

INDICADORES PARA EL ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DEL ESPESOR DEL MANTO DE NIEVE EN LAS ESTACIONES DE ESQUÍ: EL CASO DE ANDORRA

Anna ALBALAT¹, Laura TRAPERO¹, Marc LEMUS¹, Marc PONS¹

¹ *Andorra Recerca + Innovació*, Av. Rocafort, 21-23, AD600 Sant Julià de Lòria, Andorra.

aalbalat@ari.ad

RESUMEN

En el marco del proyecto CLIM-PY (POCTEFA 2014-2020, Ref.AUEP002-AND / 2015) se elaboró una base de datos transfronteriza entre Francia, España y Andorra de temperatura, precipitación y espesor de nieve con control de calidad y homogeneidad de la información instrumental disponible por parte de los servicios meteorológicos de cada país. En el caso de estudio del manto nivoso, las series de Andorra son de especial interés debido a su localización y calidad. Por un lado, están disponibles las estaciones de Ransol y Engolasters, ubicadas a más de 1500m de altitud con una longitud climática importante (1935-hasta la actualidad). Por otro lado, se encuentran los datos de las estaciones de esquí con altitudes por encima de los 1600m, con disponibilidad de observaciones cuando la estación está operativa. Este trabajo se focaliza en el estudio de las tendencias climáticas de nieve en las estaciones mencionadas con un mínimo de continuidad del manto nivoso, a partir de los datos diarios disponibles. Los resultados preliminares han permitido caracterizar de forma objetiva las temporadas de esquí en excedentarias, normales y deficitarias. Esta clasificación, se ha completado con un análisis de la evolución temporal de los indicadores específicos para el estudio del manto nivoso. En las estaciones más meridionales destaca una disminución del número de días de nieve con manto superior a medio metro.

Los resultados son claves para comprender los efectos del cambio climático en los últimos años y para planificar la adaptación de diferentes sectores socioeconómicos a los cambios detectados en las condiciones invernales.

Palabras clave: indicadores, clima, manto nivoso, adaptación, estaciones de esquí.

ABSTRACT

In the framework of the CLIM-PY project (POCTEFA 2014-2020, Ref. AUEP002-AND / 2015) a cross-border database was developed between France, Spain and Andorra for temperature, precipitation and snow depth with quality control and homogeneity of the instrumental information available from the meteorological services of each country. In the case of the study of the snowpack, the Andorran series are of special interest due to their location and quality. On the one hand, the Ransol and Engolasters stations are available, located at an altitude of more than 1500m, with no data gaps and with an important climatic length (1935-present). On the other hand,

there are data from ski resorts with an altitude above 1600m but with observations only when the resort is operational. This work focuses on the study of the climatic snow trends in ski resorts with a minimum of snowpack continuity, based on the available and consolidated daily data (Engolasters has been discarded in this case). The preliminary results have made it possible to objectively characterise the ski seasons as surplus, normal and deficit. This classification has been completed with an analysis of the temporal evolution of the specific indicators for the study of the snowpack. In the most southerly resorts, there was a decrease in the number of snow days with more than half meter of snow cover.

The results presented are key to understanding the effects of climate change in recent years and the planning of measures to adapt to the changes detected in winter conditions.

Key words: indicators, climate, snow cover, adaptation, ski resorts.

1. INTRODUCCIÓN

Andorra está caracterizada por un clima de alta montaña marcado por un entorno geográfico y topográfico con gran variabilidad local. A su vez, este clima está influenciado por un clima mediterráneo con tendencia subcontinental. La alta variabilidad tiene una marcada influencia en la evolución temporal y distribución espacial del manto nivoso (Esteban Vea, et al., 2012). La localización de Andorra en el sector más meridional del continente europeo (latitud 42'5°norte) favorece que en invierno predomine el efecto de la circulación atmosférica de latitudes medias con vientos predominantes del oeste de la zona templada y en verano altas presiones subtropicales. El fuerte gradiente altitudinal (900-2943m) define sus temperaturas, la diferencia de precipitaciones entre el fondo de valle y la alta montaña, la amplitud térmica y la mayor presencia de viento en altura. Estas condiciones son ideales para tener nieve en el suelo durante los meses de diciembre hasta abril. Por tanto, las precipitaciones durante la estación fría constituyen un importante porcentaje del total de precipitaciones durante el año y una reserva de agua muy valiosa para el resto del año.

Los recientes estudios presentados por el proyecto CLIM-PY y publicados en el último informe del OPCC (Observatorio Pirenaico de Cambio Climático) ponen de manifiesto el incremento de las temperaturas en cualquier época del año (Terrádez et al., 2018). Así como su ascenso más marcado durante estos últimos años, de acuerdo con el último informe del IPCC (Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático) (IPCC, 2021). Además de la creación y armonización de una base de datos de temperatura y precipitación, otro de los objetivos específicos del proyecto CLIM-PY fue el estudio del manto nivoso en el conjunto de los Pirineos. La información climática disponible en el caso de la temperatura y la precipitación es muy extensa, con una longitud y calidad suficiente para analizar estas dos variables, además de cubrir toda el área de estudio. En el caso del manto nivoso, la información disponible es más limitada dadas las condiciones geográficas como la altitud y las condiciones meteorológicas adversas del territorio. Este hecho explica el poco número de trabajos en el estudio de indicadores y tendencias de la evolución del manto nivoso.

Actualmente, la evolución en este campo es notable. Además de las medidas de las estaciones meteorológicas automáticas y manuales, existen otras observaciones del manto. Las imágenes de satélite son un claro ejemplo de estudio de la evolución de la cobertura de nieve (Gascoin et al., 2015). Toda esta información fomenta el incremento de estudios en cuanto a tendencias e indicadores de esta variable.

En el contexto de Andorra, según los últimos resultados actualizados y publicados en el portal web del Observatorio de la Muntanya d'Andorra (www.oma.ad), se estima a partir de las tres estaciones de referencia (Ransol, Engolasters y Central), que la tendencia para el período 1950-2015 es el aumento significativo de la temperatura media anual de 0.18°C / decenio, siendo más marcado en la temperatura máxima en verano (0.22°C / decenio). En invierno también hay un incremento significativo de la temperatura máxima (0.18°C / decenio), en cambio, la temperatura mínima aumenta (0.12°C / década) pero no es estadísticamente significativo. En el caso de la precipitación existe una tendencia decreciente y estadísticamente significativa de la precipitación en verano (-11mm / decenio) y en invierno de -8.7mm / decenio para el período 1950-2015 siendo estadísticamente significativo. Por tanto, los cambios observados en el incremento de la temperatura y la disminución de las precipitaciones en invierno denotan una consecuencia directa en la evolución del manto nivoso.

Los indicadores representan una relación entre variables y proveen de información sobre las condiciones y la evolución de estas en el tiempo. Para que sea útil, el indicador debe representar la realidad que se mide a partir de las observaciones diarias. La finalidad es realizar seguimiento del cambio o variaciones que se den en el tiempo. Se utilizan los indicadores para simplificar la comprensión de la variabilidad climática de una temporada a otra y también para facilitar la comprensión de los procesos del cambio climático (Abegg et al., 2021). Por tanto, la aplicación de indicadores permite comparar los datos de las observaciones en cualquier punto de observación. En este sentido, los indicadores ETCCDMI (Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices), propuestos por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para los extremos de precipitación son un punto de partida y se pueden adaptar para caracterizar la evolución del espesor total de nieve y la nieve nueva. Así, los indicadores de nieve permitirán detectar la señal climática, representar gráficamente su evolución y detectar los cambios de la variable nieve en diferentes puntos de observación.

El estudio del espesor de nieve y nieve nueva de las observaciones de las estaciones de esquí es clave para caracterizar la vulnerabilidad del manto de nieve en las altitudes donde se concentran la mayor parte de estaciones de esquí del Pirineo. Los indicadores describen y monitorizan el espesor de nieve para proveer de información a las estaciones para la toma de decisiones. El manto de nieve juega un papel muy importante como recurso turístico de invierno, motor principal de muchas economías locales de montaña, pero también como recurso hídrico para otras localidades. Por estos motivos, es necesario estudiar los efectos del cambio climático en esta variable y para evaluar los impactos socioeconómicos.

2. MÉTODOS

2.1 Área de estudio y datos utilizados

La cordillera de los Pirineos, ubicados en el norte de la Península Ibérica, tienen una extensión de casi 400km desde el océano Atlántico hasta el mar Mediterráneo. La cordillera ocupa territorio de Cataluña, Aragón, Navarra, País Vasco y toda Andorra.

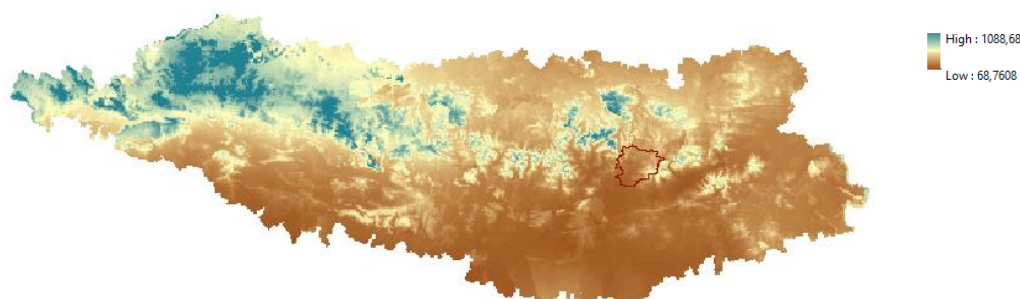


Fig. 1: Mapa de precipitación de invierno en el Pirineo (mm), resultados proyecto CLIMPY para el período 1981-2015. El límite rojo indicia el territorio de Andorra.

Este trabajo se centra en el territorio de Andorra. Los datos utilizados son gestionados por un mismo organismo, lo que da robustez y homogeneidad para trabajarlos. Los datos utilizados son los que se muestran en la siguiente tabla:

ID	Estación	Altitud (m)	Periodo de observación	Fuente	Comentarios
1	Ransol	1640	1935-actualidad	FEDA*	
2	Pas de la Casa	2117	1980-actualidad	Grandvalira	Estación operativa en invierno
3	Pal	1986	1980-actualidad	Vallnord	Estación operativa en invierno
4	Arcalís	2059	1980-actualidad	Grandvalira	Estación operativa en invierno
5	Arinsal	1927	1980-actualidad	Vallnord	Estación operativa en invierno
6	Grau Roig	2123	1980-actualidad	Grandvalira	Estación operativa en invierno
7	Soldeu	2456	1980-actualidad	Grandvalira	Estación operativa en invierno

Tabla 1: Resumen de datos utilizados. *FEDA: Forces Elèctriques d'Andorra.

2.2 Metodología

La estación de Ransol a 1640 m de altitud, es una de las estaciones históricas de referencia en temperatura, precipitación y espesor de nieve para el conjunto del país. Las observaciones comienzan en 1935 gracias a la construcción de la central hidroeléctrica en el fondo de valle de Ransol por parte de la antigua FHASA y actual FEDA. El análisis de esta serie le precede numerosos controles de calidad y rescate de datos en los archivos para identificar valores anómalos de temperatura y precipitación y ahora también en el espesor de nieve que la consolidan como estación

de referencia para otros servicios meteorológicos para la elaboración de indicadores (Servei Meteorològic de Catalunya, 2020).

Por otra parte, las series de las estaciones de esquí son importantes por su distribución espacial cubriendo una amplia zona del país y altitud, pero están limitadas por la operatividad de estas. Uno de los problemas detectados es la observación/detección de las nevadas tempranas o tardías, como también algunos episodios extremos, momento en que las estaciones están cerradas. La recopilación de toda la información disponible ha permitido describir a escala pirenaica la evolución del manto nivoso desde 1983 hasta la actualidad y calcular la tendencia y el impacto del cambio climático sobre esta variable en las últimas décadas (López-Moreno et al., 2020).

En la estación de Ransol, el primer paso para la consolidación de las series con un mínimo de calidad ha sido un control manual a partir de criterios que permitían detectar datos erróneos en la variable espesor de nieve a partir de las variables de temperatura y precipitación diarias. Estos criterios permitían revisar el dato o darlo por dudoso. En el caso de Ransol, se accedió a los archivos para revisar si el dato era válido puesto que en las primeras revisiones de temperatura y precipitación se encontraron errores de escritura, y errores instrumentales entre otros. Los criterios aplicados en la estación de Ransol para determinar los valores dudosos fueron:

- Valores de espesor de nieve en los meses de mayo a octubre.
- El manto nivoso supera el percentil 80 de la misma serie.
- La nieve nueva de un día para otro es superior al percentil 75.
- Coherencia entre la nieve nueva y los valores de precipitación (5mm y 5cm).
- Valores de nieve nueva con temperatura mínima positiva.
- Disminución del manto nivoso con temperatura negativa.

A partir de estos criterios (Albalat et al., 2018) se consolidó la serie de Ransol que, junto con los datos de las seis estaciones de esquí, conforman las series diarias de espesor de nieve en Andorra usadas para el análisis de esta variable en el conjunto de los Pirineos.

El tratamiento de estas series se amplió en el marco del proyecto CLIM-PY donde se incluyó un proceso de reconstrucción de los datos para evitar los huecos de valores de nieve tempranos y tardíos de las series de estaciones de esquí. La metodología utilizada en el proyecto ha permitido reconstruir las lagunas presentes en las series temporales de espesor de nieve a partir de las simulaciones obtenidas de aplicar la cadena SAFRAN (reanálisis meteorológico) - CROCUS (modelo de evolución del manto de nieve) para el período 1980-2016 (Lopez-Moreno et al., 2020). El hecho de combinar las observaciones in-situ y las modelizaciones, ha permitido mejorar la calidad de los datos y también dar continuidad a las series durante toda la temporada. Se han capturado tanto las nevadas tempranas con los espesores más escasos como la época de fusión a finales de invierno cuando las estaciones de esquí ya se encuentran cerradas y no se realizan observaciones.

3. RESULTADOS

3.1 Indicadores de nieve

El análisis del clima actual ha permitido constatar un aumento de hasta 1.2 ° C en los últimos 50 años. Los principales modelos climáticos coinciden con el aumento de las temperaturas a escala global, en todos los escenarios socioeconómicos e incrementando la variabilidad climática característica de las zonas de alta montaña. Los resultados en los distintos escenarios socioeconómicos muestran un aumento de las temperaturas máximas para todas las estaciones y regiones. Este aumento es más significativo en el escenario con más emisiones (RCP 8.5) y para finales de siglo, con un aumento entre 4 y 6 grados respecto la media climática (Amblar-Francés et al., 2020). Para la precipitación, sin embargo, no se esperan variaciones significativas y la incertidumbre entre modelos aumenta según se amplía el horizonte de las proyecciones. Actualmente, los modelos climáticos introducen las condiciones de nieve (Gobiet et al., 2014). Los principales resultados trabajados por el proyecto CLIMPY indican una disminución del espesor de nieve, sobre todo a 1800m de altitud (Terrádez et al., 2018).

Código	Nombre del indicador	Descripción	Unidad	Cálculo
GN20	Umbral 20cm	N.º de días con +20cm	Días	Sumatorio del número de días con espesor de nieve +20cm
GN30	Umbral 30cm	N.º de días con +30cm	Días	Sumatorio del número de días con espesor de nieve +30cm
GN50	Umbral 50cm	N.º de días con +50cm	Días	Sumatorio del número de días con espesor de nieve +50cm
GN100	Umbral 100cm	N.º de días con +100cm	Días	Sumatorio del número de días con espesor de nieve +100cm
DRYSNOW	Racha seca de nieve	N.º de días consecutivos en un año sin nevadas < 0cm	Días	Sumatorio máximo de días consecutivos sin nieve nueva
WETSNOW	Racha húmeda de nieve	N.º de días consecutivos en un año con nevadas > 0cm	Días	Sumatorio máximo de días consecutivos nieve nueva
MXFS	Máximo de espesor de nieve	Máximo mensual de nieve en un día por cada temporada	cm	Valor máximo mensual por temporada

Tabla 2: Listado de indicadores de nieve.

Los indicadores propuestos en este trabajo para la precipitación en forma de nieve siguen una analogía a los indicadores de precipitación del ETCCDMI. El periodo temporal definido para el análisis cubre seis meses, de noviembre a abril, para recoger las nevadas tempranas y el periodo de fusión de la nieve. El análisis de estos indicadores, además del conocimiento puramente climático de la evolución de esta variable, permitirá caracterizar otros aspectos relacionados con el impacto de esta variable sobre algún sector socioeconómico como las estaciones de esquí.

3.2 Análisis de las tendencias de los indicadores de nieve

Los indicadores se han calculado para cada punto de observación. En este caso destacaremos los más relevantes.

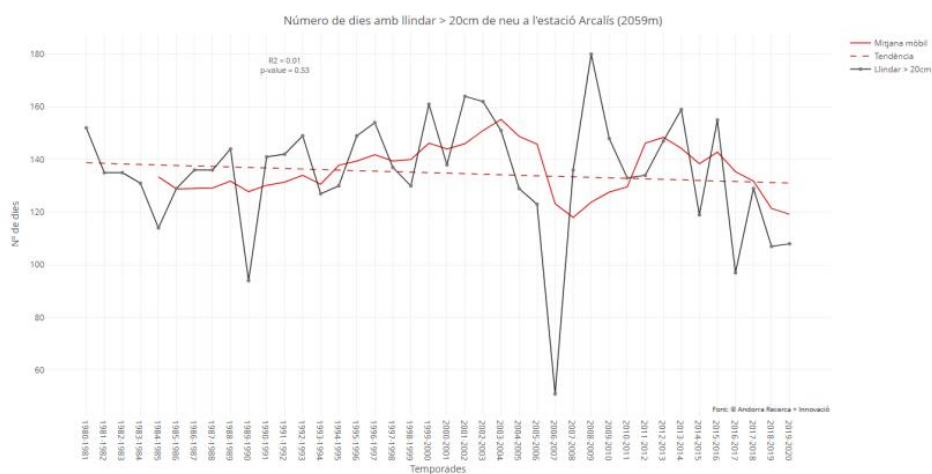


Fig. 2: GN20 umbral de espesor de nieve superior a 20cm en la estación de Arcalís a 2059m en las temporadas entre 1980 y 2020.

Resultados muy similares a todas las estaciones con una tendencia decreciente del número de días con un manto de nieve superior a los 20cm en todas las estaciones, excepto en Grau Roig. Se destaca la alta variabilidad de un año a otro. La temporada 2006-2007 fue una de las temporadas con menos nieve en el Pirineo, donde algunas estaciones registraron el tercer invierno con menos nieve y valores récord en cuanto a la falta de nieve (Font-rubí, 2007).

El indicador GN50 muestra que en las estaciones a menos altitudes y más meridionales como Pal y Arinsal existe una tendencia decreciente marcada; en cambio, en estaciones más septentrionales y de mayor altitud, la tendencia es creciente como en el caso de Grau Roig y Arcalís.

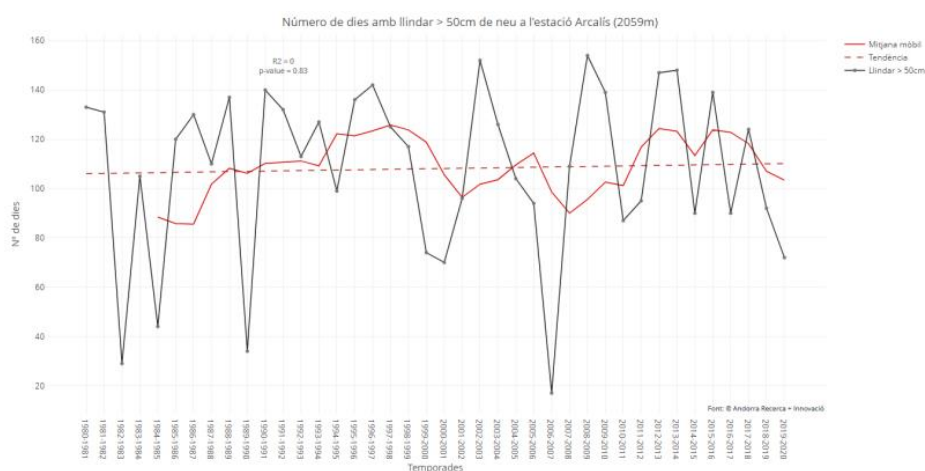


Fig. 3: GN50 umbral de espesor de nieve superior a 50cm en la estación de Arcalís a 2029m en las temporadas entre 1980 y 2020.

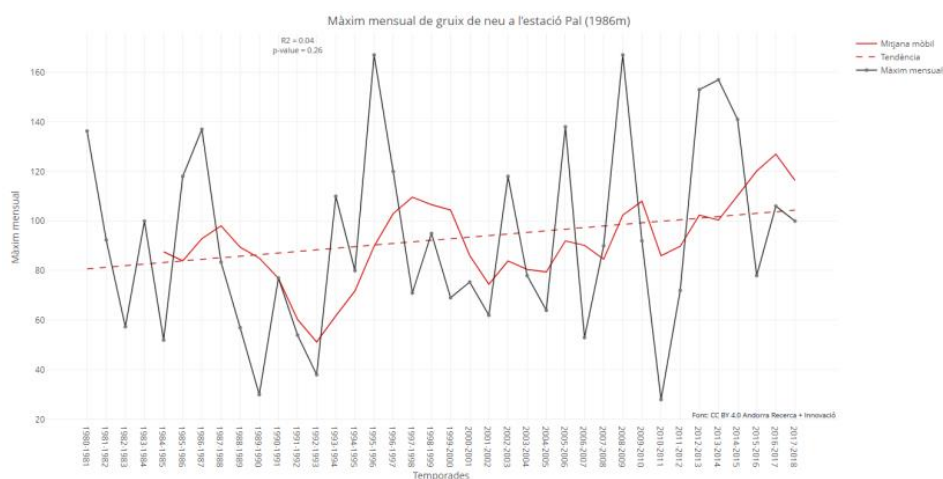


Fig. 4: MXFS es el valor máximo de espesor de nieve mensual para cada temporada en la estación de Pal a 1986m en las temporadas entre 1980 y 2020.

Este indicador muestra el valor máximo de espesor de nieve registrado por la estación a partir de las dos observaciones diarias de los observadores. En este caso, la estación de Pal muestra una tendencia positiva. Los valores máximos coinciden con temporadas excedentarias.

3.3 Caracterización de las temporadas de invierno

En este caso se han clasificado las temporadas según la evolución del manto nivoso en deficitarias, normales y excedentarias. Los datos diarios consolidados y sin huecos han dado una evolución continua del manto, además de tener los inicios y finales de temporada.

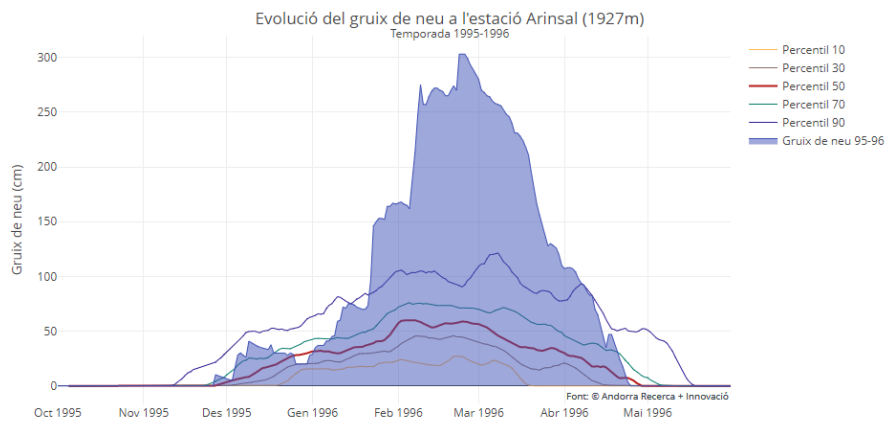


Fig. 5: Evolución del manto nivoso en la estación de Arinsal a 1927m en la temporada 95-96.

El área azul del gráfico representa la evolución del espesor de nieve máximo diario medido en 24h. Las líneas de distintos colores representan los percentiles 10, 30, 50, 70 y 90% para cada estación calculados con todos los años disponibles, desde 1980 hasta 2015.

A modo de ejemplo, la línea del percentil 70 corresponde al espesor de nieve que para cada observación queda por debajo del 70% y, por tanto, se supera el 30%, de esta manera podemos establecer un cuadro de calificación.

En el caso de la figura 5 la estación de Arinsal registró valores de espesor de nieve muy superiores al percentil 90.

Calificación del manto	
Muy deficitario	< Percentil 10
Deficitario	Entre percentiles 10 y 30
Normal	Entre percentiles 30 y 70
Excedentario	Entre percentiles 70 y 90
Muy excedentario	> Percentil 90

Tabla 3: Calificación del manto nivoso en función de los percentiles.

4. DISCUSIÓN

En este trabajo se han sintetizado brevemente los resultados del proyecto CLIM-PY vinculados a las observaciones de nieve en el territorio de Andorra. Por un lado, el trabajo de reconstrucción de las series de las estaciones de esquí a partir de la simulación de Safran y Crocus, junto con las propias observaciones han permitido crear una base de datos robusta para el estudio de los indicadores y tendencias del espesor de nieve.

En el caso de Andorra, la disponibilidad de datos resulta satisfactoria, tanto por su longitud temporal como su distribución espacial y es de vital importancia mantener la continuidad de estas series. La sustitución de los métodos de observación manuales por automáticos podría ser beneficioso para mantener la serie sin vacío de datos y no

restringir las observaciones al periodo de funcionamiento de las estaciones de esquí, aunque podría comprometer la homogeneidad de estas.

La evolución temporal de los indicadores de umbrales de nieve indica una tendencia decreciente del número de días con espesores mínimos de 20 cm en las estaciones de menor altitud (rango 1600-1900 m). Este efecto estaría relacionado con el incremento de las temperaturas y su impacto tanto en la oscilación de la cota de nieve, como en la fusión. La evolución climática junto los escenarios de cambio climático responden a leyes físicas y continuas con una tendencia muy marcada. El estudio del espesor de nieve es poco previsible ya que tiene una alta variabilidad anual. Los indicadores serán utilizados para el estudio de la variable y para la detección de la señal climática.

El conocimiento de la variable nieve como recurso natural es un punto clave para conocer parte de las reservas de agua del territorio. Las proyecciones de cambio climático ponen en un compromiso la disponibilidad de este recurso (Hans-O. Pörtner et al. 2022). El estudio de la evolución del manto de nieve y su cuantificación según los percentiles ayuda a caracterizar la disponibilidad de recursos que almacena la montaña y abordar estrategias de adaptación adecuadas.

AGRADECIMIENTOS

Andorra Recerca + Innovació agradece las ayudas complementarias del 2015 del Govern d'Andorra POCTEFA 2014-2020, Ref. AUEP002-AND / 2015. También agradecer a las estaciones de esquí por proporcionar esta información y al Servei Meteorològic Nacional.

REFERENCIAS

- Abegg, B., Morin, S., Demiroglu, O. C., François, H., Rothleitner, M., & Strasser, U. (2021). Overloaded! Critical revision and a new conceptual approach for snow indicators in ski tourism. *International Journal of Biometeorology*, 65(5), 691–701. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01867-3>
- Albalat, A. et al., 2018: Climatic trends in snow observations in Andorra. In: International Snow Science Workshop Proceedings, Innsbruck, Austria, pp. 586–588. [Available at: <http://arc.lib.montana.edu/snow-science/item/2604>].
- Amblar-Francés, M. P., Ramos-Calzado, P., Sanchis-Lladó, J., Hernanz-Lázaro, A., Peral-García, M. C., Navascués, B., Dominguez-Alonso, M., Pastor-Saavedra, M. A., & Rodríguez-Camino, E. (2020). High resolution climate change projections for the Pyrenees region. *Advances in Science and Research*, 17, 191–208. <https://doi.org/10.5194/asr-17-191-2020>
- Esteban Vea, P., Prohom Duran, M., & Aguilar, E. (2012). Recent trends and climate change indices of precipitation and temperature in Andorra (1935-2000). *Pirineos*, 167, 87–106. <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2012.167005>
- Font-rubí, D. I. (2007). *Generalitat de Catalunya Departament de Medi Ambient i Habitatge BUTLLETÍ CLIMÀTIC ESTACIONAL. HIVERN DE 2006 - 2007 L'hivern ha estat pluviomètricament sec o molt sec a gran part del territori i la temperatura ha estat per sota dels valors normals a l. 93*, 1–5.
- Gascoin, S., Hagolle, O., Huc, M., Jarlan, L., Dejoux, J. F., Szczypta, C., Marti, R., &

- Sánchez, R. (2015). A snow cover climatology for the Pyrenees from MODIS snow products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(5), 2337–2351. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2337-2015>
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., & Stoffel, M. (2014). 21st century climate change in the European Alps-A review. *Science of the Total Environment*, 493, 1138–1151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050>
- Hans-O. Pörtner (Germany), Debra C. Roberts (South Africa), Helen Adams (United Kingdom), Carolina Adler (Switzerland/Chile/Australia), Paulina Aldunce (Chile), Elham Ali (Egypt), Rawshan Ara Begum (Malaysia/Australia/Bangladesh), Richard Betts (United Kingdom), Z. Z. I. (Malaysia). (2022). Climate Change 2022 - Impacts, Adaptation and Vulnerability - Summary for Policymakers. In *Ipcc*.
- IPCC. (2021). IPCC 2021 Technical report. *Ipcc*, August, 150. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_TS.pdf
- López-Moreno, J. I., Soubeyroux, J. M., Gascoin, S., Alonso-Gonzalez, E., Durán-Gómez, N., Lafaysse, M., Vernay, M., Carmagnola, C., & Morin, S. (2020). Long-term trends (1958–2017) in snow cover duration and depth in the Pyrenees. *International Journal of Climatology*, 40(14), 6122–6136. <https://doi.org/10.1002/joc.6571>
- Servei Meteorològic de Catalunya, S. (2020). *BAIC 2020*. 1–94.
- Terrádez, J., & Arauzo, I. (2018). *El canvi climàtic als Pirineus: impactes, vulnerabilitat i adaptació Bases de coneixement per a la futura Estratègia d'Adaptació al Canvi Climàtic als Pirineus*. <https://opcc-ctp.org/>