



Rendiconti
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL
*Memorie e Rendiconti di Chimica, Fisica,
Matematica e Scienze Naturali*
141° (2023), Vol. IV, fasc. 1, pp. 119-122
ISSN 0392-4130 • ISBN 978-88-98075-55-3

Il cambiamento climatico e le sue sentinelle

ELISA PALAZZI

Dipartimento di Fisica dell'Università di Torino
E.mail: elisa.palazzi@unito.it

Abstract – High-altitude mountain regions are among the most sensitive areas to global warming. In fact, they are experiencing more rapid and intense warming than the surrounding lower-lying areas, similarly to the warming amplification found in the Arctic. This phenomenon has attracted the interest of many scientists around the world who coined the term “Elevation-Dependent Warming” (EDW) to describe the positive correlation between warming rates and elevation.

The enhanced warming rate with elevation which is observed in many mountain regions of the world – they are for this often referred to as hot spot regions – has a direct negative impact on the high-altitude cryosphere, including changes in glacier dynamics and snow resources. Mountains are also a biodiversity hot spots, but the species richness is endangered by the amplified warming occurring at higher elevations.

It is worth remembering that what happens in the mountains does not stay in the mountains: amplified warming in mountain regions affects downstream societies and people who benefit from the goods and services provided by high altitude regions, first of all but not limited to, water.

Keywords: Climate change, Climate hot spot, Mountains, Water

Riassunto – Le regioni montane di alta quota sono tra le aree più sensibili al riscaldamento globale. Esse stanno sperimentando un riscaldamento più rapido e intenso di quello registrato in media su tutta la Terra. Per questo, le montagne vengono spesso definite regioni “hot-spot”, ovvero “punti caldi” del clima. L’amplificazione del riscaldamento con la quota ha attirato l’interesse di molti scienziati in tutto il mondo che hanno utilizzato il termine «Elevation-Dependent Warming» (EDW) per descrivere la dipendenza del riscaldamento dalla quota, che spesso si manifesta come correlazione positiva tra tassi di riscaldamento e altitudine. Questa amplificazione montana ha impatti negativi diretti sulla criosfera d’alta quota (sui ghiacciai, la neve e il permafrost), sulla biodiversità, sul funzionamento stesso degli ecosistemi di alta quota. Ma vale la pena ricordare che ciò che accade in montagna non resta confinato in montagna, ma si ripercuote sulle società a valle che dalle montagne traggono benefici essenziali, primo fra tutti, ma non unico, l’acqua.

Parole chiave: Cambiamento climatico, Hot-spot climatico, Montagne, Acqua

Montagne sentinelle

Per meglio comprendere l'entità del riscaldamento globale e dei suoi effetti, è molto utile guardare che cosa sta capitando in regioni che, per la loro maggior sensibilità ai cambiamenti in corso, sono veri e propri indicatori dello stato di salute dell'intero pianeta. Tra queste regioni "sentinella" spiccano le montagne. In montagna esiste un equilibrio molto delicato tra le diverse specie viventi, animali e vegetali, e con l'ambiente in cui esse vivono. Un equilibrio che si è venuto a creare nel tempo, da quando le montagne sono state per queste specie un rifugio, un luogo sicuro, benché impervio, dove stare nel corso delle ere del passato e dei relativi stravolgimenti climatici. Piante e animali si sono specializzati a vivere in questi ambienti creando veri e propri endemismi. L'attuale aumento di temperatura e i cambiamenti nell'atmosfera, nella criosfera, nel ciclo dell'acqua che ne sono derivati, estremamente rapidi, stanno mettendo a dura prova la capacità di queste specie di reagire "positivamente" alle perturbazioni, di essere resilienti o resistenti, di sapersi adattare. Assistiamo oggi alla migrazione delle specie verso l'alto come forma di adattamento ma quando questo non è possibile un'altra opzione è l'estinzione.

A questa caratteristica intrinseca e strutturale delle montagne si aggiunge il fatto che, negli ultimi decenni, nelle regioni di alta quota la temperatura è aumentata di più (di circa il doppio) di quanto sia avvenuto a livello medio globale, o di quanto generalmente accada nelle quote inferiori circostanti. Anche per questo le montagne vengono definite "hot-spot", ovvero punti caldi del clima. Negli ultimi decenni la temperatura nelle regioni di alta quota è aumentata, in media, con una rapidità di $0.3^{\circ}\text{C}/\text{decennio}$ [IPCC, 2019], da confrontare con il trend di $0.2^{\circ}\text{C}/\text{decennio}$ registrato in media su tutto il globo.

Cause dell'amplificazione del riscaldamento con la quota

Le ragioni dell'amplificazione montana del riscaldamento sono molteplici e, come spesso accade nel sistema climatico, si influenzano reciprocamente dando luogo a catene causa-effetto non lineari che complicano, rendendola allo stesso affascinante, la comprensione del problema [Pepin et al., 2015]. Citiamo a questo proposito il meccanismo di retroazione ghiaccio-albedo, che ha un grande peso nel surriscaldamento delle regioni montane di alta quota.

Una retroazione, in senso generale, è una catena circolare causa-effetto in cui una causa produce un effetto, il quale a sua volta agisce (o meglio, retroagisce) sulla

causa iniziale modificando l'effetto stesso. L'effetto iniziale può essere amplificato (nelle retroazioni positive) o smorzato (nelle retroazioni negative): si tratta di un meccanismo in cui causa ed effetto non restano separati nei loro ruoli precisi ma si confondono. La retroazione di cui stiamo parlando in questo caso coinvolge l'albedo, ovvero la capacità di una superficie di riflettere la radiazione solare che le incide sopra. Superfici chiare, come la neve o il ghiaccio hanno un'albedo elevata (agiscono come degli specchi che fanno rimbalzare i raggi del Sole, riflettendone una frazione che può anche avvicinarsi al 100%). Superfici scure come l'acqua del mare, la terra, gli alberi, hanno un'albedo più bassa, a indicare che sono più efficienti ad assorbire la radiazione, invece che a rifletterla. Cosa succede dunque nelle regioni di alta quota? Il riscaldamento globale ha determinato una diminuzione dell'estensione delle aree coperte da neve e ghiaccio (superfici riflettenti) per lasciare spazio a suolo più scuro. Ciò ha fatto diminuire l'albedo di quelle superfici e aumentare la quantità di radiazione assorbita al suolo. Un suolo che assorbe luce solare si scalda e scalda anche l'aria soprastante (aumentando così il riscaldamento iniziale), facilitando ulteriormente la fusione del ghiaccio e della neve per lasciare spazio a nuovo suolo scuro in grado di assorbire la radiazione solare e scaldarsi. E così via: il primo effetto, la diminuzione di ghiaccio e neve generata dal riscaldamento globale (prima causa) diventa esso stesso una causa del riscaldamento che, in questo modo, si amplifica. Una schematizzazione della retroazione ghiaccio-albedo è riportata in Figura 1.

Come per la riduzione nella copertura di neve e ghiaccio, anche i cambiamenti nella vegetazione e, in particolare, lo spostamento verso l'alto della linea degli alberi possono determinare una diminuzione dell'albedo superficiale e quindi aumentare la capacità del suolo di assorbire radiazione solare e di scaldarsi.



Fig. 1. Rappresentazione schematica del meccanismo di retroazione ghiaccio-albedo, attivo nelle regioni montane e polari.

Esistono poi altre cause e altre retroazioni, oltre a quella ghiaccio-albedo, che agiscono nelle regioni di montagna determinandone il surriscaldamento. Una di queste, ad esempio, è quella legata al vapore acqueo, gas a effetto serra non direttamente immesso in atmosfera dalle attività antropiche, ma in grado di contribuire ai due terzi dell'effetto serra naturale. È noto che un'atmosfera più calda è in grado di contenere una maggior concentrazione di vapore acqueo (ogni grado Celsius in più di temperatura dell'aria corrisponde a un aumento del 7% della quantità massima di vapore acqueo che l'atmosfera può contenere – legge di Clausius-Clapeyron). Nelle regioni di alta quota il vapore acqueo presente in atmosfera tende a condensare e, quindi, a formare nubi che possono anch'esse agire come gas a effetto serra, trattene-ndo e riemettendo la radiazione termica emessa dalla superficie, determinando così un contributo aggiuntivo al riscaldamento. Ciò è particolarmente vero se le nubi si formano di notte (come avviene, ad esempio, nelle regioni di alta quota dell'altopiano del Tibet) e, in casi come questo, l'amplificazione del riscaldamento in montagna riguarda principalmente le temperature minime.

In alcune regioni, anche la presenza di particolato atmosferico fine, detto aerosol (agente inquinante comprendente polveri, fumi, ecc.) può amplificare il riscaldamento alle alte quote. Questo avviene per un duplice motivo. Da un lato, l'aerosol presente in atmosfera impedisce a parte della radiazione solare incidente di raggiungere la superficie (fenomeno noto come "solar dimming"), causando un aumento della differenza nel tasso di riscaldamento tra le basse e le alte quote. Dall'altro, se l'aerosol è di tipo scuro (black carbon o fuliggine, un prodotto della combustione) e, sotto determinate condizioni meteorologiche, viene trasportato ad alta quota, può depositarsi sulle superfici innevate o ghiacciate, renderle più scure e ridurre l'albedo, accelerando in tal modo la fusione del ghiaccio e accorciando la durata dell'innevamento.

Effetti del riscaldamento in montagna

Le conseguenze più rilevanti dell'aumento di temperatura in montagna riguardano le modifiche nel ciclo dell'acqua, che includono la diminuzione della copertura nevosa, il ritiro e la frammentazione dei ghiacciai, la diminuzione della precipitazione nevosa, l'aumento dell'intensità della precipitazione, ma anche della durata dei periodi secchi. Questi fattori, oltre a modificare l'aspetto delle nostre montagne, alterano la portata stagionale dei torrenti e dei fiumi che, alimentati anche dal-

la fusione nivale, portano l'acqua a valle. Le montagne rappresentano la principale fonte di risorsa idrica – le così dette "torri di acqua" – per le regioni di pianura dove questa preziosa risorsa viene impiegata per uso potabile, per irrigazione e produzione di energia e questo è tanto più importante nei periodi di scarsa precipitazione, come in estate. Con l'aumento di temperatura e la fusione della neve che avviene in anticipo rispetto al "normale", l'acqua rischia di essere già terminata proprio nel momento di maggiore deficit idrico dei fiumi e di maggiore richiesta a valle, ovvero durante l'estate calda e secca.

Non meno importanti sono tutte le modifiche che avvengono nella flora e fauna degli ecosistemi montani in risposta al riscaldamento o ad altri impatti riconducibili alle attività umane, come l'uso del suolo o l'abbandono dei pascoli in quota. Ad esempio, la migrazione di specie sia vegetali sia animali che si è verificata verso quote più alte per compensare gli effetti del clima più caldo, come è avvenuto per alcune specie di farfalle nelle Alpi francesi. Purtroppo, oltre un certo limite "fisico" è impossibile spingersi, perché la montagna finisce, e questo va spesso a scapito della sopravvivenza delle specie stesse. Un altro impatto negativo è sulla funzionalità dell'intero ecosistema che può essere compromessa se diverse componenti animali e vegetali, le cui dinamiche sono tra loro intrecciate o interdipendenti, non rispondono in maniera sincrona all'aumento di temperatura. Se, ad esempio, le erbe fioriscono in anticipo, ma gli animali che se ne nutrono, o gli insetti impollinatori, non cambiano le loro tempistiche, si verifica un "mismatch", ovvero uno sfasamento nell'ecosistema che lo rende meno capace di fornire i servizi di approvvigionamento e regolazione di cui noi tutti godiamo.

Le montagne del futuro

L'evoluzione nel clima nei decenni a venire e il contenimento degli effetti negativi già in corso, o inevitabili nel prossimo futuro dipenderà in larga parte da quanto saremo efficaci a intraprendere le azioni di mitigazione volte a ridurre le concentrazioni di gas serra in atmosfera e di adattamento a fronte del clima che è già cambiato.

Per la loro vulnerabilità e sensibilità, le montagne continueranno a scaldarsi di più rispetto al riscaldamento medio globale (che i modelli prevedono potrà attestarsi in un range compreso tra +1,5°C e +5°C nel 2100 rispetto al periodo preindustriale). Anche per questo bisognerebbe perseguire ogni sforzo per limitare l'aumento di temperatura media globale entro 1,5°C -

2°C a fine secolo, come indicato nell'articolo 2 dell'accordo di Parigi.

A partire dalla fine del 1800 le Alpi si sono scaldate di circa +2°C, il doppio rispetto alla media globale [Brunetti et al., 2009], con un'accelerazione visibile dagli anni '80 del secolo scorso. Da quel momento, la quasi totalità dei ghiacciai alpini presenta bilanci di massa negativi, ovvero la perdita di ghiaccio estiva per fusione (ablazione) è sistematicamente maggiore dell'accumulo invernale: i ghiacciai delle Alpi Italiane hanno perso, dal 1980 ad oggi, il 40% della loro estensione.

Un recente studio condotto sul ghiacciaio della Marmolada [Santin et al., 2019] ha evidenziato che in soli 10 anni il ghiacciaio ha ridotto il suo volume del 30%, mentre la diminuzione areale è stata del 22%. Lo stesso studio evidenzia che, se il tasso di riduzione si manterrà simile in futuro, il ghiacciaio potrà essere scomparso nel giro dei prossimi 25-30 anni, anche a fronte di un clima che non si scaldasse ulteriormente.

Le proiezioni climatiche riportate nel quinto rapporto dell'IPCC [IPCC 2013] indicano per la regione alpina un aumento di temperatura compreso tra 1°C e 3-4°C a fine secolo, in funzione dello scenario di emissione di gas serra. Questo porterà a una riduzione della durata della neve tra le 4 e 5 settimane e tra le 2 e 3 settimane rispettivamente al di sotto dei 2000 m e a 2500 m di quota. Il ritiro dei ghiacciai avverrà sempre più rapidamente e i glaciologi annunciano la scomparsa del 90% dei ghiacciai svizzeri entro la fine di questo secolo.

Conclusioni

Studiare le montagne e i cambiamenti in corso alle alte quote non è facile. I dati provenienti da zone remote e di difficile accesso quali le regioni di alta quota sono in molti casi scarsi, talvolta inesistenti in vaste aree geografiche o di reperibilità difficoltosa.

La densità di stazioni meteorologiche al di sopra dei 4500 m è circa un decimo di quella in regioni al di sotto di tale quota. Al di sopra dei 5000 m in qualsiasi parte del mondo serie storiche lunghe di dati osservati, cruciali

per rilevare la presenza di tendenze climatiche, sono scarsissime.

Informazioni dettagliate sulle regioni montane permettono di determinare con un certo anticipo il tipo di evoluzione che ci dobbiamo attendere per i prossimi decenni e di preparare possibili misure di prevenzione, adattamento e mitigazione. È, quindi, essenziale migliorare le capacità osservative, sia con strumenti e reti di monitoraggio in montagna sia sfruttando i dati da satellite, e affiancare alle misure simulazioni dei modelli climatici.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Brunetti M, Lentini G, Maugeri M, Nanni T, Auer I, Bohm R, Schoner W. Climate variability and change in the Greater Alpine Region over the last two centuries based on multi-variable analysis. *Int. J. Climatol.* 2009, 29: 2197-2225. doi:10.1002/joc.1857.
- [2] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013; 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- [3] IPCC. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Minnenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)], 2019.
- [4] Pepin N, Bradley RS, Diaz HF, Baraer M, Caceres EB, Forsythe N, Fowler H, Greenwood G, Hashmi MZ, Liu XD, Miller JR, Ning L, Ohmura A, Palazzi E, Rangwala I, Schöner W, Severskiy I, Shahgedanova M, Wang MB, Williamson SN, Yang DQ. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change* 2015, 5 (5), 424-430. DOI: 10.1038/nclimate2563.
- [5] Santin I, Colucci RR, Zebre M, Pavan M, Cagnati A, Forte E. Recent evolution of Marmolada glacier (Dolomites, Italy) by means of ground and airborne GPR surveys, *Remote Sensing of Environment* 2019, 235, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111442>.