

ESTUDIO DE LAS VARIACIONES EN EL ALBEDO DE NIEVE Y GLACIARES EN LOS ANDES CENTRALES

Bolaño-Ortiz, Tomás R.^{1,2}; Allende, David G.¹; Ruggeri María F.^{1,2}; Pascual Flores, Romina M.^{1,3}; Puliafito, Salvador E.^{1,2} y Lakkis, Susan G.^{4,5}

1: Grupo de Estudios de la Atmósfera y el Ambiente. Facultad Regional Mendoza. Universidad Tecnológica Nacional

Rodriguez 273, Mendoza-Argentina (M5502AJE).

e-mail: tomas.bolano@frm.utn.edu.ar, <http://www.frm.utn.edu.ar/geaa>

2: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

3: Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica

4: Facultad de Ciencias Agrarias, Pontificia Universidad Católica Argentina (UCA), Cap. Gral. Ramón Freire 183, (C1426AVC), Buenos Aires, Argentina.

5: Unidad de Investigación y Desarrollo de las Ingenierías (UIDI), Facultad Regional Buenos Aires (FRBA), Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Argentina

Resumen. *Los Modelos climáticos indican la reducción del albedo provocada por la deposición de Negro de Humo o Black Carbon en nieve, contribuye así al calentamiento global y al derretimiento de la nieve. Una pequeña disminución en el albedo de la nieve puede incrementar significativamente la cantidad de radiación absorbida por la superficie, reduciendo aún más el albedo. Es esta retroalimentación considerada como la amplificación positiva más relevante para el incremento de la temperatura superficial del planeta. La nieve y el hielo en los Andes Centrales de Chile y Argentina es la principal fuente de agua para las regiones pobladas cerca de las ciudades de Mendoza y Santiago de Chile. El objetivo general de este trabajo fue determinar las variaciones en el albedo sobre los Andes Centrales durante la estación de primavera, utilizando datos de sensado remoto. En tal sentido, se seleccionó un área de estudio entre los 33-38°S y 75-65°W en la cual se analizaron datos de MODIS. Durante el período 2000-2014 se evaluaron datos diarios de cobertura de nieve, albedo en superficie nívea, temperatura de superficie y datos mensuales de espesor óptico de aerosoles (AOD) a una longitud de onda de 0.55 μm . Los resultados indican una relación inversa entre el albedo en nieve y el AOD que estaría retroalimentando la tendencia decreciente del albedo para el área estudiada.*

Palabras clave: albedo, nieve, deposición, aerosoles, MODIS

1. INTRODUCCIÓN

En términos de cambio climático se puede expresar que en la actualidad existe una fuerte evidencia de que las variaciones en la temperatura observada, así como varios fenómenos asociados, representados en incremento en la frecuencia y severidad de fenómenos extremos,

derretimiento de glaciares y del hielo de los polos, son atribuibles al efecto de los gases producidos por la actividad antrópica [1-3]. Asimismo existe evidencia de una respuesta inminente a los cambios en el ciclo hidrológico regional debido a que el régimen hídrico de una región, en especial, cuando es esencialmente hidronival, depende de la cantidad de nieve que se deposita durante el invierno y se acumula en las altas cuencas. A ello, se puede sumar el condicionante de temperatura que regula la velocidad de la fusión. En consecuencia, el ciclo estacional de la temperatura se traduce en variaciones en la altura de la isoterma de 0°C, siendo esta línea imaginaria un referente, debido a que por encima de dicho límite la nieve no se derrite, pues no hay temperatura suficientemente elevada para fundirla.

Varios estudios han evaluado una posible influencia del material particulado antrópico tanto en el balance radiativo terrestre [4], como sobre los ciclos hidrológicos en zonas de alta montaña [5]. En especial, el hollín o negro de humo (black carbón: BC) producto de la combustión incompleta de biomasa o combustibles fósiles, podría estar reduciendo el albedo en nieve [6-8] como resultado de la redistribución de la radiación solar incidente por ondas de longitud corta y las emisiones infrarrojas de las partículas de BC.

De acuerdo a predicciones actuales, en los Andes centrales de Argentina se espera un aumento de la temperatura en verano entre 3 y 4 °C, que alcanzaría incluso 5 °C en las zonas más altas de la Cordillera, para el período 2070-2100. En los meses de invierno, las temperaturas aumentarían entre 1,5 y 3 °C [9]. Considerando el escenario A2 del IPCC [10], en la cuenca del Río Mendoza en particular, se espera para el período 2020 - 2030 un incremento medio de temperatura alrededor de 1,25 a 1,5 °C, con variaciones según la altitud con respecto al nivel del mar, por lo cual, es importante estudiar cómo está variando la cobertura de nieve en la región, temperatura superficial y estimar si estas presentan variaciones por la presencia de aerosoles como BC.

En virtud de lo anterior, se hace necesario analizar cómo la presencia de aerosoles puede incidir en las variaciones del ciclo hidrológico de las zonas con nieve en los Andes centrales. Para ello, se realizó un análisis de variabilidad espacial y temporal de albedo en nieve, fracción de cobertura de nieve, temperatura superficial y espesor óptico de aerosoles, obtenido de imágenes MODIS del Satélite Terra para el periodo 2000 – 2014.

2. METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio

El impacto de los cambios en albedo durante los derretimientos de primavera en esta región genera gran preocupación debido a que la cantidad y el momento en que se producen son críticos para la determinación de los recursos hídricos en esta área. Por ende, la zona de estudio seleccionada corresponde a la encerrada por las líneas paralelas entre -30,00° y -38,00° (latitud sur) con -65,00° y -75,00° (longitud oeste) en la región de los Andes Centrales de Argentina y Chile (ver FiguraA). Dicha área es atravesada por el cordón montañoso del mismo nombre donde se localizan un sinnúmero de formaciones relativas a la criósfera, en forma de nevados y glaciares que son fuente importante para la sostenibilidad ambiental de miles de personas en ambas naciones. Asimismo se seleccionaron las cuencas del Río Mendoza, Río Diamante y Río Colorado, ubicadas al norte, centro y sur respectivamente como representativas del área, donde se analizaron

datos de pixeles localizados en una cota ubicada en una zona alta de su respectiva área con nieve permanente (ver Figura 1B).

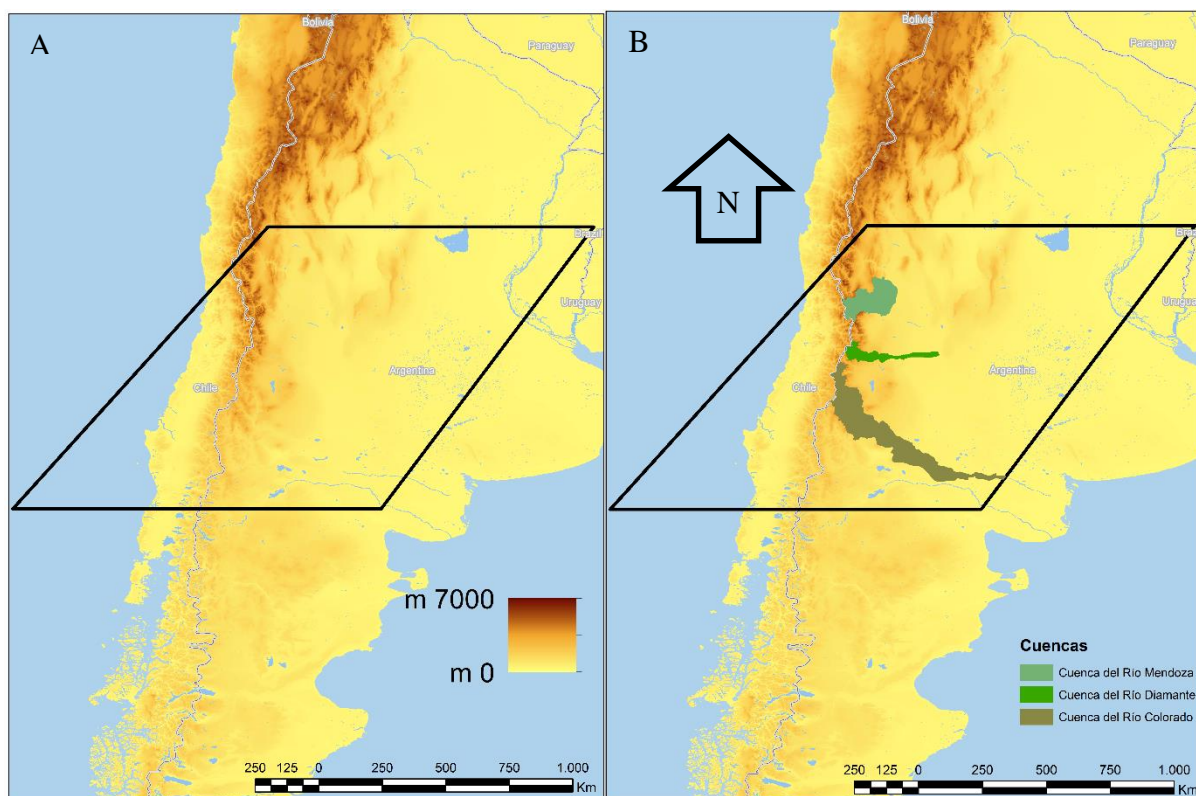


Figura 1. Determinación del área de estudio y las cuencas de análisis prioritario.

2.2. Series de tiempo

Las series de tiempo analizadas corresponden a las primaveras (septiembre a noviembre) de 15 años correspondientes al periodo comprendido desde el año 2000 a 2014, para albedo, cobertura de nieve y temperatura superficial. La finalidad fue analizar la mayor cantidad de tiempo, por ello, se partió de todos los periodos de interés obtenidos desde el año 2000, cuando comenzaron a generar imágenes el satélite multinacional TERRA de la NASA para investigaciones científicas, por medio del instrumento Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Luego se reduce en análisis a una cuenca puntual (Río Mendoza), para ser posteriormente comparados con series mensuales de espesor óptico de aerosoles (AOD) (2002 - 2014) generadas desde el producto de L3 MOD08, procesadas desde el servidor de Giovanni de la NASA para la formación de nieves en esa cuenca ubicada en esa área.

2.3. Datos analizados

La principal fuente de información corresponde a los datos extraídos de imágenes MODIS, en especial de los productos MOD10 L2 para albedo y fracción de cobertura de nieve con resolución espacial de 500m x 500m y resolución temporal diaria. Asimismo, se usó el producto MOD11 L2 para temperatura superficial con resolución de 1 km x 1 km y resolución temporal diaria. Los dos productos consisten en imágenes de 1200 km x 1200 km del área indicada en la Figura. Para AOD se usó el producto de MOD08 L3 (Gridded Atmospheric Product) [11] con 0,1° de resolución espacial, que fueron comparadas con los datos medidos en superficie terrestre por la estación de la red Aerosol Robotic Network (AERONET) más cercana a la cuenca del Río Mendoza, ubicada el Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO) en el sur de la Provincia de San Juan, en el norte del área de estudio.

2.4. Variables

Las variables analizadas en el presente estudio están detalladas en la siguiente tabla (Tabla 1) donde se indica la fuente de información:

| <i>Variable</i> | <i>Fuente</i> | <i>Valores usados</i> | <i>Descripción</i> |
|--------------------------------|---------------|-----------------------|---|
| Albedo en nieve | MOD 10 | 0 a 100% | Porcentaje de albedo en nieve diario en cada pixel con cobertura de nieve, puede contener otros valores como: 111 = noche, 125 = tierra, 137 = aguas continentales, 139 = océano, 150 = nube, etc. |
| Fracción de cobertura de nieve | MOD 10 | 0 a 100% | Porción del pixel cubierto con nieve (diario), puede tener otros valores en función de lo que identifique el instrumento, por ejemplo: 211 = noche, 225 = tierra, 237 = aguas continentales, 239 = océano, 250 = nube, etc. |
| Temperatura Superficial | MOD 11 | -15°C a 15°C | Temperatura superficial terrestre diaria en alta montaña |
| Espesor Óptico de Aerosoles | MOD 08 | 0,1 a 0,9 | Espesor óptico de aerosoles medidos a una longitud de onda de de 0.55 μm |

Tabla 1. Variables analizadas

Los productos MODIS fueron descargados en archivos Hierarchical Data Format (HDF) en secuencias temporales desde el servidor EOS Clearing House (ECHO) – NASA, posteriormente se usó el software MATLAB, en el cual se generó un código para extraer los datos específicos indicados en la anterior tabla y posteriormente el análisis de datos

gráfico, matemático y estadístico en una hoja de cálculo.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Albedo en nieve

Se analizaron los datos mensuales (septiembre, octubre y noviembre), obtenidos con los valores diarios y fueron comparados con el promedio trimestral como se muestra en la Figura . Se tomaron también datos correspondientes a datos diarios y se compararon con los datos anuales correspondientes a años iniciales y finales del tiempo analizado (2000, 2005, 2010 y 2014) como se expresa en la Figura 2. Asimismo, para albedo se analizaron las variaciones de albedo para un pixel ubicado en la parte alta de las cuencas del Río Mendoza, Río Diamante y Río Colorado (ver Figura 3).

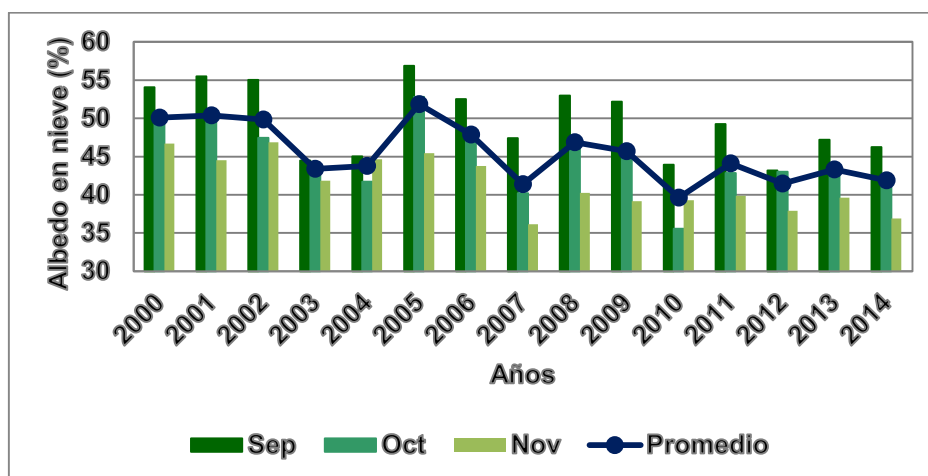


Figura 2. Variación de los promedios mensuales (septiembre, octubre, noviembre) obtenidos con valores diarios para cada año y línea de promedio trimestral para el albedo en nieve en el área de estudio.

En particular se observan cambios decrecientes de albedo desde septiembre a noviembre, a excepción de los años 2004 y 2010 donde el menor valor se presentó en octubre. Esto pareciera ser producto de los cambios normales en las condiciones meteorológicas que transcurren del invierno al verano en cada año. En general, el albedo en la nieve muestra una tendencia decreciente durante todo el periodo 2000-2014, aunque específicamente, desde el 2005 se observa esta tendencia de forma más marcada.

Para ampliar lo indicado, se elaboró la Figura 3 donde se observa que entre los años 2000 y 2005 existe una mayoría de valores encima de la línea promedio, mientras para los años 2010 y 2014 sucede lo contrario. Esto estaría indicando una marcada tendencia decreciente del albedo en el periodo de estudio y la existencia de un agente diferente al cambio de estación que estaría aumentando la pendiente negativa.

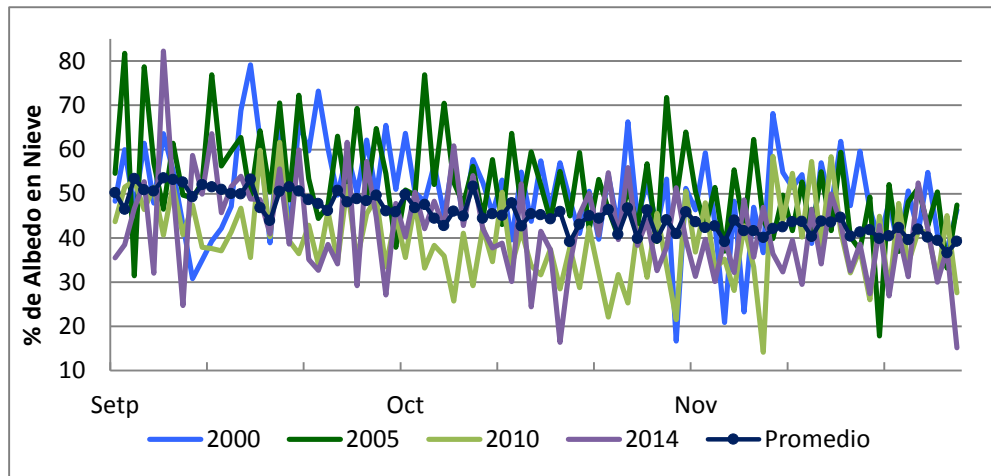


Figura 3. Variación diaria y promedio (2000-2014) para el albedo en nieve en el área de estudio.

Igualmente, es posible observar variaciones diarias de albedo en nieve en cuencas del norte, centro y sur. En la Figura 4 se aprecia las cuencas del Río Colorado y Río Mendoza, presentan un comportamiento similar, mientras que el Río Diamante presenta valores menores, este último evento puede deberse a diferencias de altura de la cordillera de los Andes en ese punto y la circulación de vientos que atraviesan la cordillera.

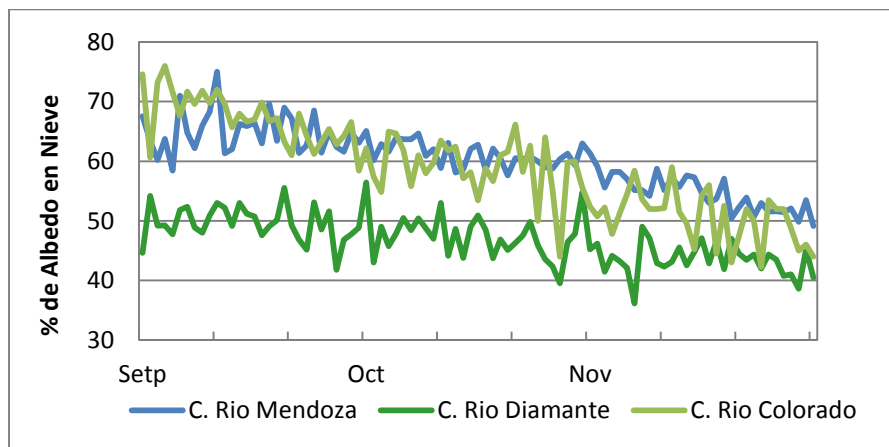


Figura 4. Variación del promedio para los días de primavera (2000 – 2014) para el albedo en nieve de las cuencas priorizadas en el área de estudio.

El albedo parece además tener una relación con el caudal de escorrentía. En Figura 5 se aprecia que en los meses de primavera existe una marcada tendencia a aumentar los caudales, mientras disminuye los valores de albedo.

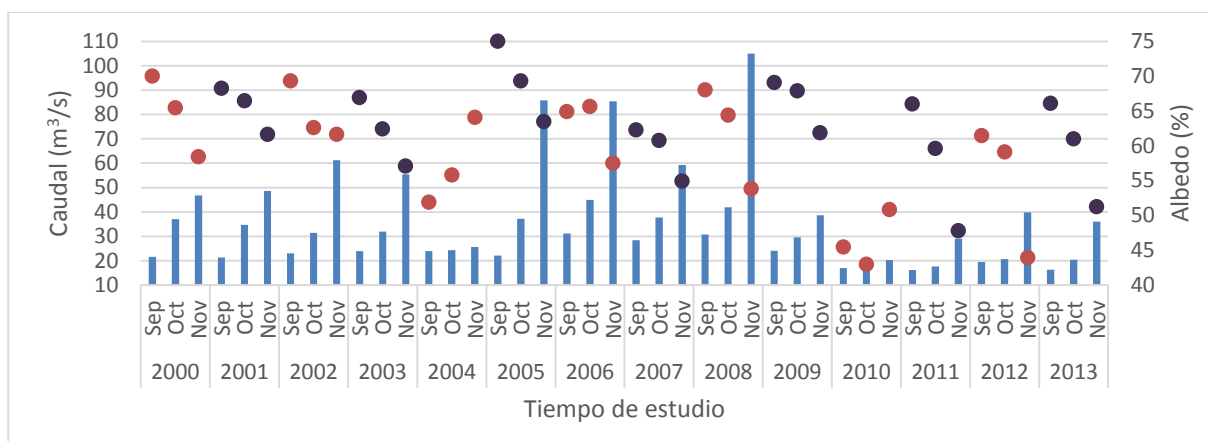


Figura 5. Relación del promedio mensual de albedo para cuenca del Río Mendoza (puntos y eje vertical derecho) y variación del caudales de escorrentía en la cuenca del Río Mendoza cada primavera (barras y eje vertical izquierdo), datos de estación Guido (Mendoza) de la Red Hidrometeorológica Nacional.

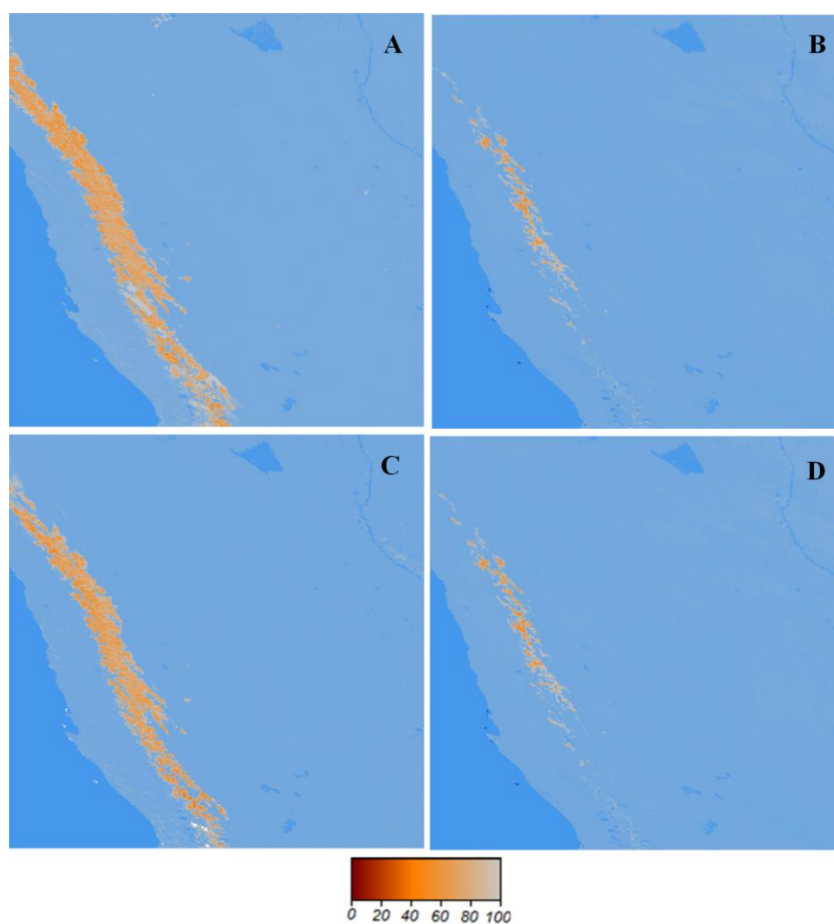


Figura 6. Variación espacial de albedo en nieve (1-100%) para septiembre de 2000 (A), noviembre de 2000 (B), septiembre de 2014 (C) y noviembre de 2014 (D).

Realizando un promedio de las capas diarias de albedo en nieve en el área de estudio se generaron las salidas gráficas de distribución de albedo en el área de estudio, comparativamente al inicio y final de la primavera en el año 2000 y 2014 respectivamente (Figura 6).

La Figura 6 muestra que en el periodo 2000 -2014 se está generando una variabilidad tendiente a la disminución del albedo, si se compara el inicio y fin de la primavera en el año 2000 en relación al año 2014. Se estima que estos cambios en primavera estarían relacionado con una disminución de cobertura de nieve por la aceleración en los procesos de fusión.

3.2. Cobertura de nieve

Con el objeto de analizar la cobertura de nieve, en la Figura 7 se muestran las variaciones anuales de área con diferentes porcentajes de cobertura nívea entre el 2000 y 2014. Además, se incluyen en el gráfico las variaciones de albedo para cada una de las cuencas del Río Mendoza, Río Diamante y Río Colorado.

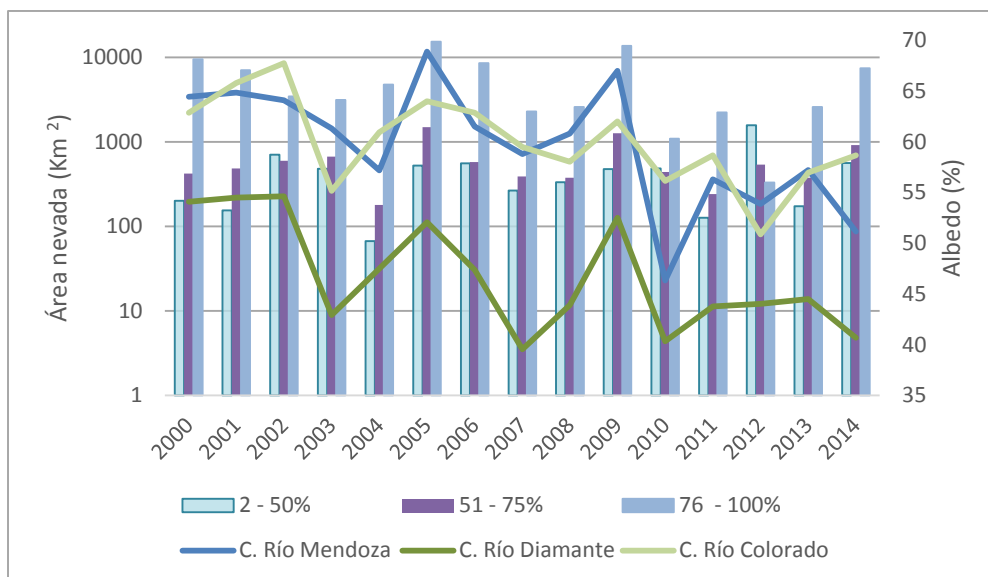


Figura 7. Variación del promedio anual del área de cobertura de nieve. Eje vertical izquierdo muestra el área con los intervalos de fracción de cobertura de nieve indicada en la leyenda y el eje derecho relaciona el albedo promedio obtenido para cada año de estudio.

La anterior figura indica que la fracción de nieve con mayor cobertura (76-100%) varía de manera similar al albedo. También pueden observarse comportamientos casi cíclicos en donde cada dos años se presentan máximos y mínimos similares. Esta variabilidad se reduce después del año 2009 donde el albedo comienza a tener una clara tendencia

decreciente. Esto estaría relacionado asimismo, con la precipitación nieve y aumentos en la isoterma 0°C como lo indican algunos estudios [12].

3.3. Temperatura superficial terrestre

La temperatura superficial terrestre para áreas con nieve se muestra en la Figura 8. Allí se analizó el comportamiento interanual de los periodos de primavera. Se presentan el área para intervalos de diferentes rangos de temperatura para las primaveras del 2000 al 2014. También se incluyen las variaciones de amplitud térmicaⁱⁱⁱ para las cuencas del Río Mendoza, Río Diamante y Río Colorado, para establecer cómo cambia esta variable en el transcurso de los años, con la variabilidad térmica y su relación con las áreas cubiertas con nieve.

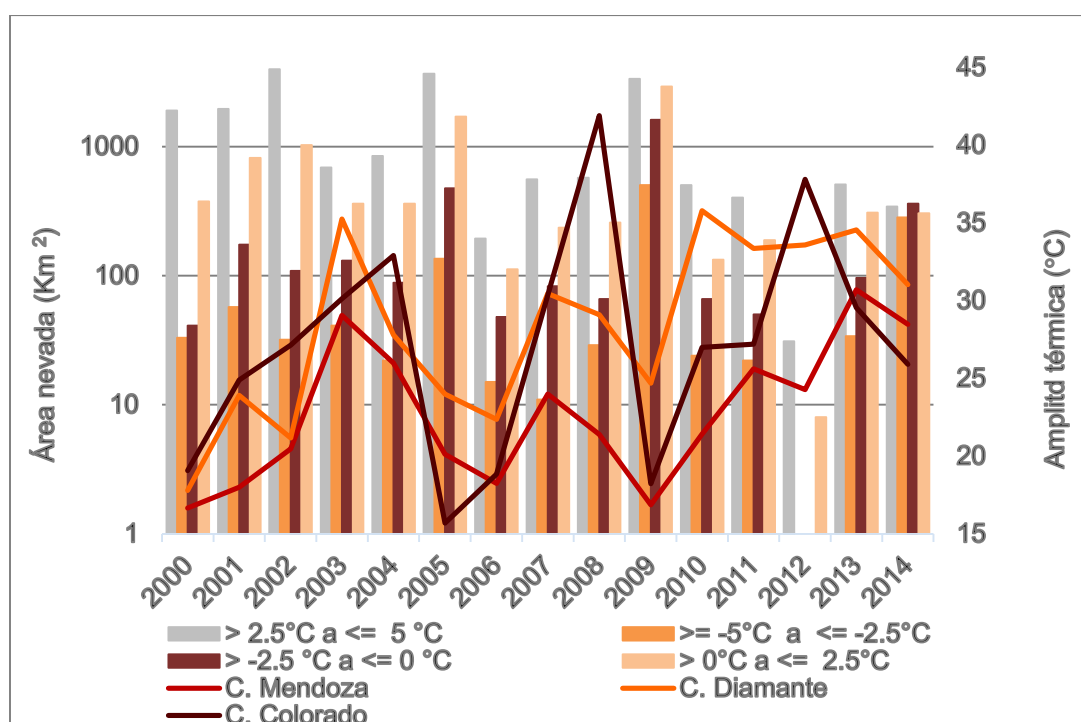


Figura 8. Variación del promedio anual del área cubierta con nieve para diferentes rangos de temperatura expuesto en la leyenda (eje vertical izquierdo) y amplitud térmica para cada cuenca analizada (eje vertical derecho).

En la anterior figura se aprecia que las áreas con temperatura que propician un estado sólido en el agua ($< 0^{\circ}\text{C}$) estarían relacionadas con los años con menor amplitud térmica. Igualmente, la amplitud térmica está teniendo una variabilidad similar en todas las cuencas analizadas, lo que indica que la temperatura estaría presentando una relación similar en toda el área de estudio. Los años con mayor amplitud térmica, se relacionan con

ⁱⁱⁱ La amplitud térmica se calcula como la diferencia entre la máxima y mínima temperatura para un periodo de tiempo indicado.

bajas tasas de precipitación nívea, como se puede observar en el periodo 2010 al 2014 donde se aprecia esta tendencia. Se presenta una relación con lo expuesto respecto a la cobertura de nieve y albedo, en cuanto a las fases de máximos y mínimos cada dos años aproximadamente. En especial, después del año 2008 la variabilidad se reduce y se mantiene una tendencia creciente de la temperatura.

3.4. Espesor óptico de aerosoles

Usando el servidor de Giovanni, el cual cuenta con una aplicación web desarrollada por el GES DISC de la NASA se extrajeron los datos de espesor óptico de aerosoles (AOD) a 550 nm. Se tomó como referencia la cuenca alta del Río Mendoza dentro del área de estudio desde el año 2002 hasta el 2014, generando así la Figura 9 para todas las primaveras.

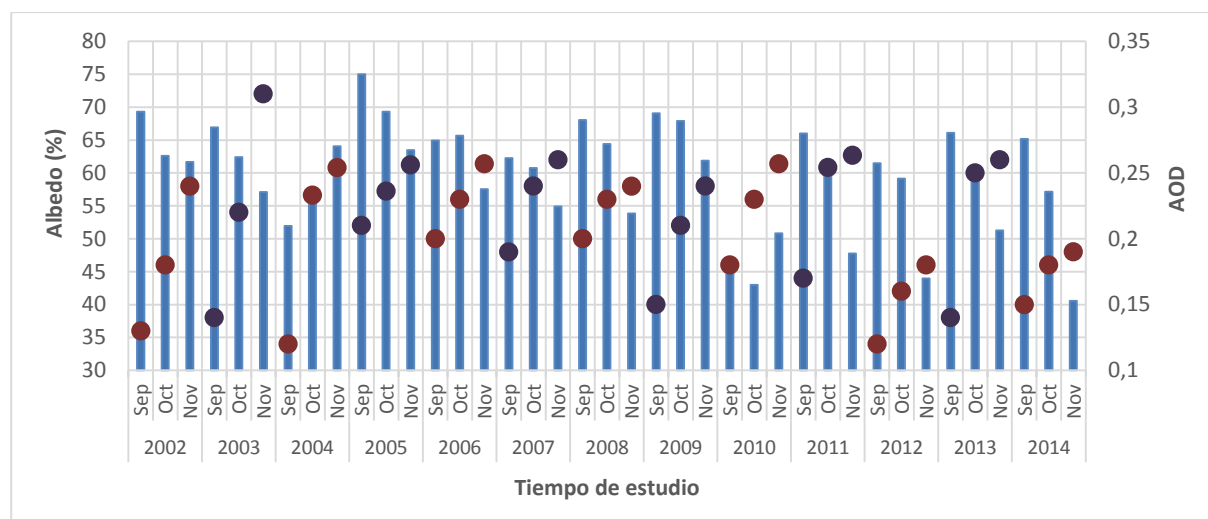


Figura 9. Variación del espesor óptico de aerosoles (AOD) en cada primavera (barras y eje vertical izquierdo) y la relación con el promedio mensual de albedo (puntos y eje vertical derecho).

La anterior figura muestra cómo evolucionan los promedios mensuales para cada primavera en relación a los respectivos valores de AOD. En la misma se observa un comportamiento creciente del AOD durante los meses de primavera en cada año. Esta tendencia coincide con datos los observados (ver Figura 10) en la estación de AERONET CASLEO. Esta tendencia marcada en los meses de primavera, implicaría, entre otros efectos, una aceleración del proceso de fusión de las áreas nevadas, particularmente por deposición de los aerosoles que contengan BC en su composición. Asimismo, estos datos muestran una relación posible con los comportamientos cíclicos de albedo.

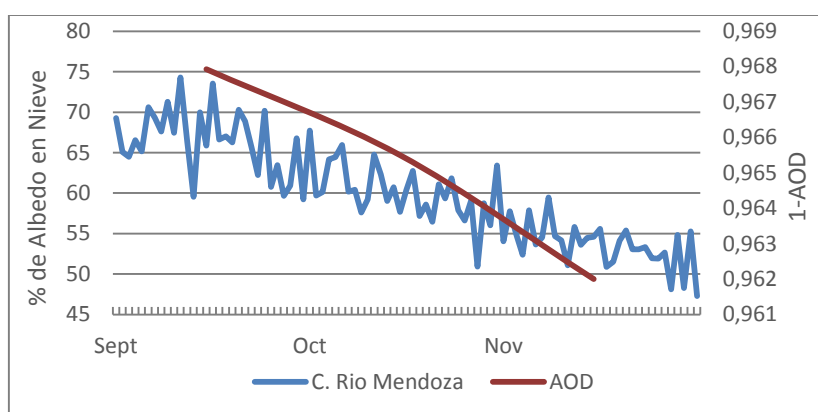


Figura 10. Variación de los promedios diarios de albedo para la zona nevada en la cuenca del Río Mendoza y tendencia de los promedios de diarios de AOD de la estación CASLEO de AERONET. Notar que se representa en este gráfico (1-AOD).

En la Figura 11 se grafica la distribución espacial de AOD para dos momentos significativos de la primavera, tanto para el principio como el fin del período de estudio. Aquí puede observarse también que en los meses de noviembre existen concentraciones más altas de aerosoles (mayor AOD) en relación a las observadas en los meses de septiembre, particularmente en el lado este de la cordillera de los Andes. Esto sumado a lo expuesto en la Figura 10 indicaría que existe un incremento de los valores de AOD para el área de estudio durante la estación primaveral de septiembre, octubre y noviembre respectivamente.

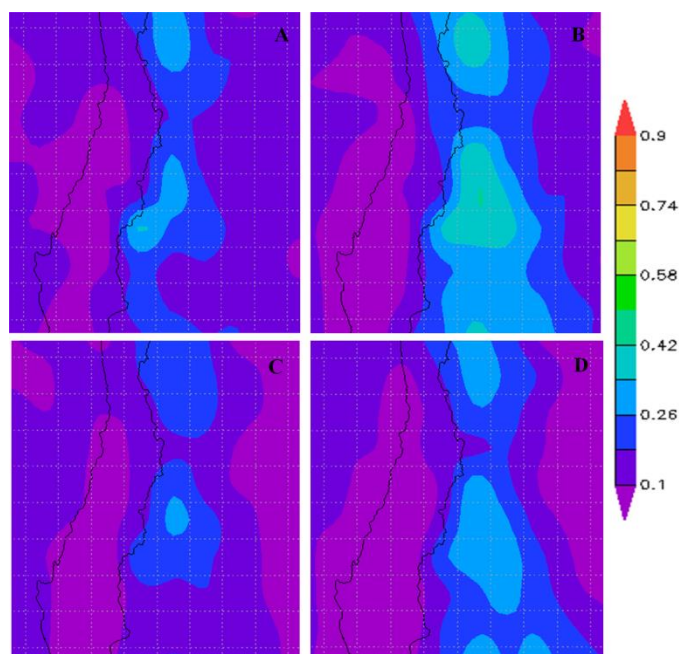


Figura 11. Variación espacial del AOD para septiembre de 2002 (A), noviembre de 2002 (B), septiembre de 2014 (C) y noviembre de 2014 (D). Fuente: Generadas por servidor Giovanni –NASA.

3.5. Análisis estadístico

Para realizar una evaluación estadística se aplicó un análisis de varianza con un factor (ANOVA). Este análisis de la varianza permite contrastar la hipótesis nula de que las medias de grupos analizados son iguales, frente a la hipótesis alternativa de que por lo menos una de las poblaciones difiere de las demás. Por ende, si el valor del estadístico de prueba $F_{Calc} > F_{Crítico}$ se rechaza la hipótesis nula, debido a la existencia de diferencias significativas. En tal sentido, el test ANOVA se usa para evaluar si hubo cambios significativos en las variables analizadas durante los períodos evaluados.

Por ende, se usó el test ANOVA con el objeto de verificar la presencia de diferencias significativas entre los cambios mensuales en el albedo y el AOD. Para el caso del AOD, se presentan los resultados del test en la Tabla 2. Se observa que el F_{Calc} es menor que el $F_{Crítico}$ lo cual claramente indica que no existen diferencia significativas, probablemente por la pequeña cantidad de tiempo analizado (2002 - 2014). No obstante, hay varianzas importantes para los datos de los meses de noviembre, por lo que sería necesario contar con más datos (mayor cobertura espacial, por ejemplo) para poder encontrar estadísticamente diferencias significativas entre los meses de primavera, que se están apreciando en las gráficas.

| Grupos | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza | F_{Calc} | Probabilidad | $F_{Crítico}$ |
|---------------|---------------|-------------|-----------------|-----------------|------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| Septiembre | 13 | 1,95 | 0,15 | 0,002 | 1,91 | 0,16 | 3,25 |
| Octubre | 13 | 2,68 | 0,20 | 0,002 | | | |
| Noviembre | 13 | 5,56 | 0,42 | 0,433 | | | |

Tabla 2. Análisis ANOVA comparando los AOD para los 13 años en los meses de primavera obtenidos de MOD 08.

La Tabla 3 muestra el análisis estadístico para las variaciones de albedo en la cuenca del Río Mendoza, donde se aprecia que para este caso sí existen diferencias significativas entre los meses analizados.

| Grupos | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza | F_{Calc} | Probabilidad | $F_{Crítico}$ |
|---------------|---------------|-------------|-----------------|-----------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| Septiembre | 30 | 1994,5 | 66,48 | 15,95 | 107,48 | $3,0983 \times 10^{-24}$ | 3,10 |
| Octubre | 30 | 1804,4 | 60,14 | 11,62 | | | |
| Noviembre | 30 | 1606,1 | 53,53 | 7,50 | | | |

Tabla 3. Análisis ANOVA comparando los Albedos diarios para el periodo 2000 – 2014 en los meses de primavera

Debido a que son esperables cambios propios en la primavera, a medida que transcurren los meses, se hizo otro análisis ANOVA (ver Tabla 4) para comparar los datos diarios de los años 2000, 2005, 2010 y el promedio de los 15 años (grupos), para verificar que existen diferencias que serían diferentes a las que normalmente se presentan en las primaveras.

| <i>Grupos</i> | <i>Cuenta</i> | <i>Suma</i> | <i>Promedio</i> | <i>Varianza</i> | <i>F_{Calc}</i> | <i>Probabilidad</i> | <i>F_{crítico}</i> |
|---------------|---------------|-------------|-----------------|-----------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 2000 | 88 | 4407,92 | 50,09 | 120,15 | 25,61 | 4,4606x10 ⁻¹⁹ | 2,39 |
| 2005 | 88 | 4561,75 | 51,83 | 124,97 | | | |
| 2010 | 88 | 3484,72 | 39,59 | 85,21 | | | |
| 2014 | 88 | 3687,09 | 41,89 | 119,05 | | | |
| Promedio | 88 | 3998,08 | 45,43 | 17,25 | | | |

Tabla 4 Análisis ANOVA comparando los Albedos diarios para diferentes años y el promedio de primavera del periodo 2000 – 2014

La Tabla 5 muestra las diferencias que se está presentando en los datos de escorrentía en la cuenca del Río Mendoza. Estas diferencias serían variaciones diferentes a las propias de estos meses.

| <i>Grupos</i> | <i>Cuenta</i> | <i>Suma</i> | <i>Promedio</i> | <i>Varianza</i> | <i>F_{Calc}</i> | <i>Probabilidad</i> | <i>F_{crítico}</i> |
|---------------|---------------|-------------|-----------------|-----------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Septiembre | 24 | 544,14 | 22,67 | 22,63 | 19,78 | 5,5611x10 ⁻¹⁰ | 2,70 |
| Octubre | 24 | 691,06 | 28,79 | 62,13 | | | |
| Noviembre | 24 | 1171,50 | 48,81 | 414,62 | | | |
| Promedio | 24 | 802,23 | 33,42 | 105,22 | | | |

Tabla 5. Análisis ANOVA comparando los caudales de escorrentía en la cuenca del Río Mendoza para los meses de primavera y promedio del periodo 1990 – 2013.

Estos resultados señalan que también existen diferencias significativas en los valores de albedo en el periodo 2000 – 2014. Es posible que esto pudiera estar relacionado la tendencia de los valores de AOD en los meses de primavera indicados anteriormente, en especial, posiblemente por los aerosoles provenientes de actividad antrópica local [13],

aunque todavía no es posible establecer una relación conclusiva.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se presentan variaciones decrecientes de albedo en nieve para los meses de primavera. Esta tendencia se ve acentuada con los años, de acuerdo con lo analizado entre los años 2000-2014, posiblemente por las variaciones de temperatura.
- La cobertura de nieve en el área de estudio disminuye en el transcurso de los años analizados.
- El AOD presenta una tendencia creciente en los meses de primavera y posiblemente podría relacionarse con la disminución del albedo, aunque no hay suficiente evidencia estadística del fenómeno.
- Las variaciones de temperatura superficial se relacionan con los cambios de amplitud térmica, como se observa, por ejemplo en el periodo 2010 – 2014, donde se aprecian máximos en amplitud térmica con bajos valores de albedo en las cuencas analizadas.
- Las diferencias estadísticas para albedo y escorrentía indican la existencia de variaciones que divergen de las esperadas. Lo cual indica la existencia de otro factor que está influenciando este suceso.

Este trabajo es una aproximación inicial para el estudio de las variaciones de albedo en los Andes Centras. Si bien los resultados no son determinantes para identificar causas – efectos definitivos, es posible diferenciar tendencias claras que podrían indicar una contribución de los aerosoles a ello.

Finalmente se recomienda continuar analizando mayor población temporal a una mejor escala espacial con la finalidad de poder encontrar relaciones más concluyentes entre las variaciones de albedo y AOD para los Andes Centrales. También, se estima analizar si la emergencia hídrica que comenzó en 2009-2010, tendría una relación con la presencia creciente de AOD identificada gráficamente, en especial, si estaría incidiendo como efecto semi indirecto en la microfísica, por medio de formación y tamaño de los núcleos de hielo (IN: Ice Nuclei) y núcleos de condensación de nubes (CCN) como indican algunos estudios [14].

REFERENCIAS

- [1] Boninsegna, J. Impacto del Cambio Climático en los oasis del oeste argentino. CIENCIA E INVESTIGACIÓN - TOMO 64 N° 1 (2014).
- [2] Sagredo, E., Rupper, S. and Lowell, T. Sensitivities of the equilibrium line altitude to temperature and precipitation changes along the Andes. Quaternary Research. Volume 81, Issue 2, March 2014, P 355–366. (2014).
- [3] Bradley, R. S., F. T. Keimig, and H. F. Diaz. Projected temperature changes along the American cordillera and the planned GCOS network, Geophys. Res. Lett., 31, L16210,

- doi:10.1029/2004GL020229 (2004).
- [4] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp (2007).
- [5] Ramanathan V., Crutzen P., Kiehl J., Rosenfeld, D. Aerosols, climate and the hydrological cycle, *Science*, 294, 2119 (2001).
- [6] Odelle L. Hadley, Thomas W. Kirchstetter. Black-carbon reduction of snow albedo. *Nature climate change*. VOL 2. 437-440 (2012).
- [7] Gardner, A. S., and M. J. Sharp. A review of snow and ice albedo and the development of a new physically based broadband albedo parameterization, *J. Geophys. Res.*, 115, F01009, doi: 10.1029/2009JF001444. (2010).
- [8] Flanner, M. G., C. S. Zender, J. T. Randerson, and P. J. Rasch. Present-day climate forcing and response from black carbon in snow, *J. Geophys. Res.*, 112, D11202, doi:10.1029/2006JD008003. (2007).
- [9] Villalba, R. and J. Boninsegna. “Cambios Climáticos regionales en el contexto de calentamiento global” un Gobierno de Mendoza (ed), Informe Ambiental 2009. (Mendoza: Secretaría de Ambiente, Gobierno de Mendoza). Pp 103 -113. (2009)
- [10] Boninsegna, J. and R. Villalba. La oferta hídrica en los oasis de Mendoza y San Juan. Los escenarios de cambio climático y el impacto en los caudales. Presented at Jornadas de Investigación en Recursos Hídricos. (Mendoza, Argentina: Centro de Estudios y Legislación del Agua, Instituto de Ciencias Ambientales (ICA) de la Universidad Nacional de Cuyo, INTA, IANIGLA. (2007). Available at: <http://www.imd.uncu.edu.ar/contenido/index.php?tid=53>
- [11] Paul A. Hubanks, Michael D. King, Steven A. Platnick, and Robert A. Pincus. MODIS Algorithm Theoretical Basis Document No. ATBD-MOD-30, Collection 005 Version 1.1 for Level-3 Global Gridded Atmosphere Products (08_D3, 08_E3, 08_M3), (2008).
- [12] Boninsegna, José A. Impacto del Cambio Climático en los oasis del oeste argentino. *CIENCIA E INVESTIGACIÓN - TOMO 64 N° 1*. 45-58 (2014).
- [13] Ming, J; Xiao, C.; Cachier, H.; Qin, D.; Qin, X.; Li, Z.; Pu, J. Black Carbon (BC) in the snow of glaciers in west China and its potential effects on albedos. *Atmospheric Research* 92, 114–123. (2009).
- [14] Hansen, J., Sato, M., and Ruedy, R. Radiative Forcing and Climate Response, *J. Geophys. Res.*, Vol. 102, pp. 6831–6864. (1997).