

2.4. Análisis de tendencias (2000-2014) en la cubierta de nieve mediante satélite (sensor MODIS)

Bonet, F.J.; Pérez-Luque, A.J. y Pérez-Pérez, R.

Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Granada

Resumen

El sensor MODIS alojado en el satélite Terra de la NASA suministra información de la cubierta de nieve desde el año 2000 hasta la actualidad. Se ha analizado la serie temporal completa del producto MOD10A2 para Sierra Nevada. Este producto muestra la superficie máxima ocupada por la nieve en periodos de 8 días. Los resultados arrojan tendencias negativas en la duración de la nieve en el 79,05% de los píxeles de Sierra Nevada. También hay una tendencia hacia el retraso en la fecha de inicio de la innivación en el 68,03% de los píxeles. Asimismo el 80,72% muestran tendencia a un adelanto en la fecha de retirada de nieve. Estas tendencias son más evidentes conforme se sube en altura.

> Objetivos y metodología

El objetivo de este trabajo es analizar los cambios que han ocurrido en la cubierta de nieve de Sierra Nevada desde 2000 hasta 2014, usando para ello la información suministrada por el sensor MODIS, alojado en el satélite Terra de la NASA. La cubierta de nieve es un elemento paisajístico de gran importancia en Sierra Nevada. Su estructura y dinámica condiciona en buena medida la disponibilidad de agua tanto para los cauces como para los ecosistemas de la alta montaña. Es también responsable de la estructura de la vegetación en ambientes alpinos.

La metodología seguida se basa en la creación de un flujo de trabajo que procesa automáticamente todas las imágenes del producto MOD10A2 (máxima extensión de la nieve durante 8 días) de MODIS [15], para generar indicadores de la estructura de la cubierta de nieve (SCD: Duración de la presencia de nieve por año hidrológico; SCOD: Fecha de inicio de la presencia de nieve por año hidrológico; SCMD: Último día de presencia de nieve por año hidrológico) [16]. A continuación se aplicaron técnicas de análisis de series temporales para caracterizar

las tendencias de cada uno de los indicadores anteriores en los 7.994 píxeles que cubren Sierra Nevada. El análisis de tendencias permite cuantificar su intensidad (adimensional), su magnitud (expresada en días de adelanto o retraso), el signo (adelanto o retraso) y su grado de significación estadística durante el periodo analizado (14 años). Por último se exploró el patrón espacial de estas tendencias en función de la elevación.

> Resultados

Los resultados obtenidos muestran que la cubierta de nieve ha sufrido cambios significativos en los últimos 14 años. A escala de Sierra Nevada en su conjunto se observa que casi un 80% (Tabla 1) de todos los píxeles muestran una tendencia negativa en la duración de la cubierta de nieve (ver Figura 1 para aclaración sobre el sentido de las tendencias). Sin embargo, esta tendencia es significativa en solo el 5,89% de los píxeles. La fecha de inicio de la innivación

muestra un patrón similar: un 68,03% de los píxeles tiene una tendencia positiva (retraso en la fecha de inicio). Por último, el 80,72% de los píxeles tienen una tendencia negativa (adelanto) en la última fecha con presencia de nieve.

Los valores de tendencias descritos anteriormente se distribuyen en el territorio siguiendo un patrón espacial bien definido. Se observa claramente que tanto la intensidad de la

tendencia (τ) y la magnitud (días de cambio) se hacen más acusadas conforme se sube en altura. Esta situación es especialmente notable en el caso de la duración de la nieve (Figura 2). Esto quiere decir que los cambios en la estructura de la cubierta de nieve son más intensos en las cotas más altas.



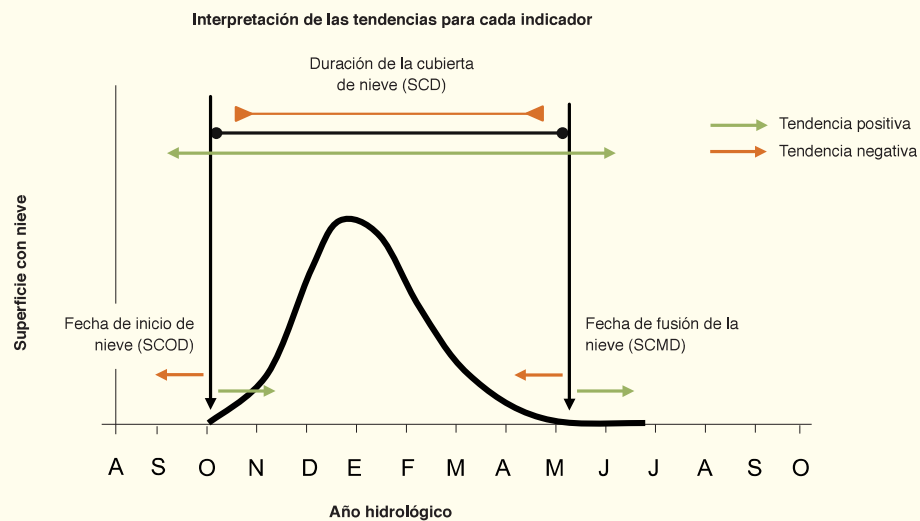
El mencionado patrón espacial se observa claramente en la Figura 3, que muestra un mapa con las tendencias en la duración de la cubierta de nieve.

Por último, se ha analizado el patrón de cambio temporal (a escala de mes) en las tendencias de

duración de la nieve en Sierra Nevada. Aunque los resultados obtenidos no son estadísticamente significativos son relevantes y consecuentes con los descritos anteriormente. Así, las tendencias hacia una reducción en la duración de la nieve son más importantes en los meses de inicio (octubre) y fin (mayo) del periodo de

innivación. Estos resultados indican que cada vez nieve más tarde y que la nieve se funde antes en primavera. Esto podría explicar la reducción en la duración total de la nieve descrita anteriormente.

Figura 1



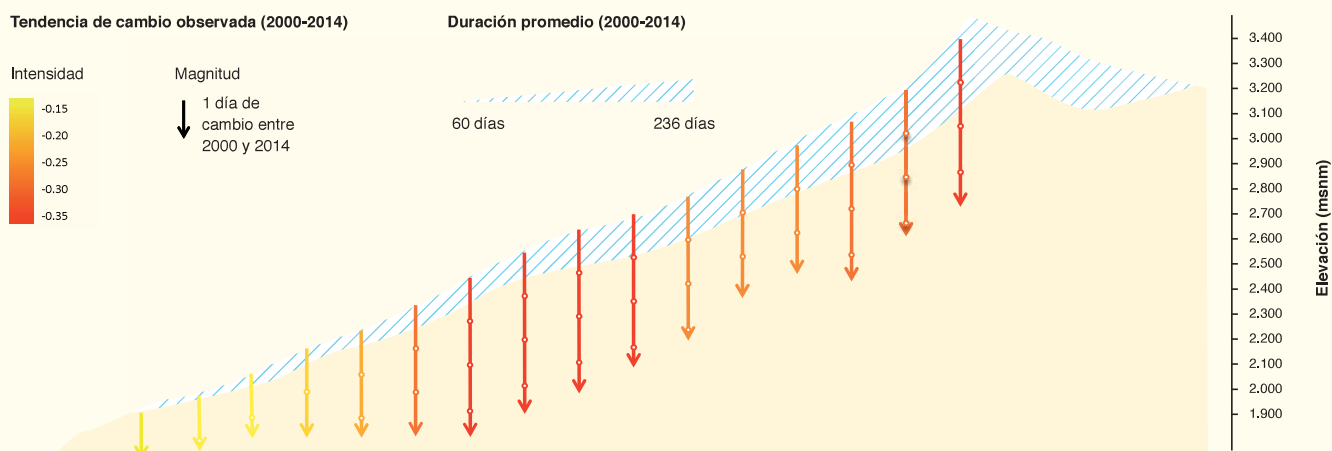
Esquema que representa los cambios en la superficie ocupada por nieve a lo largo de un año hidrológico estándar. Se muestran los indicadores utilizados para describir la estructura de la cubierta de nieve. También se indica el sentido de las tendencias. Una tendencia positiva en la duración implica un aumento en dicha variable. Una tendencia positiva en la fecha de inicio de la nieve implica un retraso en dicha variable. Tendencias positivas en la fecha de fusión de nieve implican un retraso en dicha variable.

Tabla 1

Variable	Tendencia	Píxeles		Píxeles significativos	
		n	%	n	%
Duración de la nieve (SCD)	Positiva	1.455	18,2	6	0,41
	Negativa	6.319	79,05	372	5,89
Fecha de inicio de la innivación (SCOD)	Positiva	5.438	68,03	332	6,11
	Negativa	2.380	29,77	59	2,48
Última fecha con presencia de nieve (SCMD)	Positiva	1.326	16,59	5	0,38
	Negativa	6.453	80,72	717	11,11

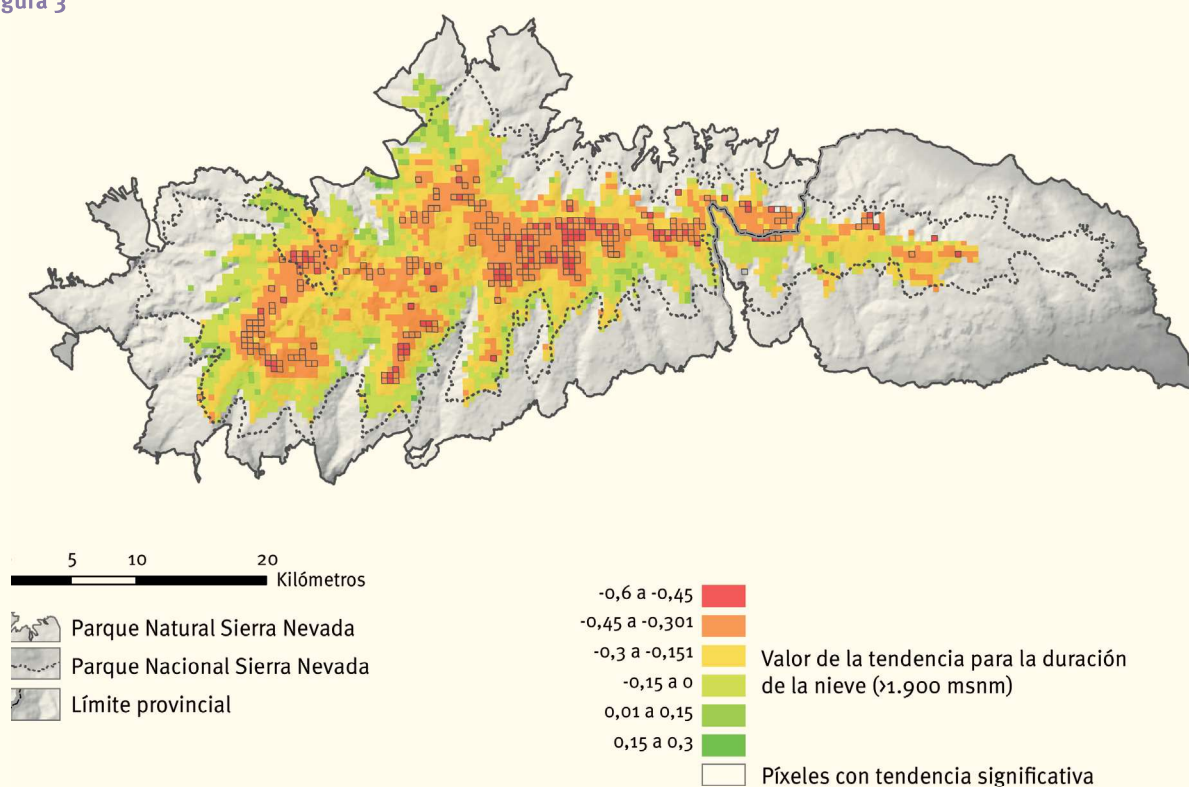
Resultados del análisis de las tendencias (test de Mann-Kendall) anuales en los últimos 14 años para la duración de la cubierta de nieve, fecha de inicio de la innivación y última fecha con presencia de nieve. Para cada variable se muestran el número de píxeles (n) con tendencias negativas ($\tau < 0$) y positivas ($\tau > 0$) así como el número de píxeles significativos (p -valor $< 0,05$).

Figura 2



Representación gráfica de los cambios en la intensidad (τ) y magnitud (pendiente) de la tendencia observada para la duración de la nieve en distintos rangos altitudinales (desde 1900 hasta 3500). El color de las flechas muestra la intensidad de la tendencia en la duración de la nieve (τ). La longitud de las flechas ubicadas en cada altitud muestra la magnitud (expresada en días) de cada tendencia. Ej. En el rango de mayor altitud se observa una magnitud de -3 días. Esto quiere decir que la duración de la cubierta de nieve ha sido 3 días menor en los últimos 14 años.

Figura 3



Mapa de magnitud de la tendencia en la duración de la nieve en Sierra Nevada (Altitud > 1.900 msnm). Los píxeles significativos se representan con el contorno marcado.

➤ Discusión y conclusiones

Aunque la serie temporal considerada no es demasiado larga (14 años), las tendencias observadas permiten obtener una información preliminar de los cambios que pueden estar ocurriendo en la cubierta de nieve de Sierra Nevada. En cualquier caso, la tendencia de reducción en la duración de la cubierta de nieve en Sierra Nevada es consistente con la observada en los Alpes [17]. Sin embargo, en otras montañas (Asia central) no se observan tendencias aparentes en el mismo periodo que el estudiado aquí [18]. Esto puede indicar que las causas que explican las tendencias observadas están relacionadas con factores climáticos locales o regionales, como la NAO (*North Atlantic Oscillation*) [19].

La tendencia observada en la duración de la nieve cambia a lo largo del gradiente altitudinal: las zonas más altas tienen tendencias más intensas y de mayor magnitud hacia la reducción de la duración de la nieve. Esto coincide parcialmente con lo observado para las precipitaciones en Sierra Nevada (ver capítulo 1) y con otros estudios similares realizados en los Alpes [17]. El mencionado gradiente de aumento de la intensidad de la tendencia con la altura, se observa también en la temperatura máxima anual (ver capítulo 1). El acoplamiento entre las tendencias de duración de la nieve, la cantidad de precipitación caída y la temperatura máxima anual, constata la relación causal entre el clima y la cubierta de nieve.

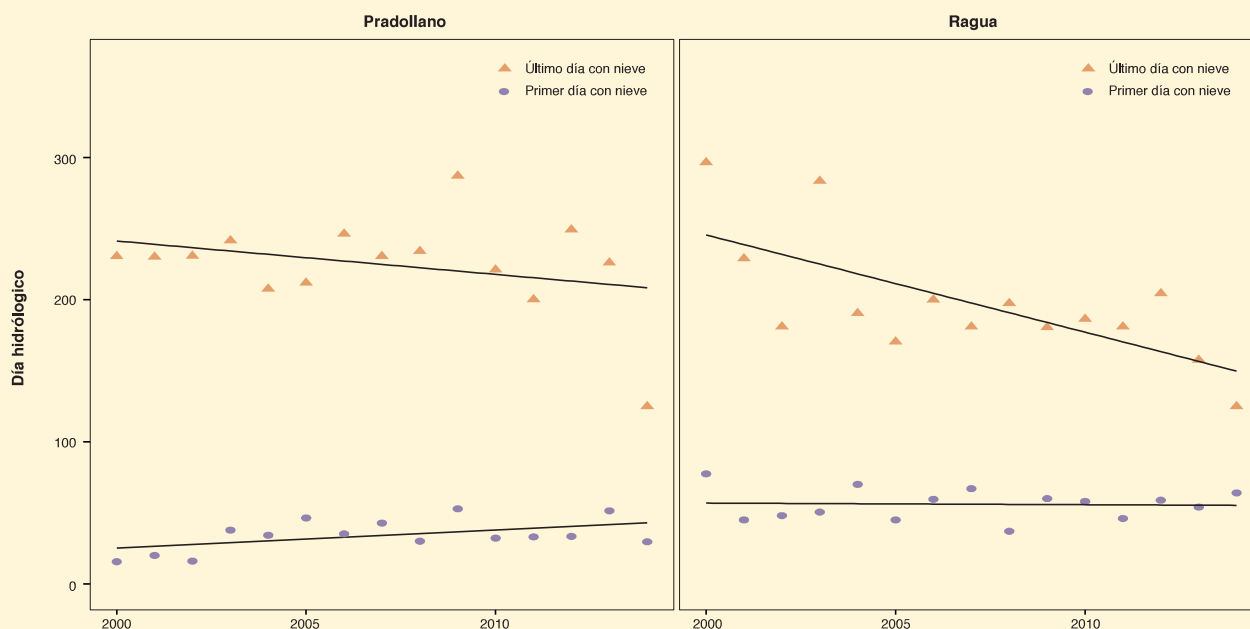
Esta relación es especialmente importante en ambientes mediterráneos, donde buena parte de la precipitación cae en primavera y en invierno, por lo que las probabilidades de que caiga en forma de nieve son mayores.

En definitiva, la serie temporal del sensor MODIS permite conocer con detalle el comportamiento estructural y funcional de la cubierta de nieve a distintas escalas espaciales y temporales. Esto es de gran interés dado el papel de la nieve como elemento suministrador de servicios ecosistémicos de provisión.

Tendencias en la cubierta de nieve y servicios ecosistémicos

La cubierta de nieve constituye un elemento físico muy importante que condiciona la estructura del paisaje y también el funcionamiento de buena parte de los ecosistemas de la montaña. Además constituye un elemento clave para ciertas actividades económicas. Los deportes relacionados con la nieve son un buen ejemplo de este tipo de servicio. Esto pone de manifiesto la importancia de evaluar los posibles im-

pactos del cambio climático sobre el desarrollo de esta actividad. Las dos gráficas que se muestran a continuación describen las tendencias observadas en la duración de la cubierta de nieve tanto en la estación de esquí de Pradollano como en la del Puerto de la Ragüa. Se muestra la evolución temporal del primer día con nieve (círculos) y el último día con nieve (triángulos) en cada año hidrológico de la serie 2000-2014.



Gráficas que muestran las tendencias en la fecha de inicio y fin de la presencia de nieve en las estaciones de esquí de Pradollano (derecha) y del Puerto de la Ragüa (izquierda) respectivamente.