



Marc Pons i Pons^{1,2}

Doctor en Ciència i Tecnologia per a la Sostenibilitat per la Universitat Politècnica de Catalunya, investigador a Computational Ecology Group i Universitat de Saskatchewan, Canadà

1. La neu com a component vital del cicle hidrològic

La neu representa un component essencial del cicle hidrològic en les zones muntanyoses, exercint un paper fonamental com a estoc natural d'aigua que es va alliberant gradualment a mesura que es fon. Les regions muntanyoses d'arreu del món, sovint anomenades *torres d'aigua*, proporcionen recursos hídrics vitals a més de la meitat de la humanitat (Immerzeel et al., 2020). La neu, juntament amb les glaceres, són característiques distintives d'aquestes regions, i cobreixen respectivament el 40 i el 2% de la superfície muntanyosa global (Wrzesien et al., 2019; Pfeffer et al., 2014).

La importància hidrològica de la neu resideix principalment en dos aspectes. En primer lloc, actua com un emmagatzematge temporal d'aigua, retenint les precipitacions hivernals i alliberant-les durant la primavera i l'estiu, quan les temperatures augmenten. Aquest procés proporciona un efecte d'amortiment contra la variabilitat meteorològica, subministrant aigua durant els períodes més càlids i secs de l'any, quan la demanda d'aigua és més elevada. En segon lloc, la neu contribueix significativament a la recàrrega d'aigües subterrànies, amb estimacions que indiquen que entre el 40 i el 80% de la recàrrega d'aigües subterrànies en les regions muntanyoses prové del desglaç de la neu (Jasechko et al., 2014; Lucianetti et al., 2020).

2. La importància de la neu a Andorra i els Pirineus

Als Pirineus, i especialment a Andorra, la neu constitueix un recurs hídric primordial. Estudis recents com el del projecte POCTEFA PIRAGUA-PIREAU demostren que el règim hidrològic d'Andorra és típic d'una zona de muntanya d'influència mediterrània amb règim nival, que presenta cabals alts a la primavera i baixos a l'estiu, amb una lleugera aportació procedent de les precipitacions a la tardor (Travesset et al., 2021).

Segons les dades de l'*Estudi per a l'elaboració anyal del recurs hídric d'Andorra* (Govern d'Andorra, 2021), el recurs hídric mitjà anual disponible a escala nacional es quantifica en 262 hm³/anuals. La variabilitat d'aquest recurs en l'any més sec es tradueix en una disminució del 45,7%, mentre que l'any més humit s'incrementa el recurs en un 77,2%. Aquesta variabilitat natural es veurà agreujada pels efectes del canvi



Marc Pons i Pons

El paper de les glaceres i la neu en el cicle de l'aigua de les zones de muntanya

1- Coldwater Laboratory, Centre for Hydrology, University of Saskatchewan, Canmore, Alberta, Canada.

2- Computational Ecology Group, Canmore, Alberta, Canada

Bibliografia

- CARROLL, R. W., DEEMS, J. S., NISWONGER, R., SCHUMER, R., & WILLIAMS, K. H. (2019). The importance of interflow to groundwater recharge in a snowmelt-dominated headwater basin. *Geophysical Research Letters*, 46, 5899-5908.
- COCHAND, M., CHRISTE, P., ORNSTEIN, P., & HUNKELER, D. (2019). Groundwater storage in high Alpine catchments and its contribution to streamflow. *Water Resources Research*, 55, 2613-2630.
- DOCHARTAIGH, B. E., MACDONALD, A. M., BLACK, A. R., EVEREST, J., WILSON, P., DARLING, W. G., & RAINES, M. (2019). Groundwater-glacier meltwater interaction in proglacial aquifers. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23, 4527-4539.
- EARMAN, S., CAMPBELL, A. R., PHILLIPS, F. M., & NEWMAN, B. D. (2006). Isotopic exchange between snow and atmospheric water vapor: estimation of the snowmelt component of groundwater recharge in the southwestern United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111, D09302.
- EVANS, S. G., GE, S., & LIANG, S. (2015). Analysis of groundwater flow in mountainous, headwater catchments with permafrost. *Water Resources Research*, 51, 9564-9576.
- FARINOTTI, D., HUSS, M., FÜRST, J. J., LANDMANN, J., MACHGUTH, H., MAUSSON, F., & PANDIT, A. (2019). A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth. *Nature Geoscience*, 12, 168-173.
- GASCOIN, S., GRIZONNET, M., BOUCHET, M., SALGUES, G., & HAGOLLE, O. (2019). Theia Snow collection: high-resolution operational snow cover maps from Sentinel-2 and Landsat-8 data. *Earth System Science Data*, 11, 493-514.
- GOVERN D'ANDORRA. (2018). *Pla sectorial d'infraestructures energètiques d'Andorra*. Ministeri de Medi Ambient i Sostenibilitat.
- GOVERN D'ANDORRA. (2019). *Estudi per a l'elaboració anyal del recurs hídic d'Andorra*. Any 2019. Ministeri de Medi Ambient i Sostenibilitat.
- GOVERN D'ANDORRA. (2020). *Estudi per a l'elaboració anyal del balanç hídic del Principat d'Andorra*. Any 2019. Ministeri de Medi Ambient i Sostenibilitat.

climàtic i especialment pels canvis futurs en la quantitat i estacionalitat de la coberta de neu del país (Pons et al., 2015). L'anàlisi realitzat a Andorra mostra que la recàrrega d'aigües subterrànies procedent de la neu és especialment significativa. El balanç hídic positiu de 678,46 mm, amb una precipitació mitjana de 988,35 mm i una evapotranspiració de 309,88 mm, demostra la important contribució nival al sistema hidrològic. Això és especialment rellevant a les conques de més altitud i més septentrionals del país (figura 1).

El Principat d'Andorra, amb una superfície de 468 km² i una altitud mitjana elevada (1.996 metres), és particularment sensible als canvis en el règim de precipitacions nivoses. Segons les modelitzacions del projecte PIRAGUA, s'espera que en l'escenari de canvi climàtic per a l'any 2050 es produeixi un canvi significatiu en l'hidrogràma, amb una disminució del cabal anual concentrada especialment entre finals de primavera i estiu. Es preveu una reducció del volum d'aigua en forma de neu (*snow water equivalent*) de fins a un 52,86%, que pot afectar especialment les conques del fons de vall i les meridionals (Travesset et al., 2021).

Les projeccions climàtiques mostren que l'increment de temperatura en el futur produirà un augment de la proporció aigua/neu, un avançament del desglaç i, en definitiva, un augment de l'escorrentia superficial als mesos d'hivern. Durant aquests mesos augmentarà el cabal en detriment del cabal a finals de primavera i estiu, que serà significativament menor. Això tindrà importants implicacions tant per a la disponibilitat d'aigua per als diversos usos humans com per al manteniment dels cabals ambientals necessaris per a la conservació de les funcions ecosistèmiques dels rius.

Actualment, els usos consumptius d'aigua a Andorra són d'aproximadament 21,63 hm³ a l'any, distribuïts entre el sector domèstic (72,29%), turístic (11,48%), agrícola (9,31%), de producció de neu (6,67%) i ramader (0,22%). Els usos no consumptius, principalment destinats a la producció hidroelèctrica, suposen uns 75 hm³ a l'any. La modelització feta demostra que, tot i que en termes generals Andorra disposarà de suficient recurs hídic per satisfer les demandes d'aigua previstes dels principals sectors destinats a ús humà fins a l'any 2050, en ocasions i localitzacions puntuals, les elevades demandes en diferents sectors poden entrar en competència i provocar un conflicte de prioritats entre usos, especialment per mantenir les funcions ecosistèmiques dels rius.



Figura 1. Volum d'aigua en forma de neu (snow water equivalent) a Andorra el 26 de març del 2023. Font: Andorra Recerca + Innovació

3. Connectivitat entre la neu i les aigües subterrànies

Estudis recents han posat en relleu la importància de la connectivitat entre la criosfera (incloent la neu) i les aigües subterrànies, identificant-la com un enllaç poc conegut del cicle hidrològic de muntanya (Van Tiel et al., 2024). La recàrrega d'aigües subterrànies procedent de la neu i les glaceres és sovint preferencial, és a dir, una major proporció de l'aigua provinent del desglaç de la neu tendeix a infiltrar-se al subsòl en comparació amb la pluja. Aquest fenomen s'explica per la curta durada i el gran volum del desglaç de la neu, juntament amb les baixes taxes d'evaporació durant el període de desglaç, que afavoreixen la percolació cap a capes més profundes i una recàrrega d'aigües subterrànies consistent (Carroll et al., 2019).

En un context de canvi climàtic, en què s'espera que la coberta de neu disminueixi tant en durada com en profunditat, la nostra comprensió d'aquesta connectivitat esdevé crucial. La reducció de la neu podria alterar significativament els patrons de recàrrega d'aigües subterrànies, la qual cosa afectaria no només el volum d'aigua disponible sinó també la temporalitat del seu alliberament als rius i rierols.

4. Escales espacials i temporals de la connectivitat criosfera - aigües subterrànies

Un aspecte particularment rellevant és l'anàlisi de les diferents escales espacials i temporals en què opera la connectivitat

GOVERN D'ANDORRA. (2021). *Estudi per a l'elaboració anual de l'inventari i quantificació de la despesa hídrica per usos del Principat d'Andorra. Any 2019*. Ministeri de Medi Ambient i Sostenibilitat.

HAMMOND, J. C., HARPOLD, A. A., WEISS, S., & KAMPF, S. K. (2019). Partitioning snowmelt and rainfall in the critical zone: effects of climate type and soil properties. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23, 3553-3570.

HOOD, J. L., & HAYASHI, M. (2015). Characterization of snowmelt flux and groundwater storage in an alpine headwater basin. *Journal of Hydrology*, 521, 482-497.

HUGONNET, R., McNABB, R., BERTHIER, E., MENOUNOS, B., NUTH, C., GIROD, L., & KÄÄB, A. (2021). Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592, 726-731.

IMMERZEEL, W. W., LUTZ, A. F., ANDRADE, M., BAHL, A., BIEMANS, H., BOLCH, T., & BAILLIE, J. E. M. (2020). Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*, 577, 364-369.

JASECHKO, S., BIRKS, S. J., GLEESON, T., WADA, Y., FAWCETT, P. J., SHARP, Z. D., & WELKER, J. M. (2014). The pronounced seasonality of global groundwater recharge. *Water Resources Research*, 50, 8845-8867.

LILJEDAHN, A., GÄDEKE, A., O'NEEL, S., GATESMAN, T., & DOUGLAS, T. (2017). Glacierized headwater streams as aquifer recharge corridors, subarctic Alaska. *Geophysical Research Letters*, 44, 6876-6885.

LUCIANETTI, G., PENNA, D., MASTRORILLO, L., & MAZZA, R. (2020). The role of snowmelt on the spatio-temporal variability of spring recharge in a dolomitic mountain group, Italian Alps. *Water*, 12, 2256.

MACKAY, J. D., BARRAND, N. E., HANNAH, D. M., KRAUSE, S., JACKSON, C. R., EVEREST, J., & BLACK, A. (2020). Proglacial groundwater storage dynamics under climate change and

glacier retreat. *Hydrological Processes*, 34, 5456-5473.

MARKOVICH, K. H., MANNING, A. H., CONDON, L. E., & MCINTOSH, J. C. (2019). Mountain-block recharge: a review of current understanding. *Water Resources Research*, 55, 8278-8304.

MILNER, A. M., KHAMIS, K., BATTIN, T. J., BRITTAIN, J. E., BARRAND, N. E., FUREDER, L., & BROWN, L. E. (2017). Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114, 9770-9778.

MÜLLER, T., LANE, S., & SCHAEFLI, B. (2022). Towards a hydrogeomorphological understanding of proglacial catchments: an assessment of groundwater storage and release in an Alpine catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26, 6029-6054.

PEFFER, W. T., ARENDT, A. A., BLISS, A., BOLCH, T., COGLEY, J. G., GARDNER, A. S., & RANDOLPH CONSORTIUM. (2014). The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers. *Journal of Glaciology*, 60, 537-552.

PONS, M., LÓPEZ-MORENO, J. I., ROSAS-CASALS, M., & JOVER, E. (2015). The vulnerability of Pyrenean ski resorts to climate-induced changes in the snowpack. *Climatic Change*, 131(4), 591-605.

<https://doi.org/10.1007/s10584-015-1400-8>

ROGGER, M., CHIRICO, G. B., HAUSMANN, H., KRAINER, K., BRÜCKL, E., STADLER, P., & BLÖSCHL, G. (2017). Impact of mountain permafrost on flow path and runoff response in a high alpine catchment. *Water Resources Research*, 53, 1288-1308.

SCHILLING, O. S., GERBER, C., PARTINGTON, D. J., PURTSCHERT, R., BRENNWALD, M. S., KIPFER, R., & BRUNNER, P. (2021). Quantifying groundwater recharge dynamics and unsaturated zone processes in snow-dominated catchments via on-site dissolved gas analysis. *Water Resources Research*, 57, e2020WR028479.

SOMERS, L. D., GORDON, R. P., MCKENZIE, J. M., LAUTZ, L. K., WIGMORE, O., GLOSE, A. M., & CONDOM, T. (2016). Quantifying groundwater-surface water interactions in a proglacial valley, Cordillera Blanca, Peru.

entre la criosfera i les aigües subterrànies. Comprendre aquestes escales és fonamental per avaluar correctament la importància i la vulnerabilitat dels recursos hídrics de muntanya (Van Tiel *et al.*, 2024).

A escala petita, com és el cas d'Andorra (conques <10 km²), els dipòsits superficials no consolidats com morrenes, tarteres i al·luvions són els principals responsables de l'emmagatzematge i alliberament de l'aigua de fusió. Els temps de residència en aquestes vies de flux superficial generalment són de l'ordre de dies a mesos.

A mesura que augmenta la mida de la conca (10-100 km²), canvien les propietats, tipus i vies de flux dels aquífers dominants. Els dipòsits al·luvials i el llit rocós fracturat guanyen importància en comparació amb les tarteres i les morrenes. Els aquífers al·luvials en zones muntanyoses poden tenir temps de residència de mesos a uns pocs anys, mentre que el llit rocós pot presentar un ampli rang de temps de residència, des de diversos mesos fins a molts anys.

A escales més grans (conques de 100-10.000 km²), la recàrrega del bloc muntanyós i la recàrrega del front muntanyós poden proporcionar recursos hídrics importants a zones situades lluny aigües avall (per exemple, a 10-100 km). Aquestes escales més àmplies sovint suposen un repte per a la comprensió i la modelització hidrològica, ja que els models a gran escala generalment no poden resoldre característiques petites, com morrenes i tarteres, que poden ser crucials per retardar l'aigua de fusió.

5. Conclusions i implicacions per a la gestió dels recursos hídrics

La neu i les glaceres representen molt més que simples elements paisatgístics o turístics a les zones muntanyoses; constitueixen components essencials del cicle hidrològic, que afecten directament la disponibilitat d'aigua, tant superficial com subterrània. Ignorar la connectivitat entre la criosfera i les aigües subterrànies pot tenir implicacions crucials per a la nostra comprensió actual del cicle hidrològic de muntanya i, en particular, per a l'avaluació de canvis futurs deguts al canvi climàtic.

Des de la perspectiva de la criosfera i el cabal fluvial, les contribucions d'aigua de fusió podrien ser subestimades si només s'observen les dinàmiques de cabal de resposta ràpida. La connectivitat entre l'aigua de fusió i les aigües subterrànies

retarda el subministrament d'aigua de fusió, estenent potencialment el paper de l'aigua de fusió en les regions aigües avall en l'espai i el temps. Especialment durant sequeres, és fonamental entendre on i quan s'emmagatzema i s'allibera l'aigua per a una gestió eficaç dels recursos hídrics (Van Tiel et al., 2024).

En un context de canvi climàtic i de creixent demanda d'aigua, la comprensió dels processos que connecten la criosfera amb les aigües subterrànies i la temporalitat de la descàrrega de l'aigua superficial esdevé fonamental per a una gestió sostenible dels recursos hídrics. A mesura que les glaceres retrocedeixen i la coberta de neu disminueix tant en quantitat com en temporalitat, el paper relatiu de les aigües subterrànies de muntanya s'espera que augmenti. No obstant això, la recàrrega reduïda d'aigua de fusió pot conduir a una disminució general de la recàrrega total, un canvi en la temporalitat dels processos de recàrrega i interaccions alterades entre les aigües subterrànies i les superficials.

D'altra banda, el retrocés de les glaceres, els estocs hivernals de neu i el desglaç del permafrost poden canviar la capacitat d'emmagatzematge del subsòl i, per tant, la connectivitat entre les aigües superficials i les subterrànies. Una comprensió integral d'aquests canvis en el futur subministrament d'aigua és crítica per gestionar eficaçment els recursos hídrics per als sistemes socioecològics cada vegada més dependents de les aigües subterrànies en les zones de muntanya així com en regions aigües avall.

Això és especialment cert en regions com Andorra i els Pirineus, on la neu ha modelat no només el paisatge sinó també l'economia i la forma de vida dels seus habitants, i on la gestió adaptativa dels recursos hídrics serà clau per afrontar els reptes del canvi climàtic en les properes dècades.

Hydrological Processes, 30, 2915-2929.

SOMERS, L. D., MCKENZIE, J. M., MARK, B. G., LAGOS, P., NG, G. H. C., WICKERT, A. D., & SILVA, Y. (2019). Groundwater buffers decreasing glacier melt in an Andean watershed—but not forever. *Geophysical Research Letters*, 46, 13016-13026.

THORNTON, J. M., MARIETHOZ, G., & BRUNNER, P. (2018). A 3D geological model of a structurally complex Alpine region as a basis for interdisciplinary research. *Scientific Data*, 5, 180238.

TRAVESSET-BARO, O., DOMÈNECH, M., PESADO, C., & PONS, M. (2021). «Evolución de los usos de los recursos hídricos y posibles tensiones bajo escenarios de cambio climático en Andorra». Proyecto PIRAGUA (EFA210/16), Fondo Europeo de Desarrollo Regional, Andorra Recerca + Innovació.

VAN TIEL, M., AUBRY-WAKE, C., SOMERS, L., ANDERMANN, C., AVANZI, F., BARAER, M., & YAPIYEV, V. (2024). Cryosphere-groundwater connectivity is a missing link in the mountain water cycle. *Nature Water*.

<https://doi.org/10.1038/s44221-024-00277-8>

VAN TIEL, M., VAN LOON, A. F., SEIBERT, J., & STAHL, K. (2021). Hydrological response to warm and dry weather: do glaciers compensate? *Hydrology and Earth System Sciences*, 25, 3245-3265.

VMIROU, D., KUMMU, M., MEYBECK, M., KALLIO, M., & WADA, Y. (2020). Increasing dependence of lowland populations on mountain water resources. *Nature Sustainability*, 3, 917-928.

WALVOORD, M. A., & KURYLYK, B. L. (2016). Hydrologic impacts of thawing permafrost—a review. *Vadose Zone Journal*, 15, vzj2016.01.0010.

WRZESIEN, M. L., PAVELSKY, T. M., DURAND, M. T., DOZIER, J., & LUNDQUIST, J. D. (2019). Characterizing biases in mountain snow accumulation from global data sets. *Water Resources Research*, 55, 9873-9891.