

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ESTIMACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE BLACK CARBON EN LA CUENCA NIVAL
ESTERO JUNCALILLO**

**FELIPE ARANDA D.¹,
LINA CASTRO H.¹,
TOMÁS BOLAÑO-ORTIZ²
FRANCISCO CERECEDA-BALIC^{3,4}**

RESUMEN

El *Black Carbon* (BC) es uno de los principales contaminantes atmosféricos proveniente de la combustión incompleta de combustibles fósiles, el cual, si se emite y deposita sobre una superficie nival, produce una disminución de su albedo, acelerando su ablación y, por ende, reduciendo la duración de la nieve. Esta aceleración produce una reducción en el aprovechamiento del recurso hídrico en la época estival, el cual es primordial para la agricultura y suministro de agua. Este trabajo tiene la finalidad de reconstruir el BC atmosférico a nivel puntual y de forma espaciotemporal en la cuenca nival Estero Juncalillo entre 2006-2022, mediante la aplicación de modelos de regresión lineal múltiple, en base a predictores como tráfico, modelos de reanálisis, variables meteorológicas y productos satelitales. Los principales resultados muestran que el tráfico fue el principal predictor para el modelo puntual, obteniendo un desempeño aceptable (Calibración KGE=0.54, Validación KGE=0.47). Respecto al modelo espaciotemporal, se observa que los mejores predictores fueron la humedad relativa, viento y el albedo con un desempeño aceptable (Calibración KGE=0.65, Validación KGE=0.17). El análisis espaciotemporal muestra que en zonas bajas (<3500 msnm), es donde hay mayores concentraciones ($\overline{BC}=0.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en comparación con las zonas altas (>3500 msnm, $\overline{BC}=0.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Estos resultados pueden ser utilizados en un modelo hidrológico-radiativo, con la finalidad de incorporar el efecto del BC sobre la nieve.

¹ Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile

² Departamento de Ciencias Agrarias, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Católica del Maule, Curicó, Chile

³ Centro de Tecnologías Ambientales, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile

⁴ Departamento de Química, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile

1. INTRODUCCIÓN

El carbono negro (BC, por sus siglas en inglés *Black Carbon*), proviene de la combustión incompleta de combustibles fósiles y quema de material orgánico. Ha sido considerado como el segundo contribuidor del cambio climático después de los gases de efecto invernadero, debido a su habilidad para absorber la radiación solar (Bond et al., 2013). Esta característica es primordial en ambientes asociados a la criósfera, donde la deposición del BC sobre superficiales nivales produce una disminución del albedo del pack de nieve, acelerando su ablación (Lapuerta et al., 2022). Por ende, la determinación y cuantificación del BC en cuencas nivo-glaciares afectas a la contaminación de BC, se vuelve esencial para estimar los potenciales cambios en la duración de la nieve y la respuesta de su escorrentía. Por ende, en la modelación hidrológica, se hace necesario incorporar no solo el cambio en las forzantes meteorológicas, sino que también de este tipo de contaminantes que pueden impactar la criósfera. Una forma de hacerlo es vinculando una de las propiedades reflectivas de la nieve (albedo) con la variación espacial y temporal del BC atmosférico posteriormente depositado en nieve. Sin embargo, no existe una amplia red de monitoreo ambiental en alta montaña que permita estimar la variación espacial de los contaminantes y la magnitud de ella.

Como respuesta a esta problemática, estudios han reconstruido la deposición de BC mediante productos satelitales, mientras que otros se han enfocado en estudiar la asociación del BC con variables de campo y/o reanálisis mediante modelos estocásticos (Bertò et al., 2021; Prabhu et al., 2020), los cuales concuerdan que la cercanía de las fuentes de contaminación implica mayores concentraciones de BC. Es por ello, que este estudio tiene como objetivo obtener la variación espaciotemporal del BC atmosférico en la cuenca nival Estero Juncalillo, por medio de modelos de regresión lineal múltiple en función de distintos predictores en el periodo 2006-2022. Para llevar a cabo esto, primero se reconstruirá temporalmente el BC atmosférico de manera puntual en el píxel del Laboratorio Refugio Nunatak-1, utilizando como predictores variables meteorológicas, estadísticas vehiculares y modelos de reanálisis a una resolución temporal diaria. Luego, para estimar la variación espaciotemporal, se emplearán productos satelitales derivados de Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) y variables meteorológicas a escala mensual con una resolución espacial final de 0.5x0.5 km, con el fin de extrapolar los valores en toda la cuenca.

2. ZONA DE ESTUDIO

La cuenca Estero Juncalillo (32.81°S, 70.12°W) es una subcuenca de la cuenca del Aconcagua, situada en la región de Valparaíso, Chile (**Figura 1A**). La cuenca cuenta con un área de 83.4 km², una laguna (1.5 km²), seis estaciones meteorológicas de distintas instituciones, glaciares rocosos (5.8 km²) y descubiertos (0.3 km²) según datos del Inventario Nacional de Glaciares (IPG; DGA, 2009), y le atraviesa la Ruta CH-60 que conecta con el “Paso Internacional Los Libertadores”, que corresponde a un paso fronterizo localizado en la Cordillera de los Andes (**Figura 1B**). Además, presenta un rango de elevaciones entre los 2200-4740 msnm (**Figura 1C**). La zona posee un régimen nival, caracterizado por un clima mediterráneo frío y tundra de lluvia invernal (Sarricolea et al., 2017), en el que los veranos son cálidos y secos, mientras que en invierno es frío (**Figura 1D**). Durante las últimas dos décadas, se han registrado en la cuenca temperaturas mínimas (máximas) promedios mensuales de -0.8 °C (11.3 °C) en invierno (verano) y precipitaciones medias entre mayo-agosto de 215 mm en promedio, según datos de temperatura de la estación meteorológica Portillo (<https://snia.mop.gob.cl/>) de la Dirección General de Aguas (DGA) y datos

de precipitación del producto grillado CR2MET v2.0 (Alvarez-Garretón et al., 2018). Asimismo, dicho paso fronterizo, concentra el mayor tráfico en la época estival, con menores valores en invierno, por el cierre del paso por condiciones climáticas y nieve (**Figura 1D**). También, es importante nombrar que el paso fronterizo corresponde a la principal ruta terrestre que conecta la zona central de Chile con Argentina, la cual presenta un gran flujo vehicular, compuesto principalmente por autos y camiones, el cual ha ido en aumento desde 200 a 900 mil vehículos entre los años 2006-2017 (**Figura 1E**), siendo la principal fuente de emisión de BC que tenderá a depositarse sobre la nieve. Por último, se recalca la presencia del Laboratorio-Refugio Nunatak-1 (NNTK-1; 32.84°S, 70.13°W), perteneciente al Centro de Tecnologías Ambientales (CETAM), el cual se encuentra ubicado a 3000 msnm y se encarga de recopilar información para el estudio del impacto de la contaminación ambiental, como lo es BC y variables meteorológicas de la nieve.

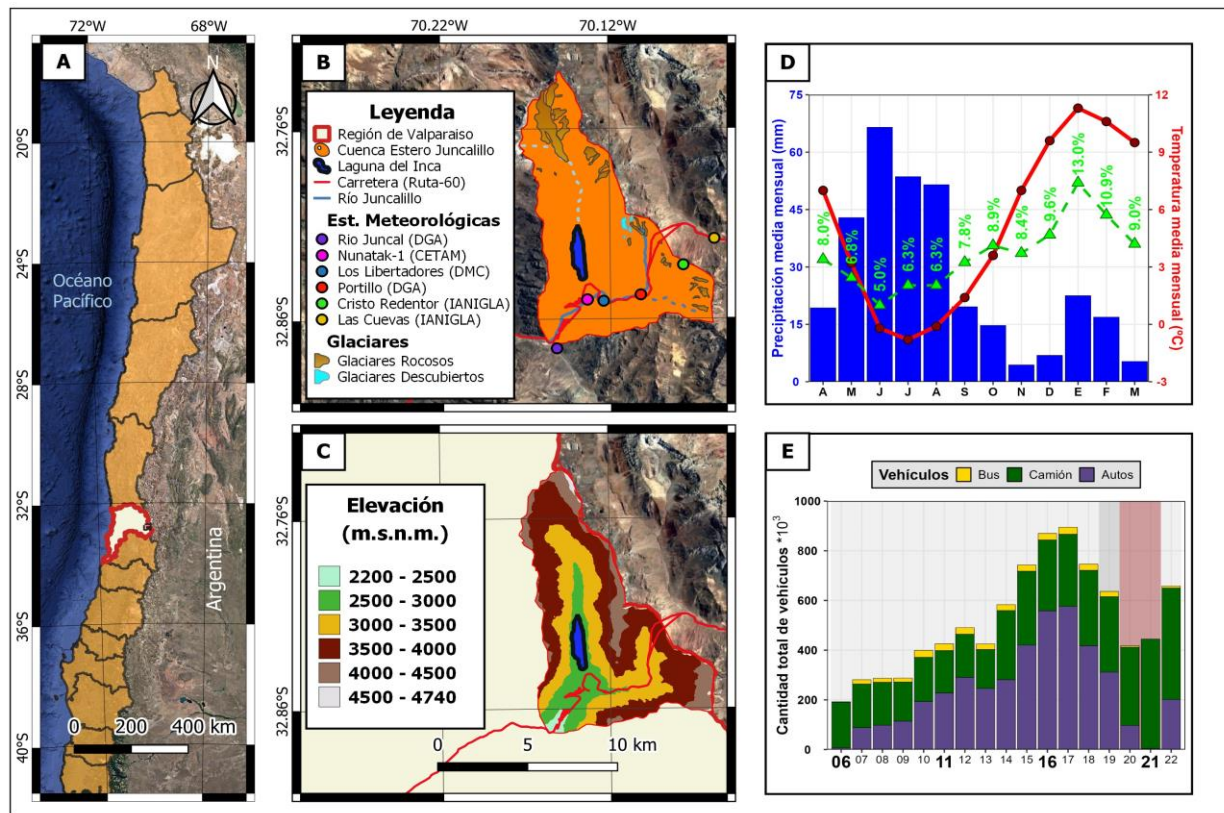


Figura 1. Mapa de la cuenca Estero Juncalillo (A) Ubicación de la zona de estudio en Chile y Sudamérica. (B) Bordes de la zona de estudio, incluyendo estaciones meteorológicas y carretera. (C) Mapa de elevaciones de la cuenca. (D) Variabilidad interanual de la precipitación (azul), temperatura (rojo) y porcentaje del tráfico total anual del paso fronterizo (verde). (E) Serie del tráfico total anual desde 2006-2022 por tipo de vehículo.

3. METODOLOGÍA

En primer lugar, se nombran los datos utilizados para los modelos de regresión lineal efectuados a nivel puntual como espaciotemporal. Luego, se nombra la metodología utilizada para la reconstrucción a nivel puntual del BC y, por último, el procedimiento para la estimación espaciotemporal del BC en la cuenca. Los predictores seleccionados fueron escogidos en base a la disponibilidad de datos como su potencial correlación con el BC.

Datos de regresión lineal múltiple puntual

- **Datos de BC atmosférico**

Se utiliza las mediciones de BC atmosférico del Multi-Angle Absorption Photometer (MAAP) del NNTK-1, el cual presenta mediciones con una escala temporal entre 5 a 30 minutos (**Tabla I**). Los datos se encuentran presentes desde 2016 hasta 2022, con periodos de ausencia de datos.

- **Variables meteorológicas**

Se utiliza la información meteorológica del NNTK-1, las cuales cuentan con información desde marzo 2017 hasta 2022 a una resolución de minutos (**Tabla I**). Esta nuevamente presenta ausencia de información, la que es completada con estaciones meteorológicas cercanas, tales como Estación “Los Libertadores” (<https://climatologia.meteochile.gob.cl/>) y “Portillo”, pertenecientes a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y DGA, respectivamente. Estos datos son usados, ya que, anteriormente ha sido estudiado el BC con variables meteorológicas, encontrándose buenas correlaciones, sobre todo con la magnitud del viento (Jereb et al., 2021).

- **Tráfico Vehicular**

Se utiliza la información del tráfico vehicular del Paso Fronterizo “Cristo Redentor” (Los Libertadores) proveniente de las estadísticas de tráfico terrestre del Servicio Nacional de Aduanas (<https://www.aduana.cl/>), el que cuenta con información diaria de la cantidad de vehículos (autos, buses y camiones) que ingresan y salen del país (**Tabla I**). Esta información es utilizada, ya que, distintos estudios han postulado mayor concentración de BC a mayor número de vehículos transitando por una vía terrestre (Ozdemir et al., 2014).

- **Productos de Reanálisis**

Se utiliza la información de las variables de concentración de BC atmosférico y AOD ($\lambda=550$ nm) de los productos de reanálisis de Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2, <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) y Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS EAC4, <https://ads.atmosphere.copernicus.eu/#!/home>), los cuales tienen una resolución horaria y trihoraria, respectivamente (**Tabla I**). Estos son usados, ya que, en estudios anteriores (Prabhu et al., 2020) han mostrado buenas correlaciones con mediciones de campo. La información de la serie extraída y utilizada de cada producto está asociada al píxel donde se ubique el NNTK-1.

Datos de regresión lineal múltiple espaciotemporal

- **Productos satelitales MODIS**

Se revisaron un total de 8 productos MODIS asociados a la nieve y emisión de contaminantes. Cuatro de estos fueron descartados por la ausencia de información en el periodo invernal (e.g.: AOD no presentaba información en dichos meses). En la **Tabla I**, se resumen los productos finales seleccionados. Asimismo, se utiliza el NDSI para filtrar la existencia o no de nieve en los píxeles.

- **Productos de variables meteorológicas desagregados**

A través de la información meteorológica de las estaciones Río Juncal, Portillo y Cristo Redentor, perteneciendo las primeras dos a la DGA y la segunda al Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA, <https://observatorioandino.com/estaciones/>), se genera un producto de temperatura y humedad relativa con resolución de 0.5x0.5 km. Para esto, se calcula gradiente a nivel horario por cada mes para la temperatura y temperatura de rocío, para luego mediante la información de Portillo, interpolarla en toda la cuenca. Respecto a la velocidad del viento, esta se obtiene de forma distribuida a nivel horario utilizando un ajuste calibrado en función de valores extraídos del Explorador de Energía Eólica (Muñoz et al., 2018). Por último, se utiliza el producto de precipitación del CR2MET v2.0.

Tabla 1: BC atmosférico del NNTK-1 y predictores para reconstruir el BC a nivel puntual

Sección	Sigla	Variable	Un.	Producto o Procedencia	Fecha inicial de datos	Escala	
						Espacial	Temporal
BC observado	BC	BC atmosférico	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	CETAM (NNTK-1)	01-06-2016	Puntual	30-min
Variable Meteorológica	TEMP	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	CETAM (NNTK-1)	01-03-2017	Puntual	min
	WV	Velocidad del Viento	m/s				
	WD	Dirección del Viento	$^{\circ}$				
	RH	Humedad Relativa	%				
Tráfico	VEH	Vehículos	-	ADUANAS CL (CR)	01-01-2006	Carretera	dia
Modelos de Reanálisis	BCM	Concentración de BC atmosférico	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	MERRA-2	01-01-1980	$0.5^{\circ}\times 0.625^{\circ}$	hr

Tabla 2: Productos MODIS y variables meteorológicas para estimación espaciotemporal del BC

Función	Sigla	Variable	Un.	Producto	Resolución	
					Espacial	Temporal
Predictor MODIS	ALB	Albedo Nieve	-	MOD10A1	0.5 km	Diaria
	LST	Temperatura Superficial del Suelo Diurna	$^{\circ}\text{C}$	MOD11A1	1.0 km	Diaria
	SGS	Tamaño de grano de nieve	mm	MCD19A1	1.0 km	Diaria
	CWV	Columna de vapor de agua	cm	MCD19A2	1.0 km	Diaria
Detección	NDSI	Índice Diferencial Normalizado de Nieve	-	MOD10A1	0.5 km	Diaria
Predictor Variable Meteorológica	TEMP	Temperatura del aire	$^{\circ}\text{C}$	Grad. Est. Met.	0.5 km	Horario
	RH	Humedad relativa	%	Grad. Est. Met.	0.5 km	Horario
	WV	Velocidad del viento a 10 m	m/s	Exp. Eol. CL	0.5 km	Horario
	PP	Precipitación	mm	CR2MET	5.0 km	Diario

Reconstrucción del BC atmosférico en NNTK-1

Debido a que se cuenta con datos faltantes y pocos años de medición en NNTK-1 (BC Observado), se busca un modelo de regresión lineal múltiple puntual a escala diaria para reconstruir el BC atmosférico para el periodo 2006-2022 (BC-RCT) en función de los predictores de la **Tabla 1**. En primer lugar, se calcula la correlación de Pearson entre las series diarias de BC Observado y cada uno de los predictores por cada mes del año, con la finalidad de distinguir cuales son las variables que están más correlacionadas con el BC Observado. Acto seguido, se definen modelos de regresión lineal múltiple del BC observado en base a los predictores por cada mes del año. Se descartan aquellas variables que no minimicen el Akaike Information Criteria (AIC) (Bozdogan, 1987) y que no presenten una coherencia física con el BC, según estudios anteriores. Para el periodo de calibración del BC-RCT, fueron utilizados los datos desde 2016-2019 y 2022 (65% de los datos), mientras que la verificación se hará con los datos del 2020-2021 (35% de los datos). Por último, para evaluar el desempeño de BC-RCT, se utilizaron las siguientes métricas de evaluación: Correlación de Pearson, Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE, Nash & Sutcliffe, 1970), Porcentaje de sesgo (Bias, Gupta et al., 1999) y Coeficiente de eficiencia de Kling-Gupta (KGE, Gupta et al., 2009). Además, se calcula el Factor de Inflación de la Varianza (FIV), para evitar colinealidad. Los supuestos necesarios para utilizar un modelo de regresión lineal múltiple (homocedasticidad, normalidad e independencia de los residuos) fueron verificados a través de análisis gráficos de los residuos (no mostrado en presente trabajo).

Estimación espacial del BC atmosférico en la cuenca Estero Juncalillo

Para obtener la variación espaciotemporal del BC en la cuenca de estudio, se realiza dos modelos de regresión lineal múltiple en los meses donde se concentra la presencia de la nieve (MAY-OCT),

donde la variable dependiente es BC-RCT en función de los predictores de la **Tabla 1**. La salida del modelo se define como BC-MODIS, considerando como periodo de calibración los años 2006-2017 y validación entre los años 2018-2022. El primer modelo se realiza entre los meses MAY, JUN y OCT (MJO, meses externos a invierno) y el segundo en los meses de JUL, AGO y SEP (JAS, meses internos de invierno). Además, se considera solamente la información de los píxeles donde exista la presencia de nieve ($NDSI > 0.4$, Dadashi et al., 2008) y las variables fueron agregadas a nivel mensual, debido a la falta de información de los productos, errores del satélite o nubosidad. Como en el apartado anterior, se descartaron las variables que no minimicen el AIC y que no posean un sentido físico con el BC. Por otro lado, se evalúa su desempeño con las mismas métricas de evaluación y se calcula el FIV. Por último, los modelos de regresión lineal múltiple son aplicados a todos los píxeles de la cuenca, obteniéndose el BC-MODIS a nivel mensual.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La **Figura 2A** muestra que los vehículos son los que presentan correlaciones principalmente positivas y significativas ($r=0.3-0.6$) para todos los meses del año, concordante con la literatura (Ozdemir et al., 2014). Mientras que, BC MERRA-2 presenta principalmente correlaciones positivas y significativas en ENE-FEB ($r=0.82$ y 0.45). En el resto del año, se observa principalmente correlaciones positivas y no significativas, exceptuando a octubre. Esta correlación positiva ha sido encontrada en otros estudios (Prabhu et al., 2020). Respecto a las variables meteorológicas, se observa que la temperatura presenta en general una correlación positiva con BC, lo cual puede ser explicado a que ambas variables presentan una variabilidad interanual similar (**Figura 1D**). Respecto a la magnitud del viento, se puede observar una correlación negativa (principalmente), lo cual concuerda con el estudio de Jereb et al., 2021, donde se muestra que valores altos de viento, produce una disminución del BC. Respecto a dirección del viento, esta presenta una preferencia al suroeste (SW) durante todo el año (no mostrado), exceptuando en invierno donde prevalece en dirección noreste (NE). Este cambio puede ser explicado por los vientos catabáticos (Ayala et al., 2017), debido a la presencia de nieve y menor radiación que afecta a zonas de montaña. Como se aprecia en la **Figura 1B**, el NNTK-1 se encuentra más cercano a la carretera cuando el viento sopla en dirección SW, siendo el estudio de Jereb et al., 2021 válido. Sin embargo, en invierno, la correlación positiva entre BC y la magnitud del viento se explica por vientos suficientemente fuertes desde NE que son capaces de transportar el emitido BC desde el otro lado de la carretera. La magnitud de la dirección puede ser explicada por los mismos motivos. Por último, se observa que la correlación entre RH con BC describe valores positivos en la mayoría de los meses, concordante con la literatura (Sun et al., 2013), exceptuando invierno, donde se puede explicar que dicha correlación negativa se explica por eventos de nevadas, los cuales están asociados a un mayor valor de RH, disminuye el flujo vehicular y, por ende, disminuye el BC.

En la **Tabla 3**, se muestran los resultados de los modelos de regresión lineal múltiple, observándose que todas las variables poseen una relación positiva con el BC, exceptuando al viento con una relación negativa. Asimismo, se complementa que el $FIV < 1.5$ para todos los casos, por lo que, se puede comentar que no existe colinealidad entre las variables. En la **Figura 2B**, se observa la importancia relativa (IR) de los parámetros, donde se aprecia para ENE-ABR y AGO-DIC que los vehículos y variables meteorológicas presentan un IR entre 30-55% y 10-32%, respectivamente. Mientras que, BC-MERRA-2, alcanza un valor máximo de 60% en ENE, y menores valores (10-40%) en FEB, ABR, OCT y NOV. En los meses MAY-JUL, se aprecia que los vehículos son los que representan al BC, exceptuando a JUN, donde RH toma participación con un 25%. De estos

resultados, podemos concluir que la principal componente para representar el BC corresponde al tráfico vehicular durante todo el año, y en segundo lugar representado por la variable meteorológica y el BC MERRA-2. En la **Figura 3A**, se muestra el BC observado del NNTK-1 y reconstruido a escala diaria (BC-RCT), apreciándose que, para el periodo de calibración, las métricas de evaluación muestran un desempeño satisfactorio ($KGE=0.57$), mientras que para el periodo de validación se observan métricas con un desempeño menor ($KGE=0.45$), pero aun aceptables. En la **Figura 3B**, se muestra un gráfico de dispersión entre los valores observados y modelados, donde se aprecia una leve tendencia a subestimar los valores más bajos en magnitud. Esto puede ser explicado por la dificultad del instrumento de detectar bajas concentraciones de BC, el cual tiende a presentar bastantes oscilaciones y no presentar valores tan representativos.

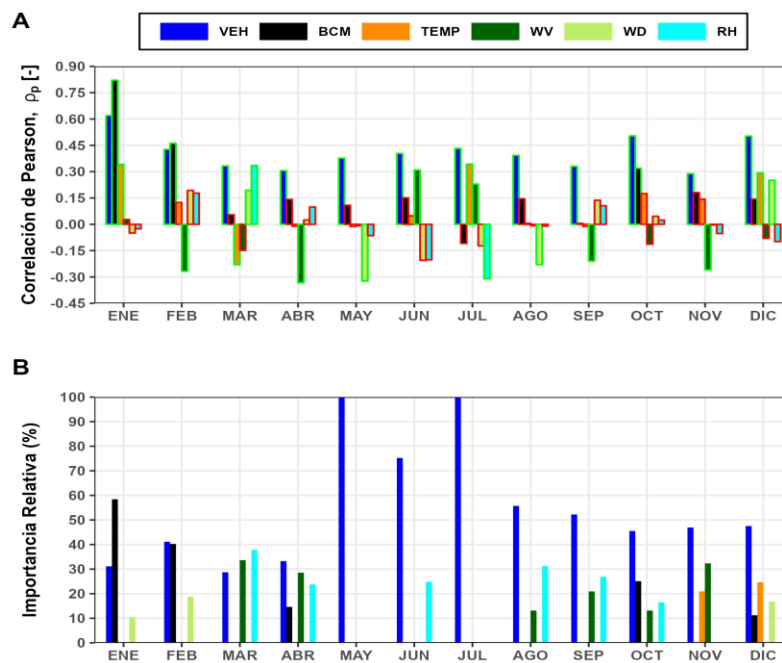


Figura 2. (A) Correlación de Pearson a escala diaria por cada mes entre el BC NNTK-1 con tráfico vehicular, modelo de reanálisis y variables meteorológicas. El color verde de cada barra implica una correlación significativa ($p < 0.05$), mientras que el rojo indica lo contrario. (B) Importancia relativa de la regresión lineal múltiple por cada una de las variables.

Tabla 3: Resultados modelo multilíneal (BC-RCT) en función de mejores predictores por mes

Mes	Nº datos	Desempeño		Parámetros del modelo							Factor de Inflación de la Varianza (FIV)					
		r	p-value	inter	veh*10 ⁴	bcm	temp	wv	wd*10 ²	rh*10 ²	veh	bcm	temp	wv	wd	rh
1	152	0.90	$p < 0.05$	-0.49	1.29	1.94	-	-	0.13	-	1.16	1.18	-	-	1.04	-
2	102	0.68	$p < 0.05$	-0.37	1.66	1.13	-	-	0.11	-	1.02	1.01	-	-	1.02	-
3	103	0.49	$p < 0.05$	0.11	0.94	-	-	-0.06	-	0.61	1.13	-	-	1.13	-	1.25
4	90	0.56	$p < 0.05$	0.01	1.54	1.41	-	-0.10	-	0.40	1.13	1.09	-	1.06	-	1.17
5	93	0.38	$p < 0.05$	0.12	1.78	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	85	0.42	$p < 0.05$	-0.05	2.26	-	-	-	-	0.24	-	-	-	-	-	-
7	96	0.43	$p < 0.05$	0.15	1.32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	90	0.52	$p < 0.05$	-0.16	1.95	-	-	-0.03	-	0.52	1.48	-	-	1.12	-	1.39
9	92	0.43	$p < 0.05$	0.03	1.16	-	-	-0.03	-	0.21	1.13	-	-	1.06	-	1.18
10	96	0.57	$p < 0.05$	0.00	0.73	0.73	-	-0.02	-	0.13	1.08	1.17	-	1.03	-	1.13
11	82	0.48	$p < 0.05$	0.11	1.28	-	0.01	-0.07	-	-	1.18	-	1.27	1.18	-	-
12	144	0.61	$p < 0.05$	-0.60	1.75	0.25	0.03	-	0.13	-	1.01	1.01	1.04	-	1.04	-

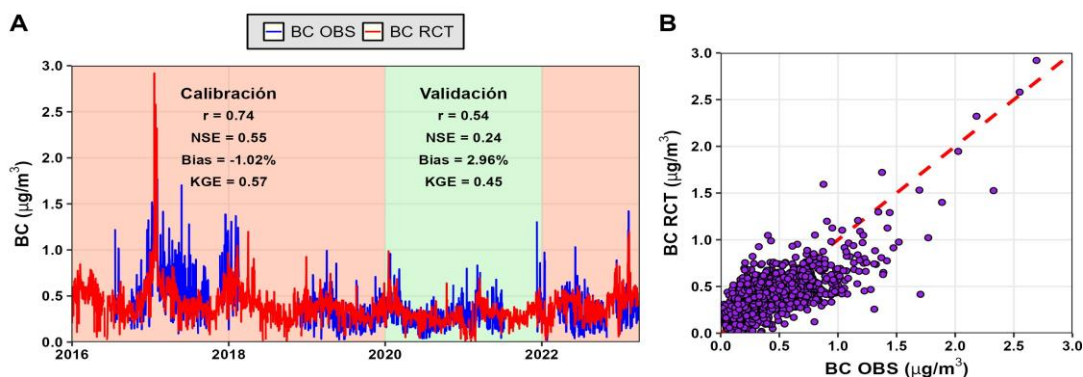


Figura 3. (A) Calibración y validación del BC mediante modelos de regresión lineal múltiple en función de predictores. (B) Gráfico de dispersión entre BC observado y modelado (BC-RCT).

En la **Tabla 4**, se revelan los predictores del modelo espaciotemporal que mejor representan al BC en los meses donde persiste primordialmente la nieve, mostrando que todos poseen $FIV < 1.3$, (ausencia de colinealidad). Como era esperable, el albedo es uno de las principales variables para representar el BC atmosférico, presentando una relación negativa, ya que, las zonas con mayores concentraciones de BC, presentarán una depositación de BC y, por ende, una mayor disminución de su albedo (por las propiedades de cuerpo negro del BC) (Beres et al., 2020). Asimismo, se observa una relación positiva con el tamaño de grano (SGS), lo que se explica que zonas con mayor BC, presentarán menor albedo, absorben más radiación y estarán expuestas a mayor metamorfismo. Por otro lado, alineadas con las conclusiones del modelo anterior, la magnitud del viento posee una relación negativa y la RH una relación positiva. Además, se observa que las variables que presentan mayor IR en el modelo son el RH (38-45%), viento (29-30%) y albedo (20-26%). La **Figura 4A** muestra los resultados del BC-RCT del NNTK-1 y la salida del modelo BC-MODIS a escala mensual, donde se aprecia para la calibración un desempeño aceptable para la calibración ($KGE=0.65$) y validación ($KGE=0.17$). La **Figura 4B**, muestra el gráfico de dispersión entre el BC-RCT y BC-MODIS, observándose que los valores más grandes tienden a subestimarse. Esto puede ser explicado porque el modelo no es capaz de detectar los valores más altos de contaminación asociado a fenómenos altos de contaminación como los incendios.

La **Figura 5A** muestra los valores medios mensuales por píxel en la cuenca (2006-2022), aplicando el modelo espaciotemporal en la cuenca, donde se aprecia una variación entre $0.00-0.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\overline{BC}=0.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$), presentando menores concentraciones en invierno (JUN, JUL y AGO), donde se concentra la precipitación nival y menor tráfico vehicular (**Figura 1D**), debido al cierre del paso fronterizo por nevadas copiosas, provocando una menor emisión de BC. Adicionalmente, se observa las mayores concentraciones al final del otoño (MAY, $\overline{BC}=0.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y comenzando la primavera (SEP $\overline{BC}=0.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$; OCT $\overline{BC}=0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En la **Figura 5B**, se calcula el BC promedio por banda de elevación de la cuenca (**Figura 1C**), observándose que las concentraciones van desde menor a mayor magnitud desde las zonas altas a zonas bajas de la cuenca, con una marcada variabilidad interanual. Igualmente, se observa que las zonas altas (>3500 msnm) presenta un rango entre los $0.02-0.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\overline{BC}=0.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$) aproximadamente, no encontrándose afectas a una contaminación marcada por los vehículos, mientras que en las zonas más bajas (<3500 msnm) se observa un cambio en la tendencia positiva del BC, lo cual puede ser explicado por la evolución del tráfico en la cuenca (**Figura 1E**), variando desde los $0.10-0.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\overline{BC}=0.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Por lo tanto, se aprecia una diferencia promedio de $0.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entre ambas zonas.

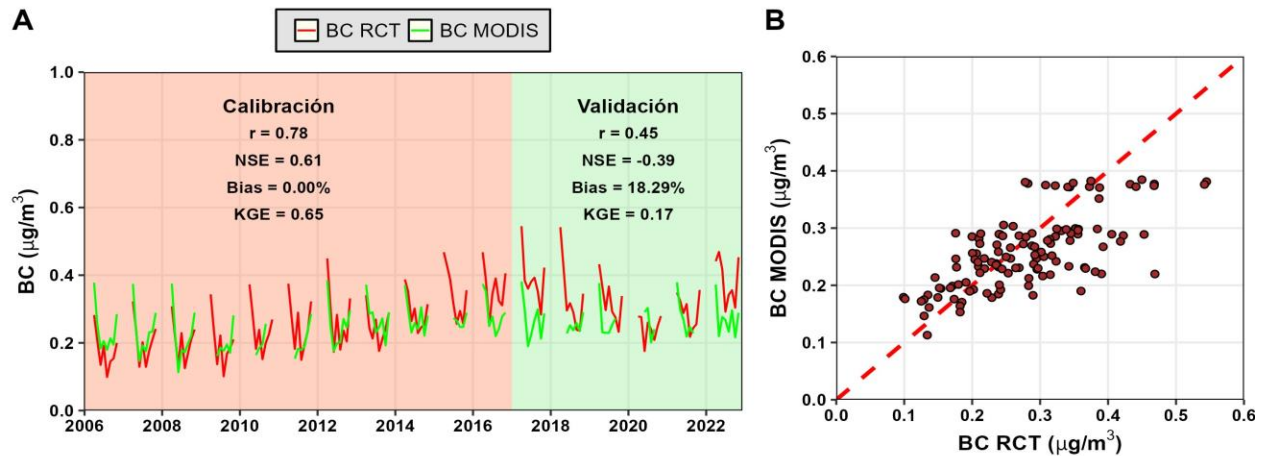


Figura 4. (A) Calibración del BC en píxel del NNTK-1 mediante modelos multilineales en función de predictores MODIS. (B) Gráfico dispersión entre BC-RCT y BC-MODIS en píxel NNTK-1.

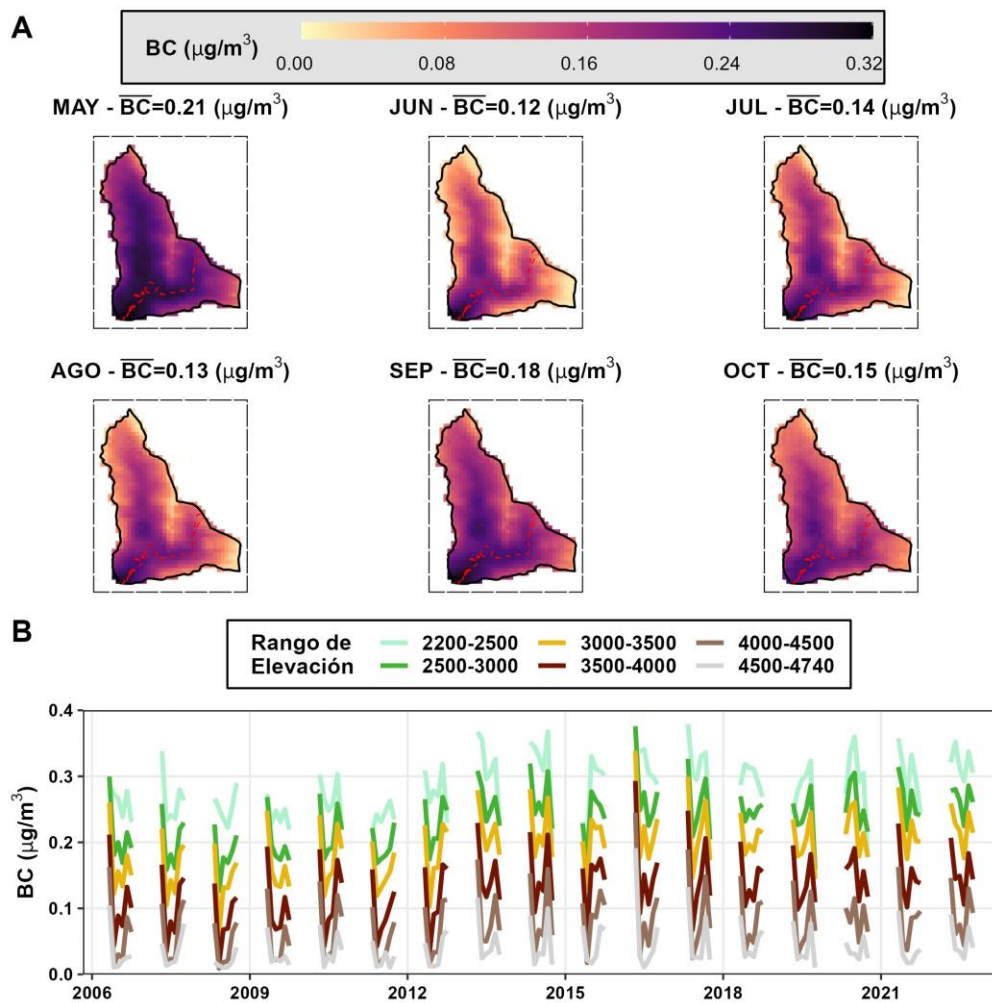


Figura 5. (A) BC promedio mensual por píxel entre los periodos 2006-2022. Los títulos representan el mes y el promedio agregado a nivel de cuenca. La línea roja punteada muestra la carretera (B) Serie de BC por rango de elevación para los meses de MAY-OCT.

Tabla 4: Mejores predictores para regresión lineal múltiple para estimación espaciotemporal en conjunto con Factor de Inflación de la Varianza (FIV) e Importancia Relativa (IR)

Meses	Nº datos	Desempeño modelo		Parámetros del modelo				
		r	p-value	inter	alb	sgs	rh*10 ²	wv
MJO	27	0.84	p<0.05	0.33	-0.23	0.04	0.58	-0.11
JAS	33	0.53	p<0.05	0.43	-0.20	-	0.42	-0.10
Meses	FIV (-)				IR (%)			
	alb	sgs	rh	wv	alb	sgs	rh	wv
MJO	1.02	1.26	1.05	1.32	19.8	13.2	37.6	29.5
JAS	1.04	-	1.02	1.04	25.5	-	45.4	29.1

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente artículo presenta el análisis de reconstrucción temporal de BC atmosférico puntual y la estimación espaciotemporal de BC atmosférico para la cuenca del Estero Juncalillo entre los años 2006-2022. La zona de estudio se encuentra ubicada en los Andes Centrales, donde se pudo reconstruir temporalmente de manera puntual el BC a escala diaria en función vehículos, BC de MERRA-2 y, variables meteorológicas, presentando dicho modelo un desempeño óptimo (Calibración KGE=0.54, Validación KGE=0.47) y siendo los vehículos la variable que principalmente representó al BC. Respecto al modelo que estima espacial y temporalmente el BC, esto se logró en función del albedo, humedad relativa, y velocidad del viento. El modelo presentó un desempeño aceptable (Calibración KGE=0.65, Validación KGE=0.17). Respecto a los resultados espaciotemporales, las concentraciones de BC en la cuenca presentaron una variación entre 0.00-0.32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (\overline{BC} =0.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), donde se observa un patrón que, a mayor altura, menores son las concentraciones de BC, lo que se explica por la ubicación de la carretera primordialmente en este sector. Adicionalmente, las zonas altas (>3500 msnm) presentaron poca variabilidad con un \overline{BC} =0.12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que las zonas bajas (<3500 msnm) se observó una tendencia al aumento del BC, con un \overline{BC} =0.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Como trabajo futuro se pueden colocar mayor cantidad de puntos de medición de BC atmosférico en conjunto con otros instrumentos de medición de variables meteorológicas (en simultáneo), con la finalidad de validar el modelo y distinguir cuales son los parámetros que más influyen en la variabilidad espaciotemporal de la cuenca. Además, estos resultados pueden ser utilizados en un modelo hidrológico acoplado con un modelo radiativo, con la finalidad de incorporar el efecto de la contaminación sobre la nieve y así incluir su impacto en la escorrentía de la cuenca.

AGRADECIMIENTOS

El presente manuscrito se desarrolló en el marco de tres proyectos: 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 No 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*". Por último, agradecer al Centro de Tecnologías Ambientales (CETAM) de la UTFSM por compartir los datos del NNTK-1, que permitieron hacer los análisis en la cuenca de estudio.

REFERENCIAS

- Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Pablo Boisier, J., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., & Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: Catchment attributes and meteorology for large sample studies-Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11). <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>
- Ayala, A., Pellicciotti, F., Peleg, N., & Burlando, P. (2017). Melt and surface sublimation across a glacier in a dry environment: Distributed energy-balance modelling of Juncal Norte Glacier, Chile. *Journal of Glaciology*, 63(241), 803–822. <https://doi.org/10.1017/jog.2017.46>
- 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>
- Bertò, M., Cappelletti, D., Barbaro, E., Varin, C., Gallet, J. C., Markowicz, K., Rozwadowska, A., Mazzola, M., Crocchianti, S., Poto, L., Laj, P., Barbante, C., & Spolaor, A. (2021). Variability in black carbon mass concentration in surface snow at Svalbard. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(16). <https://doi.org/10.5194/acp-21-12479-2021>
- 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>
- Bozdogan, H. (1987). Model selection and Akaike's Information Criterion (AIC): The general theory and its analytical extensions. *Psychometrika*, 52(3). <https://doi.org/10.1007/BF02294361>
- Dadashi, S., Matkan, A., Ziaian, P., & Ashorlo, D. (2008). Evaluation of Pixelbase and Subpixel Methods for Snow Cover Studying in Regional Scale. *Proc. 65th Eastern Snow Conference*.
- DGA. (2009). Estrategia nacional de glaciares fundamentos. In *Informe para Dirección General de Aguas -MOP*.
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(1999)4:2(135))
- 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>
- Jereb, B., Gajšek, B., Šipek, G., Kovše, Š., & Obrecht, M. (2021). Traffic density-related black carbon distribution: Impact of wind in a basin town. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(12). <https://doi.org/10.3390/ijerph18126490>
- Lapuerta, M., González-Correa, S., Ballesteros, R., Cereceda-Balic, F., & Moosmüller, H. (2022). Albedo reduction for snow surfaces contaminated with soot aerosols: Comparison of experimental results and models. *Aerosol Science and Technology*, 56(9), 847–858. <https://doi.org/10.1080/02786826.2022.2091975>

- 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>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3). [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- 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>
- Prabhu, V., Soni, A., Madhwal, S., Gupta, A., Sundriyal, S., Shridhar, V., Sreekanth, V., & Mahapatra, P. S. (2020). Black carbon and biomass burning associated high pollution episodes observed at Doon valley in the foothills of the Himalayas. *Atmospheric Research*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105001>
- 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>
- Sun, Y., Wang, Z., Fu, P., Jiang, Q., Yang, T., Li, J., & Ge, X. (2013). The impact of relative humidity on aerosol composition and evolution processes during wintertime in Beijing, China. *Atmospheric Environment*, 77. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.06.019>