

Ghiacciai e cambiamenti climatici: tra passato, presente e futuro

In questo documento trovate delle note che spiegano il contenuto delle varie slides. Queste note si riferiscono ai numeri di pagina del documento .pptx e non a quelli del documento .pdf. Per quelle pagine in cui vi sono più grafici o immagini, vi sono delle sottosezioni con le relative spiegazioni.

Note

- 1) -
- 2) -
- 3) Video 1 (Ghiacciaio del Morteratsch): ritiro osservato tra il 1900 e il 2022. Notare le imponenti morene laterali che danno idea dello spessore perso dal ghiacciaio (~100 m).

Video 2 (Ghiacciaio del Gorner/Grenz): ritiro di circa 2646 m osservato tra il 1930 e il 2022 (dati GLAMOS). In passato la lingua di questo grande ghiacciaio di tipo himalayano (il secondo più grande delle Alpi per superficie) era nota come Bodengletscher.

Immagini (Ghiacciaio del Rodano): confronto fotografico tra il 1855 e il 2010. Dal 1879 questo ghiacciaio è retrocesso di 1589 m (dati GLAMOS) e non presenta più una lingua con forma a zampa d'orso (fan-like tongue).

- 4) Oggi si parla spesso di riscaldamento globale causato dall'uomo con riferimento al rapido aumento di temperatura dell'aria rispetto all'era pre-industriale. Tuttavia, nel corso della storia della Terra, vi sono state notevoli variazioni (natural!) della temperatura dell'aria sulla Terra. I due grafici riportati in questa pagina mostrano le variazioni della temperatura globale rispetto alla media odierna (linea centrale) negli ultimi 420'000 (grafico sopra) e 50'000 anni (grafico sotto) sulla base dei dati provenienti da sedimenti marini profondi. La parte evidenziata del grafico superiore è quella riportata in quello inferiore. Si può notare che in passato (letzte Warmzeit) la temperatura è stata anche di 4 °C superiore alla media odierna. Questo picco (letzte Warmzeit) corrisponde al periodo noto come Eemiano. A partire da 11'700 anni fa è cominciata l'epoca geologica più recente (Olocene) ed è terminato l'ultimo periodo glaciale/ glaciazione.
- 5) L'Eemiano è il periodo interglaciale precedente l'ultima glaciazione e va da 130'000 a 110'000 anni fa circa. Durante questo periodo, il livello del mare era di 7–8 m più alto rispetto ad oggi. Questo è spiegato dalla probabile fusione completa della calotta della Groenlandia o di quella dell'Antartide occidentale.
Circa 21'000 anni fa i ghiacciai raggiunsero per l'ultima volta nel corso della scorsa glaciazione la massima estensione (LGM). Allora, il livello del mare era 125 m più basso rispetto ad oggi.

Nell'immagine 1 (Hodel) si vede una rappresentazione di Lucerna e del Lago dei Quattro Cantoni nel corso dell'ultima glaciazione.

L'immagine 2 (Svendsen) mostra le calotte di ghiaccio presenti nell'ultima glaciazione nonché una minore estensione dei mari e oceani.

Il Periodo caldo medievale (MWP) nella regione dell'Atlantico settentrionale è durato dal IX al

XIV° secolo e fu probabilmente dovuto a una maggior attività solare, il che fece sì che la temperatura media dell'aria fosse paragonabile a quella degli anni 1990.

In seguito fu la Piccola età glaciale (LIA: 1350-1850), il cui inizio e la cui persistenza di furono dovuti ad attività vulcaniche (1257 Eruzione vulcano Samalas) e diversi minimi nell'attività solare (minimo di Maunder, minimo di Dalton). Allora le temperature erano di circa $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ rispetto agli anni 1990. Dopo l'eruzione del vulcano Tambora nel 1815, ci fu un anno senza estate (1816).

- 6) Globalmente, la temperatura superficiale del periodo 2011–2020 è stata di $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ più alta di quella del periodo 1850–1900 e sulla terraferma la temperatura superficiale del periodo 2011–2020 è stata mediamente più alta di $1.59\text{ }^{\circ}\text{C}$ rispetto al 1850–1900 (IPCC, 2023). In Svizzera e nella regione alpina, la temperatura superficiale è aumentata addirittura di $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ rispetto al 1864 (MeteoSvizzera, 2020), e questo per via di una sempre maggiore superficie rocciosa (scura) esposta, la quale assorbe più radiazione solare rispetto al ghiaccio e alla neve. Nello stesso periodo, l'isoterma $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ si è spostato a monte mediamente di 300–400 m (MeteoSvizzera, 2020).

Le cause del riscaldamento globale in corso sono le emissioni antropiche di gas a effetto serra (principalmente CO_2 e CH_4), che impediscono alla radiazione emessa dalla Terra di raggiungere lo spazio, poiché ne riflettono una maggiore quantità nuovamente verso la Terra. Attenzione, l'atmosfera terrestre contiene naturalmente questi gas a effetto serra e la loro proporzione varia in maniera naturale. Tuttavia, gli umani, bruciando combustibili fossili e allevando sempre più animali hanno aumentato la concentrazione di questi gas nell'atmosfera in maniera artificiale.

Il grafico mostra l'andamento pluriennale della temperatura annuale (temperatura media annuale di tutta la Svizzera → linea nera) e riporta anche lo scarto annuale della temperatura rispetto alla norma 1961–1990. Si vede che prima del 1942, la temperatura era inferiore alla media 1961–1990, mentre che in seguito, e soprattutto dal 1990 è stata sempre al di sopra di tale media. Alcune eccezioni si sono verificate tra gli anni '70 e '80, il che ha comportato un avanzamento dei ghiacciai aventi un'estensione $< 3\text{ km}^2$.

Immagine 1 e 2: Kingletscher, Mattertal → avanzamento di 118.58 m in media tra il 1977 e il 1985.

- 7) 1 Gt (gigatonnellata) = 1 miliardo di tonnellate
 Equivalente in acqua (w.e.): l'equivalente in acqua è la quantità di acqua liquida che risulta dalla fusione di un dato spessore di ghiaccio o neve.

I ghiacciai all'infuori delle calotte polari hanno contribuito per $27 \pm 22\text{ mm}$ all'innalzamento medio globale del livello del mare dal 1961 al 2016. La variazione di massa specifica dei ghiacciai mondiali per il periodo 2006-2016 oscilla tra $-0,1$ e $-1,2\text{ m}$ di equivalente in acqua (w.e.) all'anno, con un contributo globale al livello del mare di $335 \pm 144\text{ Gt}$ all'anno o $0,92 \pm 0,39\text{ mm}$ all'anno. Questo escludendo le calotte polari. L'attuale perdita di massa dei ghiacciai è quindi equivalente al contributo al livello del mare della calotta glaciale della Groenlandia, supera nettamente la perdita della calotta glaciale antartica ed è responsabile del 25-30% dell'aumento totale del livello del mare osservato.

Il grafico mostra i contributi regionali dei ghiacciai all'innalzamento del livello del mare dal 1961 al 2016. I cambiamenti di massa cumulativi regionali e globali (Gt, volume delle bolle) sono mostrati per le 19 regioni di primo ordine. I tassi di variazione di massa specifici (m w.e. yr^{-1}) sono indicati dal colore delle bolle. Esempio di lettura: I ghiacciai dell'Alaska (ALA) mostrano il maggior contributo all'innalzamento del livello del mare, con una variazione di massa totale di circa -3.000 Gt , o 8 mm equivalenti di livello del mare (SLE) dal 1961 al 2016, a causa di un tasso di variazione di massa specifico fortemente negativo ($-0,6\text{ m w.e. yr}^{-1}$ → colore rosso) combinato con un'ampia area glaciale regionale. Si noti che l'Asia meridionale occidentale

(ASW, bolla blu) è l'unica regione in cui i ghiacciai hanno leggermente guadagnato massa nel periodo considerato.

- 8) Nelle Alpi svizzere i ghiacciai hanno perso mediamente 62 ± 7 cm di spessore in equivalente d'acqua all'anno per il periodo 1980-2010. La perdita di volume totale in questi 30 anni ammonta a $-22,51 \pm 1,76$ km³ (Fischer et al., 2015).

Ancora nel 1930 i ghiacciai svizzeri avevano un volume di 121.1 ± 7 km³, sceso nel 2020 a 52.9 ± 2.7 km³ (meno della metà che nel 1930) (Grab et al., 2021; Mannerfelt et al., 2022). Negli ultimi due anni (2022, 2023) il volume è diminuito di un ulteriore 10%!

Esempio Ghiacciaio di Findelen:

Perdita di lunghezza di -2879 m (1885–2021); perdita media di spessore tra il 2004 e il 2023: -12.731 m w.e. (equivalente in acqua)

Grafico 1: perdite di volume annue di tutti i ghiacciai svizzeri a partire dal 2002. Si nota come negli ultimi due anni le perdite siano aumentate notevolmente.

Grafico 2: bilancio di massa del ghiacciaio di Findelen nel 2023. La linea tratteggiata azzurra mostra il bilancio di massa medio per il periodo 2010-2020. Si vede che il bilancio di massa del 2023 è rimasto costantemente sotto la media pluriennale. Questo vuol dire che il ghiacciaio ha accumulato meno massa in inverno (strongly below average → fortemente sotto la media 2010-2020) sotto forma di neve, e in seguito ha perso più massa che in media.

Animazione: evoluzione del ghiacciaio Findelen 2010-2021: notare il ritiro della lingua nonché la diminuzione di spessore visibile sui bordi a contatto con la roccia!

Immagine Huss 2022-2023: a sinistra si vede quanto spessore ha perso il ghiacciaio dell'Altesch nel 2022 (-2.982 m) e a destra nel 2023 (-1.782 m).

- 9) Un bilancio di massa negativo (perdita di massa) a lungo termine porta alla formazione di ghiaccio poco spesso nei margini della lingua del ghiacciaio. Del ghiaccio poco spesso comporta una riduzione della velocità di scorrimento longitudinale del ghiacciaio e una riduzione della chiusura per scorrimento dei canali subglaciali che si formano in estate con l'acqua che scorre alla base del ghiacciaio. La presenza di un canale subglaciale al di sotto del ghiaccio poco spesso può dare inizio a un collasso dovuto alla fusione verso l'alto e al distacco di blocchi di ghiaccio. Questo crea dei crepacci circolari come quelli visibili sulla lingua del ghiacciaio del Rodano nell'immagine doppia (dapprima depressione a sinistra e poi collasso a destra) e nella seguente immagine singola. Spesso, un simile collasso porta al distacco di tutta la parte di lingua a valle del crepaccio circolare.

Le isole di roccia emergono laddove il ghiaccio è più sottile. Poiché il loro albedo (potere riflettente di una superficie) è inferiore a quello del ghiaccio, queste isole assorbono più calore del ghiacciaio e fondono più rapidamente il ghiaccio circostante, allargandosi rapidamente. Vedi immagini seguenti mostranti l'evoluzione di un'isola di roccia nel ghiacciaio del Gries in un solo anno.

- 10) Immagine Antartide: posizione delle valli secche di McMurdo.

Le valli secche di McMurdo Dry sono il deserto più freddo e secco della superficie terrestre, con una temperatura media dell'aria (MAAT) che varia tra i $-14,88$ °C e i $-30,08$ °C. Le precipitazioni annuali (essenzialmente neve) sono circa di ~ 50 mm w. e. In estate, i ghiacciai sono interessati da brevi periodi di fusione superficiale del ghiaccio, il che dà origine a corsi d'acqua effimeri che terminano in laghi endoreici. L'acqua esce pertanto dal sistema per sublimazione del ghiaccio e evaporazione dell'acqua di fusione.

Il bilancio di massa medio annuo del periodo 1993–2013 è inferiore ai ± 6 cm w.e. a-1, un

valore esiguo se confrontato con quello dei ghiacciai alpini per un periodo analogo di 30 anni (1980-2010). Nel caso dei ghiacciai delle Alpi svizzere questo valore è infatti più di 10 volte più grande in negativo (-62 cm w.e.).

La composizione di immagini mostra il ghiacciaio Commonwealth (a), il ghiacciaio Canada (b) e il ghiacciaio Taylor (c).

L'immagine seguente è una cartina estratta dalla mia tesi di Master che mostra la distribuzione del bilancio di massa della lingua del ghiacciaio Commonwealth. Nel periodo 2001-2017 quest'area ha mediamente perso 23.83 cm w.e. di spessore di ghiaccio, il che significa che annualmente la perdita media ammonta a -1.49 cm w.e. Per il periodo 1965-2013, la perdita totale media di spessore è di 1.2 m (Fountain et al., 2017).

- 11) Il grafico mostra il "sea level equivalent" (SLE) delle calotte polari e di tutti i ghiacciai delle catene montuose e di tutte le cappe di ghiaccio. Il SLE è un valore indicante l'equivalente in innalzamento medio del livello del mare e degli oceani del cambiamento di massa dei ghiacciai. La fusione di tutto il ghiaccio antartico provocherebbe un innalzamento del livello del mare di 57.9 m (di cui 4.8 m dalla fusione dell'Antartide occidentale). La fusione della Groenlandia provocherebbe un innalzamento del livello del mare di 7.42 m. La fusione di tutti i ghiacciai delle catene montuose e di tutte le cappe di ghiaccio contribuisce a innalzare il livello di tutti i mari di 0.32 m.
- 12) Mappa Antartide: posizione del ghiacciaio Thwaites.

Il ghiacciaio Thwaites è il ghiacciaio più largo sulla Terra con circa 120 km di larghezza. Ha uno spessore che varia tra gli 800 e i 1200 e un volume di 483'000 km³. Questo volume corrisponde a una massa di circa 442'814.4 Gt (o 442'814.4 miliardi di tonnellate!) E a un innalzamento medio del livello marino di 65 cm, senza contare che la sua destabilizzazione potrebbe comportare anche quella di altri ghiacciai limitrofi (Pine island glacier). Dal 2009 a oggi la sua velocità di scorrimento è raddoppiata, passando da 50 m/a a 100 m/a. La sua perdita di massa annua ammonta a 50 Gt e tra il 2002 e il 2016 ha perso in totale 748 Gt, il che corrisponde a + 2.07 mm di livello del mare in media. Il collasso totale è possibile nei prossimi decenni/secoli.

Il suo collasso sarebbe una conseguenza della fusione subacquea del ghiaccio dovuta ad un aumento della temperatura del mare di Amundsen (+0.33 °C/secolo) (Naughten et al., 2022).

Lo schema seguente mostra il funzionamento della "marine ice sheet instability" che porterebbe al collasso del ghiacciaio Thwaites. Marine ice sheet instability: l'acqua calda e densa dell'oceano a media profondità che circonda la piattaforma continentale dell'Antartide viene sollevata sulla piattaforma continentale e si sposta verso i fronti di ghiaccio e le zone di contatto tra ghiaccio e terraferma (grounding line). Ciò causa un aumento della fusione e del ritiro nelle zone di contatto tra ghiacciaio e oceano, nonché un assottigliamento delle piattaforme di ghiaccio. Ciò riduce il buttressing, cioè lo stress resistivo che le piattaforme di ghiaccio esercitano sul ghiaccio appoggiato sulla terraferma. Questa diminuzione del buttressing porta a un flusso più rapido di ghiaccio a terra. Un flusso più rapido di ghiaccio a terra porta a un ulteriore assottigliamento, causando il galleggiamento del ghiaccio precedentemente a terra, mentre la zona di contatto (grounding line) si ritira verso l'interno lungo un pendio retrogrado (cioè, il letto è inclinato verso l'interno), portando a una maggiore quantità di ghiaccio che attraversa la zona di contatto e a una minore area di accumulo. Questo processo di feedback positivo è alla base della "marine ice sheet instability".

L'immagine seguente mostra una parte del ghiacciaio Thwaites in Antartide.

- 13) La prima illustrazione con svariate simulazioni mostra la variazione dell'area e dello spessore del ghiaccio per i ghiacciai della regione dell'Aletsch (E4m), con e senza stabilizzazione dell'aumento di temperatura dell'aria a 2 °C.

L'animazione mostra invece l'evoluzione del ghiacciaio del Rodano fino al 2100 in caso di stabilizzazione dell'aumento di temperatura dell'aria a +1.5-2 °C. Si può notare che il ghiacciaio, per quanto ridotto, continuerebbe a esistere.

- 14) La prima immagine mostra come si presenterebbe la regione del ghiacciaio del Rodano nel 2100 se la temperatura dell'aria dovesse aumentare fino a +4.4 °C rispetto all'era pre-industriale. Si può notare che il ghiacciaio, in questo caso, fonderebbe completamente.

La seconda immagine mostra come si presenterebbe la regione del ghiacciaio dell'Aletsch nel 2100 se la temperatura dell'aria dovesse aumentare fino a +4.4 °C rispetto all'era pre-industriale. Anche il ghiacciaio più grande delle Alpi, che ha attualmente uno spessore massimo di 900 m circa in corrispondenza della Konkordiaplatz, fonderebbe completamente e svariati laghi si formerebbero nelle depressioni più pronunciate.

- 15) In conclusione, bisogna sottolineare che le fluttuazioni della temperatura sulla Terra sono sempre esistite, principalmente a causa di attività vulcanica (vedi supervulcani o formazione di trappi), attività solare e variazioni dei parametri astronomici della Terra (cicli di Milankovitch). Pertanto, in passato (ad esempio in epoca romana), i ghiacciai sono stati già meno estesi di quanto non lo siano stati oggi. Tuttavia, dalla fine del XIX secolo, gli esseri umani hanno provocato un rapido riscaldamento di atmosfera e oceani che ha un impatto sui ghiacciai e sugli esseri viventi. È dunque necessario adottare misure di protezione del clima.

- 16) -