo con más de 50% de sus datos NA. (b) Relleno espacial con el promedio de los vecinos cercanos.

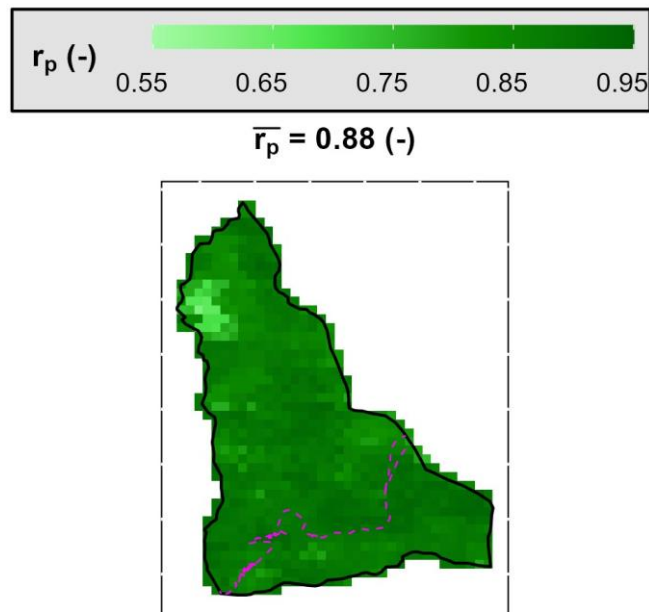


Figura B9. Correlación entre las series mensuales de $CBCS_{acum,ART}$ e I_{imp} entre los años 2006-2022. El título representa el promedio agregado a nivel de cuenca.

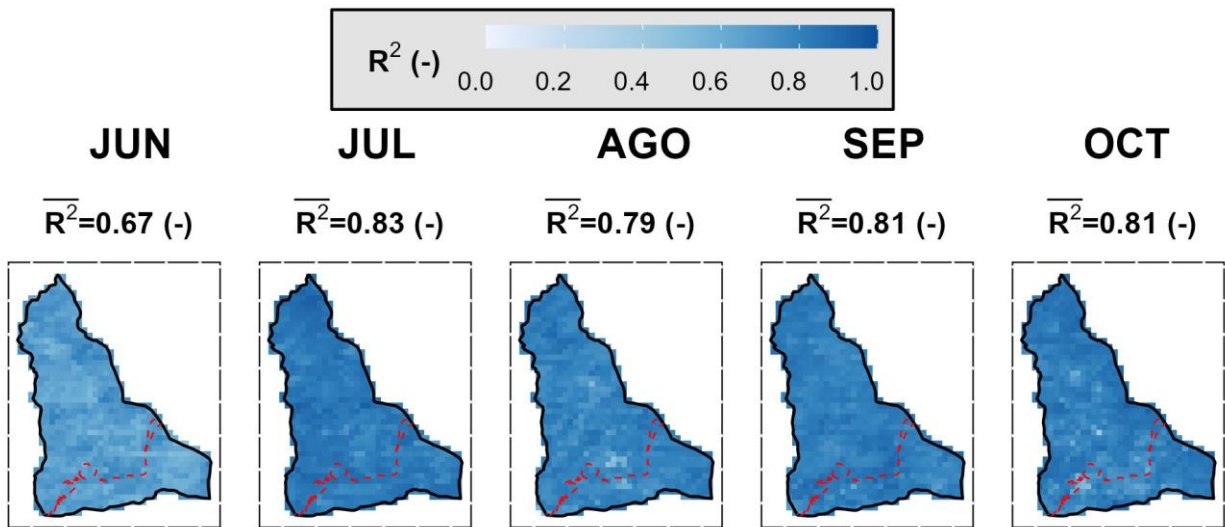


Figura B10. Coeficiente de determinación entre MTT y $BC_{atm,RCT}$ a nivel mensual entre JUN a OCT. Los títulos representan el promedio agregado a nivel de cuenca.