

1 - Metodi per la ricostruzione del clima del passato (fino a 800.000 anni fa)

1.1 - Il ghiaccio ricorda (rapporto isotopico O^{16}/O^{18})

L'atomo di ossigeno ha numero atomico 8: 8 protoni e 8 neutroni nel nucleo (numero di massa 16) e 8 elettroni. In natura vi sono alcuni atomi "anomali" (~0,2 % del totale) che hanno due neutroni in più (numero di massa 18). Una piccola parte delle molecole d'acqua anziché H_2O^{16} ha formula H_2O^{18} , più "pesante". Con spettrometri di massa, si stimano, in un campione d'acqua, le quantità di O^{16} e di O^{18} per calcolare il **rapporto O^{16}/O^{18}** . Tale rapporto è maggiore nell'acqua sottoforma di umidità nell'atmosfera rispetto a quella contenuta negli oceani; esso aumenta nell'umidità di una massa d'aria che si sposta da una zona a clima caldo a un'altra a clima freddo.

Le molecole più pesanti (H_2O^{18}) "evaporano" meno facilmente, per cui sono più frequenti nello stato liquido. Dal gas tendono a "condensare" più facilmente, tanto più bassa è la temperatura. Una massa d'aria umida diretta a Nord, zona più fredda della Terra, scarica parte della propria umidità durante il viaggio; arriva tanto più povera di ossigeno "pesante" quanto più diminuisce la temperatura: la neve che cade al Nord è quindi meno ricca di O^{18} .

Nei ghiacci dei poli e della Groenlandia sono sovrapposti strati quali risultato del clima del passato. Il ghiaccio caratterizzato da un rapporto O^{16}/O^{18} più alto è dovuto alla neve caduta in un anno con clima più freddo e viceversa. Gli strati di ghiaccio formano le immense masse delle calotte polari; essi possono essere studiati prelevando, in profondità, lunghi cilindri di ghiaccio (carote); ciò consente di risalire a ricostruzioni paleoclimatiche molto lontane nel tempo, fino a **centinaia di migliaia di anni**.



I ghiacciai della Groenlandia e dei poli sono costituiti da strati di ghiaccio che si sono accumulati nel corso di centinaia di migliaia di anni. I carotaggi consistono nel prelevare lunghi cilindri per ottenere campioni di ghiaccio tanto più antico quanto più profondo.

1.2 - Il ghiaccio ricorda (CO_2)

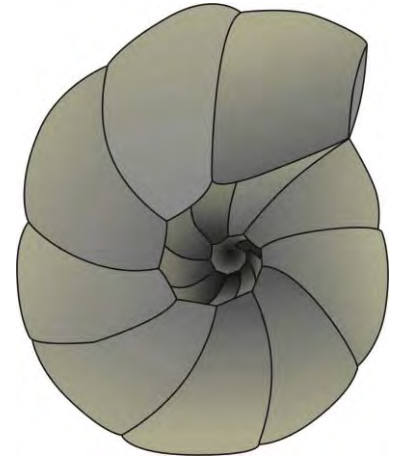
Nel ghiaccio sono presenti piccole bolle d'aria che contengono l'aria presente nel momento in cui il ghiaccio stesso si è formato. Analizzando la composizione dei gas dell'aria imprigionata negli strati di ghiaccio polari e groenlandesi ottenuti mediante campionamenti, ovvero con gli stessi

carotaggi sopra descritti, si risale al tenore di **CO₂ nell'atmosfera** nei vari momenti della storia recente della Terra e in relazione con l'andamento termico ricavato, per esempio con l'analisi del rapporto O¹⁶/O¹⁸.

La correlazione tra questi due parametri risulta dai modelli elaborati mediante potenti calcolatori. Sebbene tali modelli siano semi-empirici e imperfetti, essi riescono comunque a ricostruire, in modo attendibile, la storia climatica della Terra fino a **800.000 anni fa**.

1.3 - Plancton. Registratore climatico

Si propone a destra una rappresentazione (molto ingrandita) del guscio di un **Foraminifero** facente parte del plancton. I foraminiferi sono protozoi eucarioti eterotrofi marini, bentonici e soprattutto planctonici. Abitano tutti gli ambienti marini ed alcune specie anche ambienti di acqua dolce o salmastra,



Comparvero circa 500 milioni di anni fa; successivamente invasero tutti i mari e gli oceani, adattandosi a molti modi di vita. La loro cellula è protetta e rivestita esternamente da un guscio, spesso mineralizzato, che può raggiungere grandi dimensioni per un organismo unicellulare (fino a 10 - 12 cm di diametro). La presenza di parti mineralizzate consente ai gusci di fossilizzare facilmente nei sedimenti di origine marina. Alcuni fondali oceanici (2.000 ÷ 5.000 m di profondità) sono ricoperti di scheletri di Foraminiferi del genere *Globigerina*: i cosiddetti **fanghi a globigerine**.

Campioni di sedimenti sono prelevati mediante cilindri molto lunghi (carote) con navi oceanografiche in grado di “perforare” i fondali senza modificare la stratigrafia originaria. Analizzando le successioni di faune conservate nelle carote, viene stimata la storia della vita del plancton che ha popolato le acque in passato. Si individuano successioni di popolazioni tipiche di ambienti caldi e freddi a testimonianza di mutamenti climatici che, nel tempo, condizionarono la vita presso la superficie delle acque marine e lacustri. Inoltre gli strati dei fanghi con maggior presenza dell'isotopo dell'ossigeno O¹⁸ dell'ossigeno denunciano temperature più rigide a livello globale.

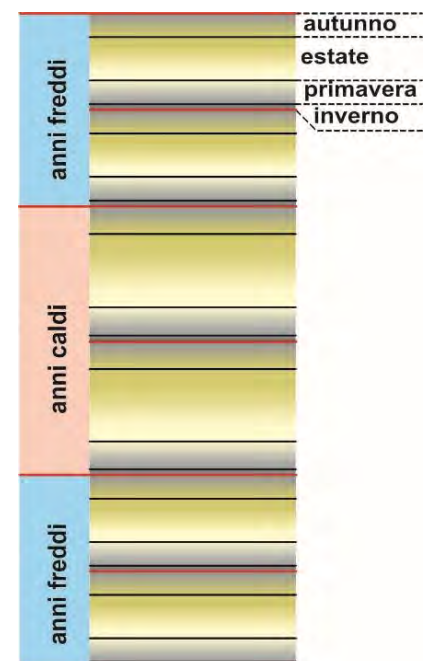
In termini temporali, mediante l'analisi degli strati dei fanghi a globigerine, si riesce a risalire, seppure con molta cautela, molto indietro nella storia della Terra, in particolare delle vicende climatiche fino a 100 milioni di anni fa.

1.4 - Le varve glaciali

Le **varve** (dallo svedese *varving* = ciclo) sono argille regolarmente stratificate in serie di sedimenti, dove a strati chiari si alternano strati scuri. Si accumulano sul fondo di bacini alimentati da corsi d'acqua derivanti dalla fusione di ghiacciai.

La varva è tipicamente costituita da un piccolo strato scuro (quasi nero) in basso, che si forma nell'inverno per sedimentazione prevalente di materia organica. In primavera ed in estate aumenta la sedimentazione di sostanza organica, ma aumenta maggiormente quella di detriti minerali portati dalle acque di fusione dei ghiacci, con conseguente formazione di strati più spessi e più chiari. Le varve più spesse (soprattutto nelle loro porzioni più chiare) indicano fasi climatiche più calde.

Se consideriamo le varve direttamente collegate al ritiro degli ultimi ghiacciai si può andare indietro nel tempo fino a circa 15.000 anni. Se consideriamo le varve in senso lato (sedimenti lacustri annuali), possiamo arrivare fin quasi a 100.000 anni con buona

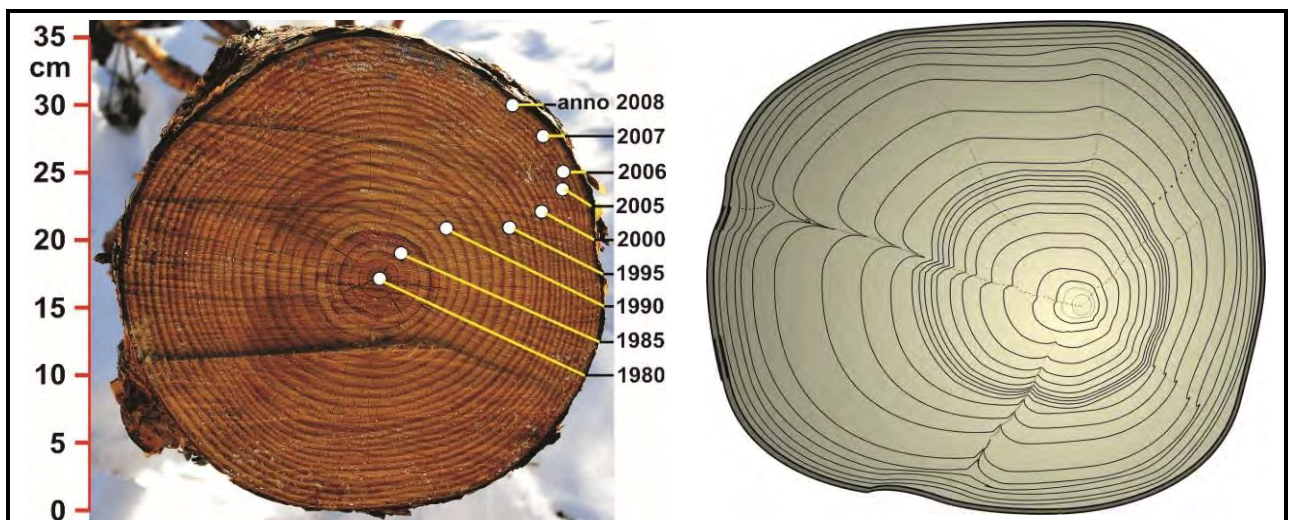


precisione. Oltre questo limite, si trovano "varviti" in rocce sedimentarie molto antiche (anche di milioni di anni), ma non offrono più una cronologia continua anno per anno collegata al presente.

1.5 - Dendroclimatologia

Tra i metodi utilizzati per lo studio delle fluttuazioni climatiche in epoche storiche, la dendroclimatologia, sviluppatasi a rango di vera scienza a partire dagli anni 1950, è tra le più importanti, una delle tecniche più significative nelle determinazioni cronologiche. Ogni sezione trasversale del tronco di un albero evidenzia una serie di anelli di crescita concentrici; se ogni anello rappresenta la crescita annuale dell'albero, contando il numero degli anelli, si risale all'età dello stesso. Se l'insieme degli anelli di crescita ha valore cronologico, ciascun anello ha valore climatico, perché riflette le condizioni meteorologiche che hanno influito sulla sua crescita.

Ogni anello è una specie di annotazione climatica dell'anno in cui si è formato. Se su un diagramma si riportano in ascissa gli anni e in ordinata l'incremento dello spessore degli anelli, si ottiene la "curva di crescita dell'albero". L'interpretazione corretta di tale curva fornisce indicazioni utili sulla successione di eventi climatici favorevoli o sfavorevoli che hanno caratterizzato la vita dell'albero.



Lo spessore degli anelli di crescita in una sezione di tronco di un albero dipende dalle condizioni ambientali, soprattutto da quelle climatiche. A sinistra una sezione del tronco di un pino silvestre di quasi 30 anni. A destra è una situazione teorica con anelli di crescita con spessori diversi. Quelli maggiori indicano condizioni favorevoli alla crescita vegetativa (meno freddi e più umidi).

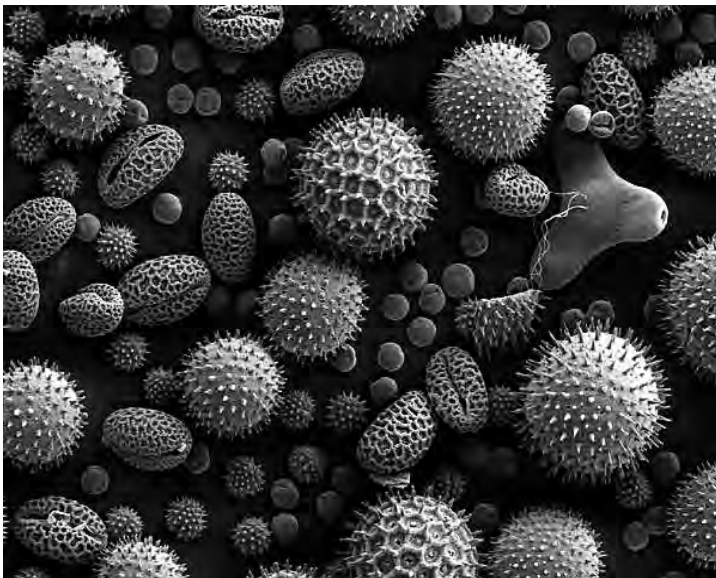
	<p><i>Pinus longaeva</i>, circa 4.857 anni, in California.</p>	<p>Pino Bristlecone, circa 5.067 anni, in California.</p>	<p>Castagno dei cento cavalli, l'albero più antico (3.000-4.000 anni) d'Europa, in provincia di Catania.</p>
--	--	---	--

L'interpretazione corretta di una curva di crescita presuppone alcune considerazioni; cosa significa condizioni meteorologiche favorevoli o sfavorevoli? Qual è il fattore critico principale nell'ostacolare la crescita dell'anello, la temperatura, le precipitazioni?... Molto dipende dalla

fisiologia dell'albero e dal luogo in cui si trova. Alberi sistemati in modo diverso (esposti al vento o al riparo di una conca, presso un corso d'acqua o nel bosco,....) sono diversamente vulnerabili agli effetti del tempo.

In un clima caldo un abbassamento termico estivo può giovare alla pianta, mentre per gli alberi che si trovano nelle zone climatiche fredde più è caldo meglio è. Annate negative possono influire su quelle seguenti. Ad ostacolare la crescita degli anelli sono anche la competizione con altri alberi per la luce e per l'acqua, i parassiti, ecc.... Sono fattori biologici che, molto spesso, agiscono nei confronti delle piante analogamente agli eventi meteorologici/climatici sfavorevoli. Tenendo conto di tutti questi fattori, scegliendo un elevato numero di alberi molto longevi (i *Pinus aristata*, per esempio, sono conifere che, sulle White Mountains della California, possono sopravvivere per più di 4.000 anni) e in diverse zone, con opportune elaborazioni si compiono correlazioni crescita/clima statisticamente attendibili.

Si ricostruisce il clima fino a circa **12.000 - 13.000 anni fa**. Si utilizza la tecnica della *datazione incrociata*, che consiste nel sovrapporre le sequenze di anelli di alberi viventi con quelle di tronchi morti, legname archeologico o sub-fossile (conservato in paludi o laghi).



1.6 - Metodi palinologici

L'involucro protettivo dei granuli di polline ha grande resistenza agli agenti fisici e chimici; ciò è all'origine dell'attitudine delle spoglie di questi "microrganismi" a conservarsi a lungo nei sedimenti sotto forma di fossili.

La produzione annuale delle foreste di conifere della Svezia ammonta a circa 75.000 tonnellate; i granuli sono trasportati dal vento fino a 50 km. Nelle foreste l'aria è ricca di polline; si ha una vera e propria "pioggia" sui terreni intorno, compresi i bacini lacustri, lagunari e costieri, dove avviene la sedimentazione.

Alcuni dei bacini, con vita più lunga, sono testimoni dei mutamenti climatici. A condizioni variabili corrispondevano specie diverse (adatte a climi caldi o freddi) e a diverse produzioni di tipi di polline che si raccoglievano insieme ai sedimenti in fondo ai bacini.

Nelle cave di torba e di carbone sono raccolte grandi quantità di materiali fitogeni e costituiscono sedimenti ricchi di polline. Con carotaggi e analisi al microscopio, si classifica la successione temporale dei pollini contenuti nei diversi strati e quindi delle associazioni vegetali che li hanno prodotti. Tali associazioni sono funzione del clima che caratterizzava l'ambiente in cui vivevano.

La maggior parte degli studi palinologici si concentra sugli ultimi **12.000 anni** e sull'ultima era glaciale. In questo tempo, i granuli di polline appartengono a specie ancora esistenti o simili a quelle attuali. Questo permette di applicare il "principio dell'attualismo": se oggi una pianta vive solo in climi freddi, trovare il suo polline in uno strato antico indica un clima freddo in quel periodo. La risoluzione è molto elevata; si possono vedere cambiamenti climatici che avvengono nell'arco di pochi decenni.

Esistono siti eccezionali dove la sedimentazione non è mai stata interrotta dai ghiacciai. Il Lago Baikal in Russia o il Lago Elgygytyn nell'Artico siberiano hanno fornito sequenze polliniche che arrivano a 3,5 - 5 milioni di anni fa. In Italia, bacini intermontani come quello di Boiano o di Tavernola Bergamasca offrono archivi che coprono diverse centinaia di migliaia di anni.

1.7 - Permafrost e paleontologia

Il permafrost è suolo o roccia congelato in modo permanente. Nelle regioni artiche (Siberia, Alaska, Canada) e nelle montagne (Alpi, oltre 2.600 m circa): 20 - 22 % delle terre emerse. Profondo da pochi metri ad oltre 1.500 metri. Contiene acqua (ghiaccio) o (raramente) secco. È una “Colla” che tiene insieme pendii e strutture. Immagazzina grandi quantità di materia organica non decomposta ed è impregnato di CO₂ e di CH₄.



In una fase interglaciale (meno fredda) nelle alte latitudini e altitudini, nella breve estate si accumula molta materia organica (ciclo produttivo favorevole). Con l'arrivo della stagione fredda buona parte di essa risulta solo in parte degradata e viene congelata nell'inverno. Negli anni successivi il ciclo si ripete e si forma un accumulo sempre più potente di materia organica non decomposta o parzialmente decomposta insieme a materiale detritico vario (principalmente argilla, limo, sabbia). Con l'ultima glaciazione avviene il congelamento della spessa coltre detritica. Ancora oggi in estate, scongela soltanto la porzione superficiale e rimane congelata la potente serie sottostante.



Fossile di testa di lupo.



Fossile di puledro.

Il permafrost è importante per la paleontologia: agisce come capsula del tempo naturale, conservando, per migliaia di anni, resti organici (piante, animali, persino DNA antico) grazie alle sue basse temperature, come i mammut e rinoceronti lanosi del Pleistocene. I rinvenimenti di resti di organismi permettono la ricostruzione delle antiche cenosi le cui composizioni dipendevano dai cicli climatici.

La ricostruzione dell'andamento del clima nel periodo geologico recente e storico è fondamentale per comprendere cosa sta accadendo al clima attuale. I metodi per le analisi climatiche del passato sono diversi, per esempio quelli sopra descritti. Tutti vanno considerati con attenzione; i risultati da essi forniti vanno confrontati ed integrati in modo da ottenere un modello unico (entro certi limiti di tolleranza crescenti quanto più indietro si va nel tempo) riconosciuto dalla comunità scientifica e che può essere visualizzato con i diagrammi proposti nel seguito.

L'**IPCC** è l'acronimo di **I**ntergovernmental **P**anel on **C**limate **C**hange (gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico); fu istituito nel 1988 dalla **W**orld **M**eteorological **O**rganiza**T**ion (**WMO**) e dallo **U**nited **N**ations **E**nvironment **P**rogramme (**UNEP**).

L'IPCC è avallato dall'ONU. Esso ha stabilito che il **periodo di riferimento** rispetto il quale si confronta l'andamento climatico attuale è il **cinquantennio 1851 - 1900**, che segue il termine della piccola era glaciale (1250 - 1850) e precede la rivoluzione industriale, ovvero precedente l'epoca con grande diffusione del principale gas clima-alterante (anidride carbonica - CO₂) in atmosfera.

In realtà l'inizio della rivoluzione industriale risale al tardo Settecento, con il vapore e la meccanizzazione, per proseguire con una seconda fase (fine Ottocento) con elettricità, chimica e petrolio. Tuttavia le prime fasi della rivoluzione industriale comportarono scarse emissioni; nel 1850 erano meno di 1,5 Gt/anno (meno del 4 % delle emissioni attuali), mentre la concentrazione di CO₂ in atmosfera era poco inferiore a 280 ppm (2,4 volte inferiore a quella attuale), in un mondo abitato da meno 1,5 miliardi di persone (contro più di 8,3 miliardi attuali).

A partire dal 1850 erano già sufficientemente numerose le stazioni meteorologiche nel mondo in grado di registrare la temperatura dell'aria che, a livello medio annuo del pianeta, può essere determinata, con buona precisione: **13,7 °C**.

I primi importanti tre eventi storici di politica ambientale internazionale

SUMMIT DELLA TERRA, Rio de Janeiro - giugno 1992

Prima conferenza mondiale dei capi di stato sull'ambiente. Parteciparono 172 governi, 108 capi di Stato e 2.400 rappresentanti di organizzazioni non governative. La Conferenza di Rio, inoltre, produsse i seguenti documenti ufficiali:

- Dichiarazione di Rio sull'ambiente e sullo sviluppo;
- agenda 21;
- principi sulle foreste;
- convenzione sulla diversità biologica;
- **convenzione sul cambiamento climatico.**

PROTOCOLLO DI KIOTO, Giappone - 1997

Accordo internazionale fondamentale, adottato nel 1997 e entrato in vigore nel 2005, che ha imposto per la prima volta **obblighi vincolanti ai paesi industrializzati per ridurre le emissioni di gas serra con l'obiettivo di contrastare il riscaldamento globale**, stabilendo obiettivi specifici per il periodo 2008 - 2012, basato sulla Convenzione quadro ONU sui cambiamenti climatici.

È stato prorogato dall'Emendamento di Doha (Golfo Persico; 2012 - 2020), poi sostituito dall'Accordo di Parigi (entrato in vigore nel 2016), che adotta un approccio più universale.

CONFERENZA INTERNAZIONALE SUL CLIMA DI PARIGI (COP - 2015)

Primo trattato universale, giuridicamente vincolante sui cambiamenti climatici:

- Mantenere l'aumento della temperatura media globale **sotto i 2 °C** rispetto ai livelli preindustriali, puntando a limitare l'aumento a **1,5 °C**.
- Puntare alla **neutralità climatica** (emissioni pari a zero) nella seconda metà del secolo.
- Ogni Paese stabilisce, comunica e mantiene i propri obiettivi di riduzione delle emissioni attraverso piani che devono essere aggiornati e resi più ambiziosi ogni **5 anni**.
- I Paesi ricchi devono aiutare quelli poveri finanziariamente (almeno **100 miliardi di dollari l'anno**) e attraverso il trasferimento di tecnologie pulite, per favorire una transizione energetica globale.

2 - Le successioni cronologiche secolari della temperatura in Piemonte

2.1 -Torino

Lo studio più importante sul clima di Torino è stato quello di Di Napoli & Mercalli, pubblicato nel 2008 dalla Società Meteorologica Subalpina (socio fondatore della Società Meteorologica Italiana dal novembre 2000). È un volume di oltre 900 pagine ricco di descrizioni, dati e racconti su episodi meteorologici in quasi tre secoli di storia: “...la ricchezza di informazioni raccolte e descritte dagli Autori rende il loro lavoro eccezionale e unico. Libri come...” questo “...trasformano semplici stazioni di misura in pezzi del nostro patrimonio culturale” (dalla prefazione di Reinhard Böhm¹)

“Le serie di osservazioni meteo plurisecolari sono fondamentali per comprendere la variabilità e i mutamenti del clima. Le rilevazioni termometriche (...) iniziate nel 1753 costituiscono una sequenza tra le più lunghe (...) in Italia e nel mondo” (Di Napoli & Mercalli, 2008).

Bisogna evidenziare che le rilevazioni sono state effettuate da osservatori diversi in varie parti della città e con strumenti via via più moderni, quindi in realtà si dispone di diverse serie che, in piccola parte, si sovrappongono. Inoltre occorre citare l'effetto dell'isola termica².

Gli Autori hanno quindi proceduto ad una serie complessa di elaborazioni per colmare alcune piccole lacune e soprattutto con l'obiettivo “...di ricondurre le temperature rilevate a un unico sito ipoteticamente funzionante per l'intera durata della serie, con il termometro nella stessa collocazione e in condizioni di contorno immutate”.

La serie completa pubblicata va dal 1753 al 2007 per un totale di 255 anni. Sulla base delle rilevazioni effettuate presso le stazioni meteorologiche (in particolare quella di via della Consolata) operative in Torino dagli anni Novanta a cura dell'ARPA - Piemonte, grazie a una collaborazione tra SMI e l'Arpa stessa, la serie ultracentenaria succitata è stata aggiornata al 2024 dai medesimi Autori (scaricabile dal sito dell'ARPA), aggiungendo quindi 18 anni per arrivare al lungo periodo 1753 - 2025 (273 anni).

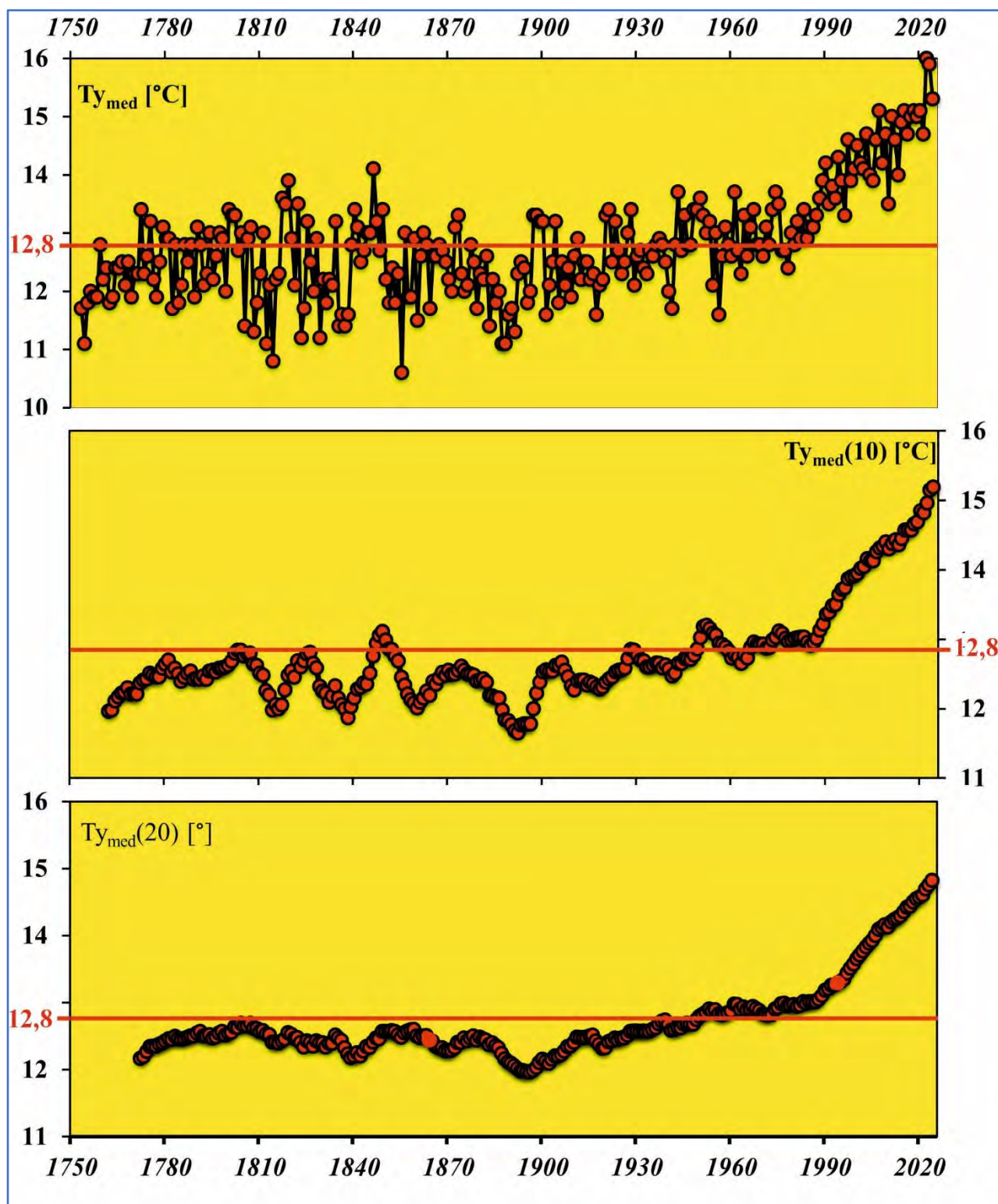
Le tre figure che seguono illustrano, la prima (in alto), la successione cronologica delle temperature [°C] medie annue ($T_{y_{med}}$) dal 1753 al 2025. Si osserva un andamento molto frastagliato, dovuto alla notevole variabilità interannuale. A fronte della temperatura media annua dell'intera serie, pari a 12,8 °C, si osserva anche una evidente tendenza all'incremento a partire dagli anni Novanta del secolo scorso.

Allo scopo di ridurre l'elevato “frastagliamento” del grafico, si è ritenuto procedere a rappresentare la stessa successione cronologica con le medie mobili con equiperiodi di 10 e di 20 anni per meglio mettere in evidenza le eventuali tendenze. Dall'andamento dei due grafici risulta molto evidente l'incremento termico degli ultimi decenni.

Nelle due figure successive sono riportate le successioni cronologiche normali delle medie annue “ ΔT ” e con equiperiodi di 10 anni “ $\Delta T(10)$ ” degli scostamenti delle stesse temperature [°C] medie annue rispetto alla media di riferimento del cinquantennio 1851 - 1900 indicata dall'IPCC (12,2 °C per Torino). Nel 2022 è risultato il massimo scostamento, con +3,8 °C, mentre la media dell'ultimo decennio risulta di +3 °C.

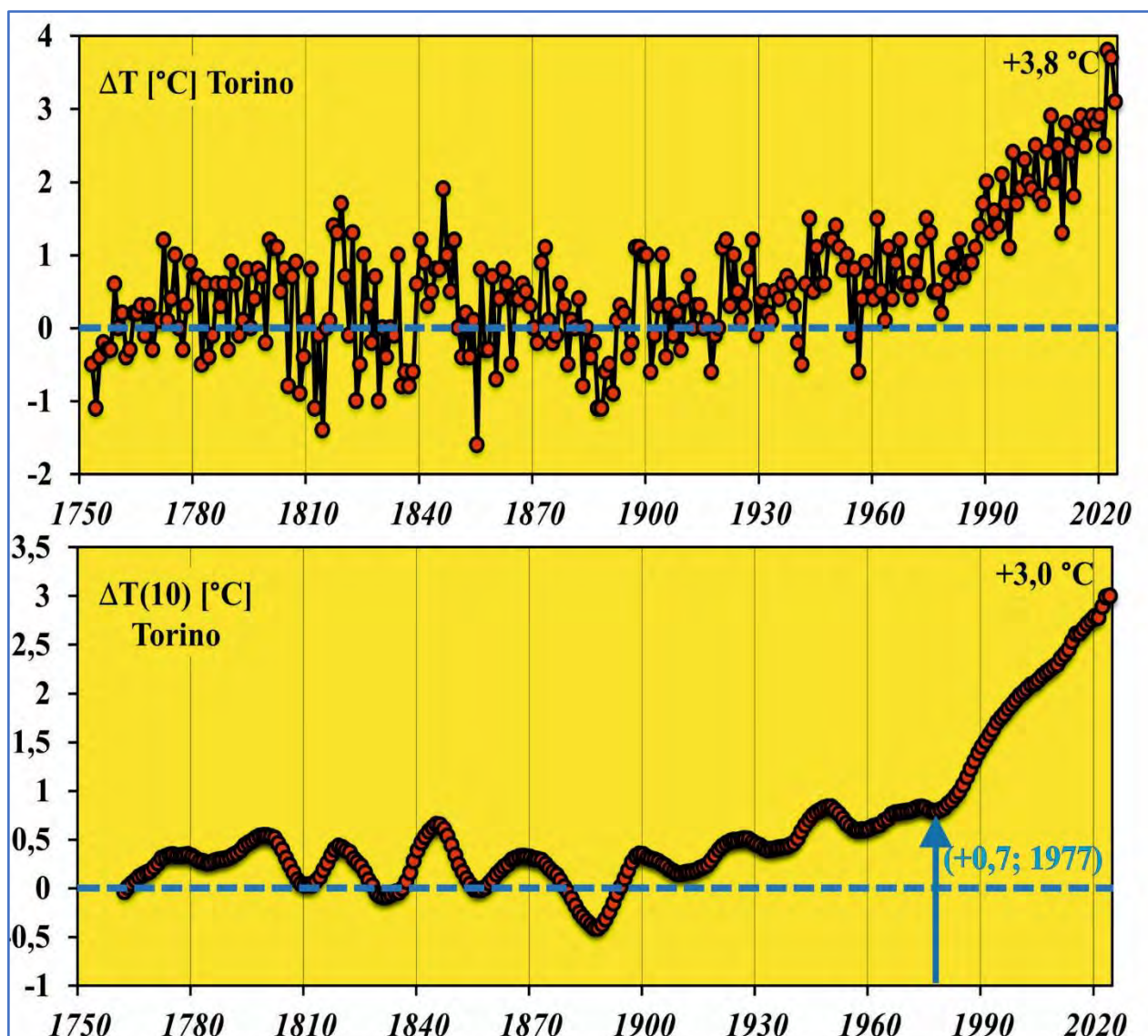
¹ ZAMG - Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.

² L'isola termica è il fenomeno che determina un microclima più caldo nelle aree urbane rispetto alle circostanti zone periferiche e rurali, più evidente con l'espansione delle città, almeno fino alla fine degli anni Novanta del secolo scorso per Torino, la cui serie “... è coerente in se stessa, risultando già influenzata fin dall'inizio delle misure, con un valore stimabile in 1,5 °C. L'espansione urbana e il traffico veicolare hanno contribuito con ulteriori 0,4 °C portando l'entità totale dello scarto a 1,9 °C, un incremento che è stato considerato nell'analisi statistica e che non inficia la rappresentatività della serie ai fini dell'individuazione del reale segnale climatico del riscaldamento globale” (Di Napoli & Mercalli, 2008).



Torino. Successioni cronologiche delle temperature [°C] medie annue “ $T_{y_{med}}$ ” e delle relative medie mobili per equiperiodi di 10 “ $T_{y_{med}(10)}$ ” e di 20 “ $T_{y_{med}(20)}$ ” anni. È indicata, con **linea rossa**, la **temperatura media annua dell’intera serie 1753 - 2024 (12,8 °C)**.

L’incremento di +3 °C rispetto al periodo di riferimento è nettamente superiore al limite di 1,5 °C prospettato con la Conferenza Internazionale sul Clima di Parigi (COP - 2015). È interessante, a questo punto, tentare di individuare il momento a partire dal quale risulta un netto incremento delle temperature medie annue che, dal grafico delle medie mobili “ $\Delta T(10)$ ”, risulta essere il 1977, già con +0,7 °C rispetto al riferimento. Alla fine della serie (anno 2024), come succitato, risulta il valore di + 3 °C, quindi un incremento di 2,3 °C in 48 anni, ovvero **0,048 °C/anno**.



Torino. Successioni cronologiche degli scostamenti delle temperature [°C] medie annue “ ΔT ” e delle relative medie mobili con equiperiodo di 10 anni “ $\Delta T(10)$ ”. A partire dal 1977 risulta un incremento continuo delle medie decennali, fino all’ultimo valore (1915 - 2024) pari a +3 °C, risultato di un **incremento di quasi 0,05 °C/anno**.

Dunque risulta, per **Torino** un **incremento della temperatura media annua di quasi 0,05 °C/anno, ovvero mezzo grado Celsius ogni 10 anni**, fino al valore di ben +3 °C rispetto al periodo di riferimento (12,2 °C per la serie 1851- 1900). Si tratta di un valore molto elevato, forse il risultato di una situazione particolare a livello locale (effetto isola termica)? Sorge la necessità di una verifica, cioè un’analisi metodologicamente simile, ma relativa ad una **stazione meteorologica le cui condizioni non siano alterate dalle attività antropiche locali: OROPA**.

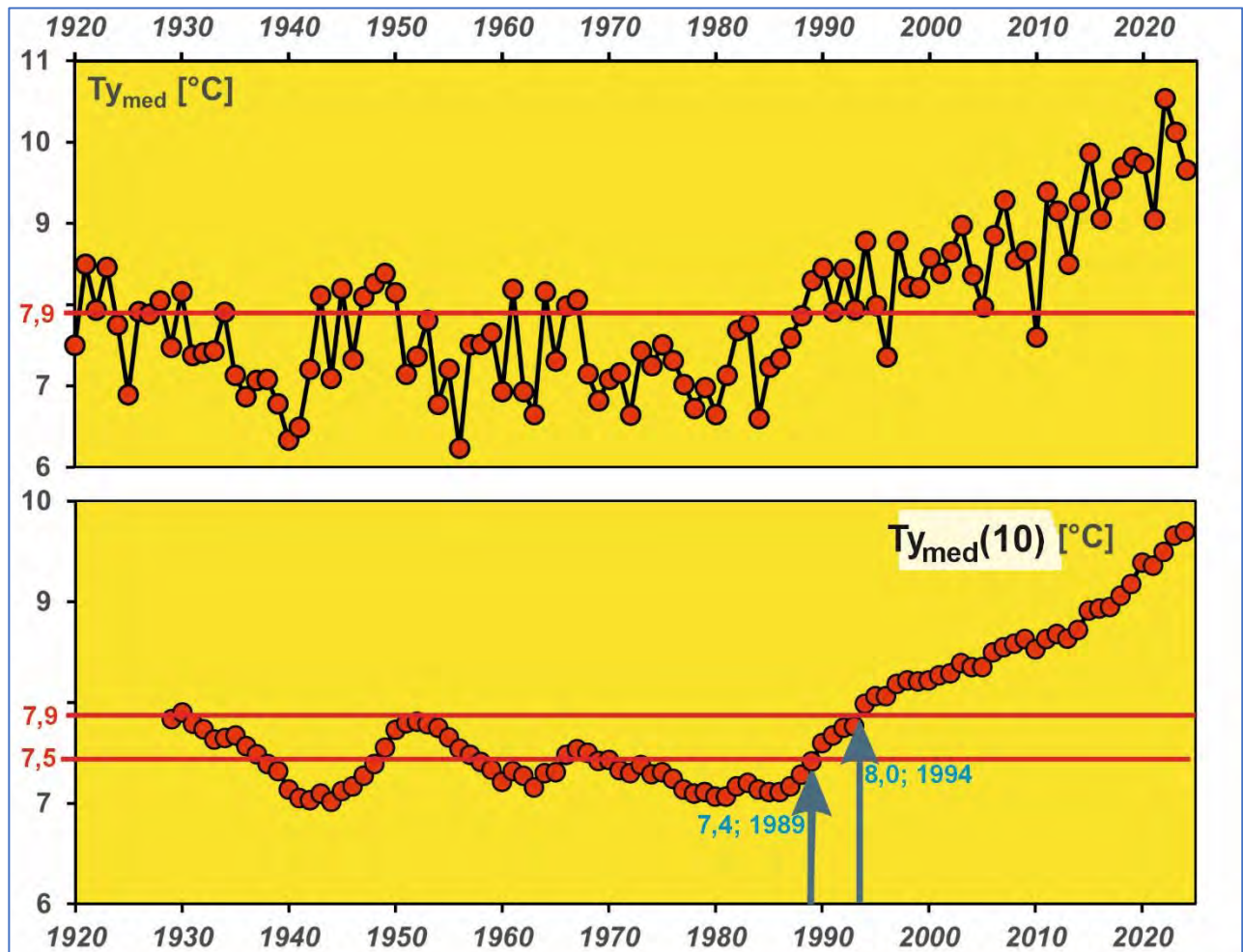
2.2 - Oropa

Il Santuario della Madonna Nera di Oropa (1.280 m s.l.m., 13 km a monte di Biella) è il più antico santuario mariano dell’occidente, entro una porzione territoriale divenuta Riserva Naturale Speciale Sacro Monte di Oropa, inserita nel sistema delle aree protette della Regione Piemonte.

Presso il santuario opera l’osservatorio meteorologico di Oropa. Dal 1920 le rilevazioni furono condotte mediante sistemi uniformati rispetto a quanto predisposto, pochi anni prima, dal Servizio

Idrografico Italiano. Da allora la stazione ha proseguito nei rilievi fino ad arrivare ai giorni nostri. L'importanza di tale stazione dipende dalla lunghezza della serie di osservazione (1920 - 2025; 106 anni), dalla continuità e dal fatto che gli strumenti, pur considerando gli aggiornamenti tecnologici, hanno sempre occupato le stesse posizioni, in un contesto areale poco o nulla modificato nel tempo.

Nella figura sotto riportata sono rappresentati due diagrammi. Quello superiore è la successione cronologica delle temperature medie annue " $T_{y_{med}}$ ". È un diagramma la cui figura è condizionata dalla variabilità interannuale. Quello inferiore è la successione cronologica delle medie mobili con equiperiodo di 10 anni " $T_{y_{med}(10)}$ ", un tipo di elaborazione statistica che, come si è visto anche per Torino, permette di evidenziare eventuali tendenze. In entrambi i diagrammi una linea tratteggiata rappresenta la temperatura media annua della serie intera ($7,9\text{ }^{\circ}\text{C}$).

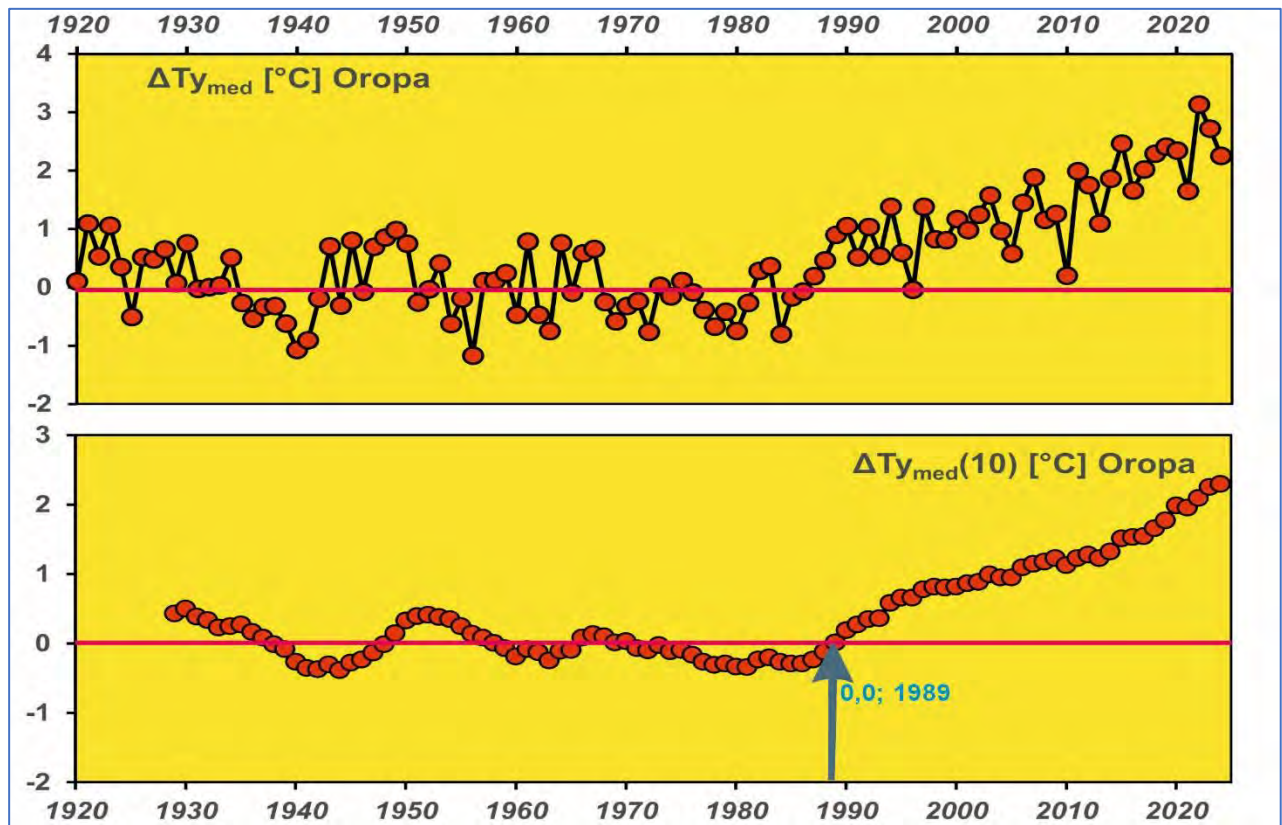


Oropa. Successioni cronologiche delle temperature [$^{\circ}\text{C}$] medie annue " $T_{y_{med}}$ " e delle relative medie mobili con equiperiodo di 10 anni " $T_{y_{med}(10)}$ ". È indicata, con **linea rossa**, la **temperatura media annua dell'intera serie 1920 - 2025** (106 anni; **$7,9\text{ }^{\circ}\text{C}$**), mentre la linea rossa inferiore indica la media annua della serie precedente 1920 - 1989 (73 anni; $7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Si osserva che a partire dal 1994 tutte le medie mobili sono risultate superiori alla media dell'intera serie ($7,9\text{ }^{\circ}\text{C}$). Si considera il periodo con valori delle medie mobili superiori alla media della serie precedente il 1994 (1920 - 1993, 74 anni; $7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) che consideriamo come una sorta di periodo di riferimento.

Nelle due figure successive sono riportate le successioni cronologiche normali delle medie annue " $\Delta T_{y_{med}}$ " e con equiperiodi di 10 anni " $\Delta T_{y_{med}(10)}$ " degli scostamenti delle stesse temperature [$^{\circ}\text{C}$] medie annue rispetto alla media di riferimento della serie 1920 - 1993 sopra determinata ($7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Dal 1989, con $\Delta T_{y_{med}}(10) = -0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$, al 2024, con $\Delta T_{y_{med}}(10) = +2,2 \text{ } ^\circ\text{C}$, risulta un incremento di $+2,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ in 34 anni, quindi con rapporto pari a **$+0,063 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{anno}$** .



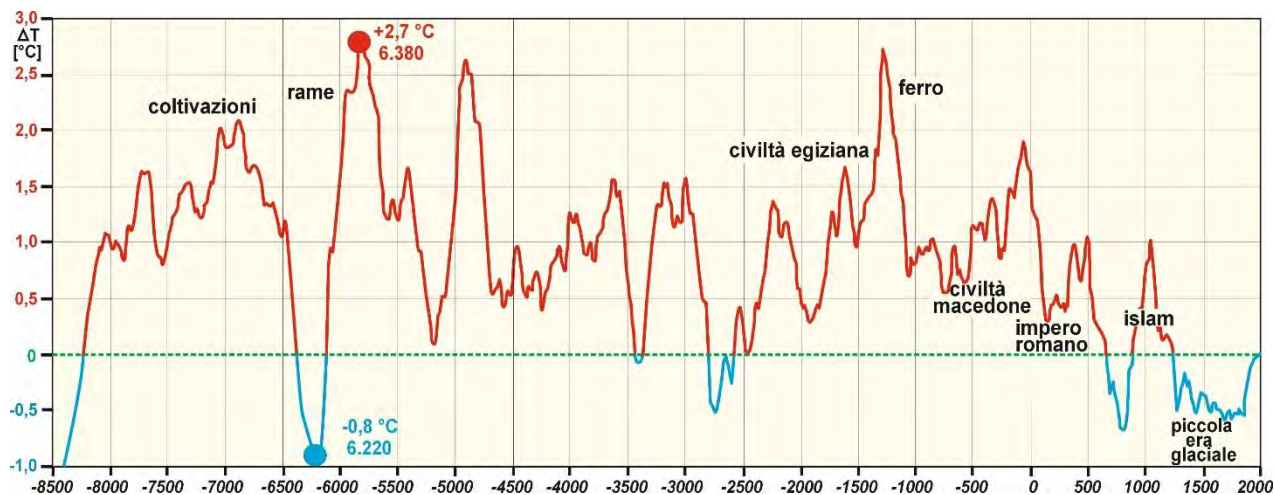
Oropa. Successioni cronologiche degli scostamenti delle temperature [°C] medie annue “ $\Delta T_{y_{med}}$ ” e delle relative medie mobili con equiperiodo di 10 anni “ $\Delta T_{y_{med}}(10)$ ”. A partire dal 1989 risulta un incremento continuo delle medie decennali, fino all’ultimo valore (1916 - 2025) pari a $+2,2 \text{ } ^\circ\text{C}$, risultato di un **incremento di oltre $0,06 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{anno}$** .

In sintesi, se per **Torino** (importante metropoli dell’alta pianura piemontese, intorno a 200 m s.l.m.), negli ultimi decenni, risulta un incremento delle temperature medie annue pari a quasi **$0,05 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{anno}$** . Nella località montana **Oropa** (quasi 1.300 m s.l.m. e senza condizionamenti climatici locali di origine antropica) si registra un incremento superiore, pari a poco più di **$0,06 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{anno}$** . **Questi due dati sono molto importanti per quanto verrà illustrato nel seguito.**

3 - Ricostruzione del clima del passato storico (fino a 12.000 anni fa)

Il diagramma sotto riportato descrive la successione cronologica degli scostamenti delle temperature medie annue del pianeta “ ΔT ” [°C] rispetto a quella di riferimento 1851 - 1900, dalla situazione attuale andando indietro nel tempo fino alla fine dell’ultima grande glaciazione quaternaria; in sostanza viene considerato il periodo degli ultimi 12.000 anni, caratterizzato dallo sviluppo delle civiltà umane.

Il momento più caldo in epoca storica è risultato quello intorno al 6.000 prima di Cristo: ben $+2,7 \text{ } ^\circ\text{C}$ rispetto alla serie di riferimento, quindi decisamente superiore rispetto a quanto sta accadendo attualmente. Questo aspetto rientra nella “normale” variabilità climatica che caratterizza la storia recente della Terra, ma ciò che veramente merita di essere evidenziato è la rapidità degli attuali mutamenti che non ha riscontri nel passato storico e neppure in quello geologico recente.



Fra le numerose ricostruzioni dell'evoluzione del clima globale dell'epoca post-glaciale che stiamo vivendo, una delle più interessanti riguarda la relazione tra l'alternanza di cicli caldi/freddi e lo sviluppo delle civiltà condotto negli USA da ALLEY R.B. (2004). Tra gli eventi più conosciuti e recenti sicuramente è la piccola era glaciale (1250 - 1850), preceduta dal freddo del basso Medio Evo e dalla piccola crisi climatica che ha preceduto la civiltà egiziana. Ma il picco più freddo è quello del periodo 6000 ÷ 6500 prima di Cristo, caratterizzato da una temperatura media annua globale inferiore di quasi un grado centigrado rispetto al riferimento 1851-1900 (linea tratteggiata blu): si fermò l'avanzata del mare iniziata al termine del Würm; anzi forse subì una lieve regressione. Anche per tale motivo il Reno confluiva ancora nel Po.

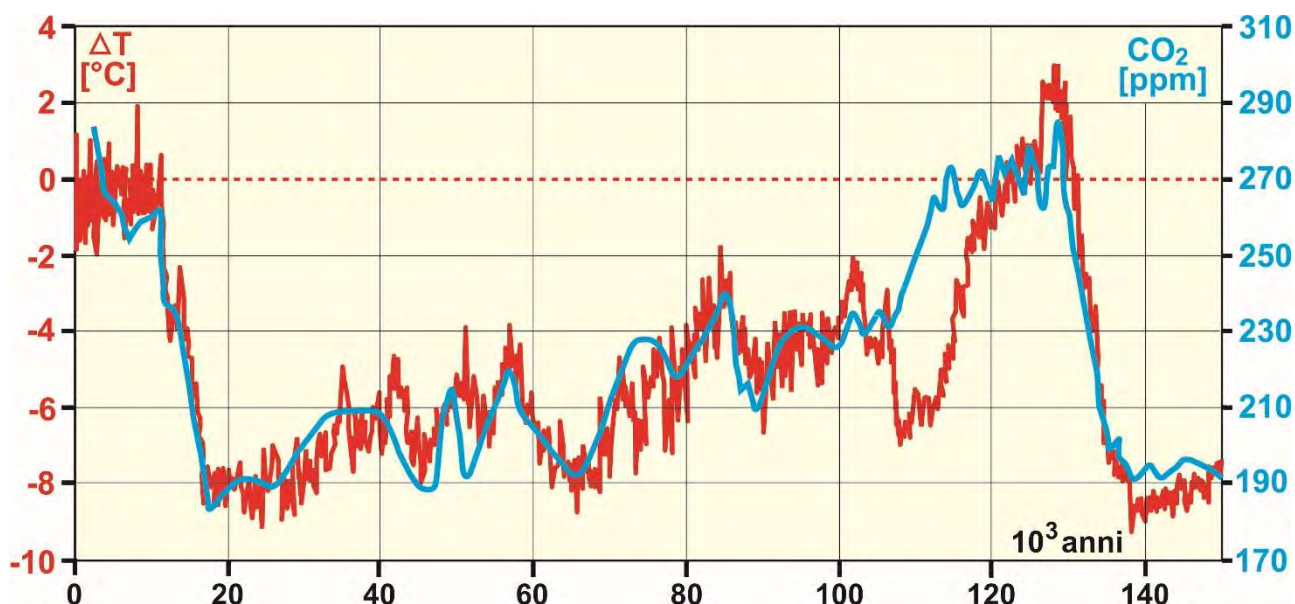
Consideriamo, esaminando il diagramma succitato, il breve periodo 6.380 - 6.220 (160 anni), ovvero dalla temperatura più bassa ($\Delta T = -0,8 \text{ °C}$) a quella più elevata ($\Delta T = +2,7 \text{ °C}$): un incremento di $3,5 \text{ °C}$ nell'intervallo di 160 anni. Risulta il rapporto $3,5/160 = +0,022 \text{ °C/anno}$. Rispetto a quanto sopra stimato per Torino ($\sim 0,05 \text{ °C/anno}$) e Oropa ($\sim 0,06 \text{ °C/anno}$) risulta che, almeno per due stazioni meteorologiche piemontesi, l'incremento della temperatura media annua degli ultimi decenni è circa 2,5 volte più veloce rispetto al riscaldamento più rapido riscontrato in epoca storica. Intorno al 6000 avanti Cristo la temperatura dell'aria media annua del pianeta aumentava di poco più di due centesimi di grado ogni anno. Allo stato attuale l'incremento sulle Alpi occidentali arriva fino a sei centesimi di grado ogni anno, almeno in corrispondenza della stazione meteorologica di Oropa a 1.280 m s.l.m.

3 - Ricostruzione del clima del passato geologico recente (fino a 800.000 anni fa)

Il diagramma successivo illustra la storia dell'ultima glaciazione quaternaria, con indicazione degli scostamenti della temperatura media annua globale " ΔT " [°C] rispetto al periodo di riferimento 1851 - 1900 e della concentrazione atmosferica [ppm] dell'anidride carbonica (CO_2).

A partire da circa 140.000 anni fa, quando la concentrazione di CO_2 era poco meno di 190 ppm, alla fine della glaciazione precedente, risulta un rapido incremento della temperatura, grosso modo da $\Delta T = -9 \text{ °C}$ a $\Delta T = +3 \text{ °C}$ 125.000 anni fa (con una concentrazione atmosferica di CO_2 pari a circa 300 ppm), quindi una escursione di 12 °C in 15.000 anni: $12/15.000 = +0,0008 \text{ °C/anno}$, ovvero un incremento di 8 millesimi di grado Celsius all'anno, decine di volte più lento di quanto sta succedendo attualmente.

A partire da 125.000 anni fa inizia un lento raffreddamento che, seppure in modo altalenante e sempre correlato alla concentrazione atmosferica di CO_2 , arriva fino al massimo del raffreddamento a circa 18.000/20.000 anni fa ($-8/9 \text{ °C}$; 180/190 ppm CO_2). Da allora, in poche migliaia di anni, vengono fusi i ghiacci che si erano lentamente accumulati durante il lento raffreddamento durato circa 100.000 anni.



Ricostruzione dell'andamento della temperatura (ΔT) dell'aria media annua globale [$^{\circ}\text{C}$] rispetto al periodo di riferimento (1851 - 1900; **linea tratteggiata rossa**) e del livello di CO_2 nell'atmosfera [ppm] sulla base delle attività di carotaggio dei ghiacci dell'Antartide. L'inizio del periodo glaciale del Würm si colloca a circa 125.000 anni fa. Si osserva una progressiva diminuzione della temperatura, insieme a quella del livello di CO_2 , fino a circa 18.000/20.000 anni fa, in coerenza con l'ipotesi dell'avanzata dei ghiacci per un periodo di poco più di 100 mila anni. Successivamente si nota un rapido incremento della temperatura fino a valori simili a quelli attuali intorno a 12.000 anni fa: nel periodo di circa 6.000 anni (18.000 \div 12.000) risulta la fusione completa (o quasi) di tutto il ghiaccio accumulato in oltre 100 mila anni.

Il diagramma successivo propone una ricostruzione che va più indietro nel tempo, fino a 400.000 anni fa. Con esso si mettono in evidenza gli andamenti degli scostamenti delle temperature medie annue globali [$^{\circ}\text{C}$] rispetto alla media del periodo di riferimento 1851 - 1900 e della concentrazione atmosferica [ppm] dell'anidride carbonica (CO_2) che, anche in questo caso, appaiono strettamente correlati.

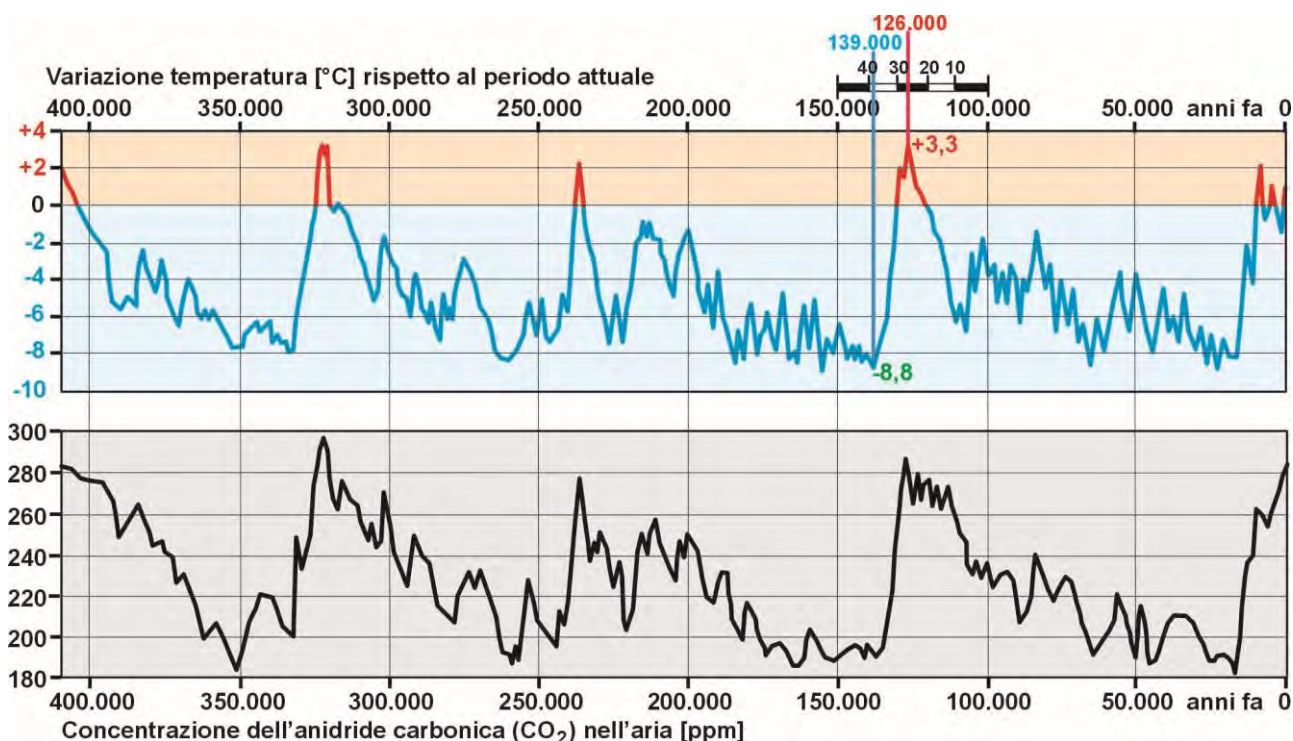
Anche con questo esempio risulta interessante evidenziare la situazione caratterizzata dal massimo riscaldamento nel tempo più breve. In particolare a partire da $\Delta T = -8,8^{\circ}\text{C}$ (~ 180 ppm di CO_2) intorno a 139.000 anni fa a $\Delta T = +3,3^{\circ}\text{C}$ (~ 290 ppm di CO_2) intorno a 126.000 anni fa. Quindi una escursione di $12,1^{\circ}\text{C}$ in 13.000 anni: $12,1/13.000 = 0,00093^{\circ}\text{C/anno}$.

Il dato appena ottenuto (~ 9 millesimi di grado Celsius di incremento all'anno) è paragonabile a quello stimato con il diagramma precedente (~ 8 millesimi di grado Celsius all'anno). Si tratta di valori che risultano decine di volte inferiori a quelli sopra valutati per Torino e Oropa.

Tali valutazioni si riferiscono allo stesso evento climatico, ovvero il rapido riscaldamento che ha preceduto l'ultima glaciazione ed è interessante osservare che si giunti a valori che appartengono allo stesso ordine di grandezza (millesimi) a partire da due diverse ricostruzioni del passato climatico.

Con questo ultimo diagramma risulta una ricostruzione che va più indietro nel tempo, a dimostrazione che, nell'ambito dei cicli climatici, altri periodi caratterizzati da riscaldamento presentano incrementi della temperatura "molto" più lenti di quelli appena descritti.

Infine, sulla base dell'osservazione degli ultimi due diagrammi, la concentrazione atmosferica di CO_2 si mantiene sempre entro l'intervallo 180-300 ppm.



Temperatura atmosferica terrestre espressa come variazione positiva (+) e negativa (-) rispetto a quella di riferimento 1851 - 1900 e concentrazione atmosferica dell'anidride carbonica (CO₂) negli ultimi 400.000 anni. I due andamenti sono strettamente correlati. Essi derivano dalle informazioni dedotte dalle carote di ghiaccio estratte a Vostok, in Antartide.

4 - Successioni cronologiche dei valori medi annui globali della temperatura dell'aria e della concentrazione atmosferica della CO₂ (indietro nel tempo fino al 1850)

I metodi di indagine climatica (paleo-climatica o archeo-climatica) illustrati precedentemente, nel loro insieme, hanno fornito un numero elevato di dati che, integrati tra loro, hanno permesso di stimare, con buona risoluzione le successioni cronologiche delle temperature medie annue globali [°C] e delle concentrazioni atmosferiche [ppm] dell'anidride carbonica (CO₂, il più abbondante gas clima-alterante) andando indietro nel tempo fino al 1951, ovvero l'anno di inizio del periodo di riferimento individuato dall'IPCC.

Determinazione della temperatura media "Ty_{med}" [°C]: processo complesso che trasforma milioni di singole misure locali in un unico valore statistico relativo all'intero pianeta.

Il calcolo non è una semplice media aritmetica; i termometri non sono distribuiti in modo omogeneo (molti sono in Europa e pochi nei deserti o sugli oceani). Gli scienziati utilizzano migliaia di stazioni meteorologiche terrestri, boe oceaniche, navi e, dagli anni Settanta, i satelliti. Dalla seconda metà dell'Ottocento abbiamo dati termometrici affidabili e globali.

Per quanto riguarda le epoche precedenti, le misure sono scarse in molte parti del mondo per determinare una media globale accurata. Più a ritroso occorre fare riferimento ai metodi di indagine sopra illustrati, comunque significativamente attendibili almeno fino a 800.000 anni fa. Più indietro nel tempo (milioni di anni) si fa riferimento alla paleoclimatologia per ottenere indicazioni di carattere generale.

Determinazione della concentrazione atmosferica media annua dell'anidride carbonica "CO₂" [ppm]. A differenza della temperatura, molto variabile da un luogo all'altro, questo gas si mescola bene nell'atmosfera, rendendo il dato globale molto rappresentativo.

Attualmente le misure si effettuano grazie ad una rete globale coordinata dalla NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration del Dipartimento del Commercio degli USA) e dalla WMO (Organizzazione Meteorologica Mondiale).

I dati principali provengono da stazioni isolate, lontane da foreste o città, per evitare l'influenza di emissioni locali o dell'assorbimento/emissione stagionale delle piante. I campioni d'aria vengono analizzati mediante spettroscopia a infrarossi che fornisce risultati espressi in parti per milione [ppm]. Per ottenere la media annua globale, si raccolgono i dati da circa 100 stazioni marittime e terrestri. Si applicano algoritmi che filtrano le variazioni stagionali (il "respiro" della Terra: la CO₂ cala in estate quando le piante crescono) per isolare la tendenza reale di fondo.

I dati derivanti da misure dirette sono disponibili a partire da fine anni Cinquanta. Più a ritroso nel tempo occorre fare riferimento ai metodi di indagine sopra illustrati, comunque significativamente attendibili almeno fino a 800.000 anni fa. Ancora più indietro nel tempo occorre applicare i metodi della geologia.

Mentre la concentrazione di CO₂ si misura analizzando l'aria, le **emissioni antropiche** non si misurano con un termometro o un sensore, ma si "contabilizzano".

Si raccolgono dati statistici mondiali su quanto carbone, petrolio e gas naturale viene estratto, venduto e bruciato. La produzione di cemento è una fonte enorme di CO₂ legata alla reazione chimica (calcinazione) del calcare; le industrie riportano le tonnellate prodotte, da cui si ricava la CO₂ emessa. Altra fonte è connessa con l'uso del suolo, difficile da stimare; si usano i satelliti per monitorare la deforestazione e l'espansione agricola, sottraendo quanto carbonio viene riassorbito dalle nuove foreste.

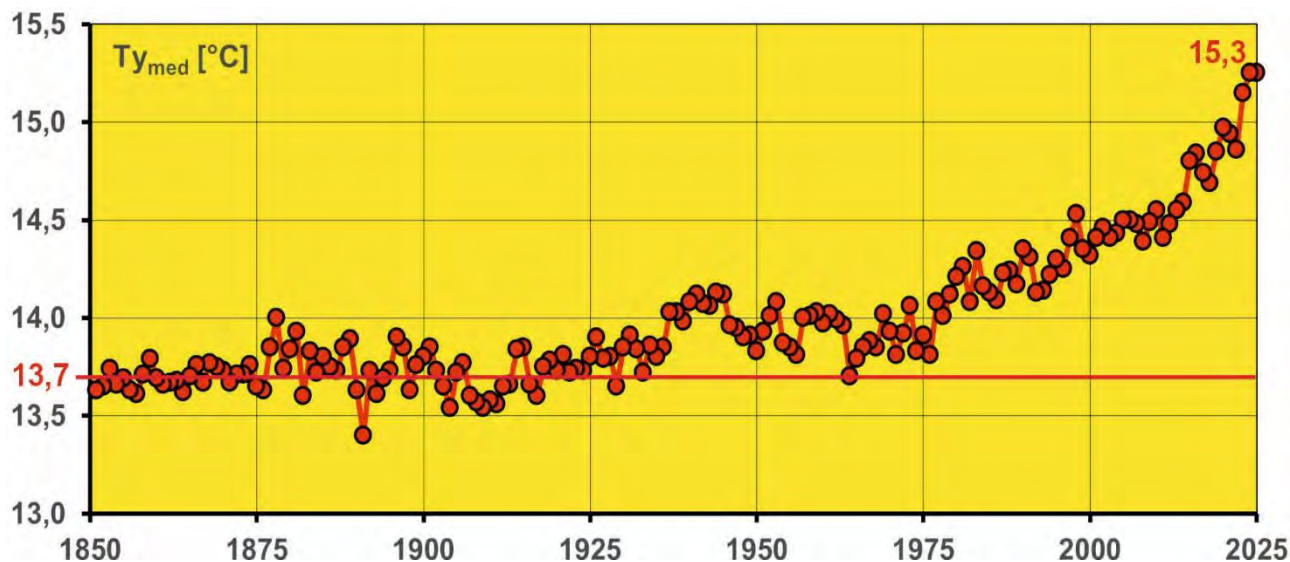
Il Global Carbon Project e la IAE (Agenzia Internazionale dell'Energia) aggregano questi dati ogni anno per fornire il **totale annuo globale**, espresso in miliardi di tonnellate [Gt].

I dati disponibili dagli anni Cinquanta ad oggi sono molto precisi. Sappiamo quanto carburante è stato consumato globalmente grazie ai registri doganali e industriali moderni.

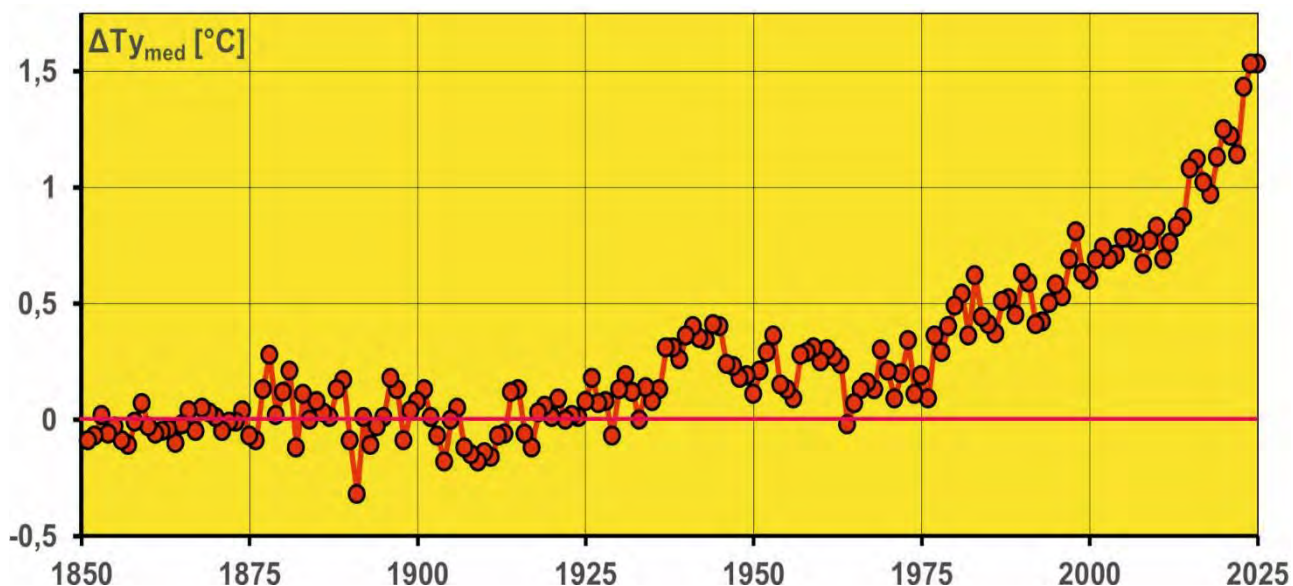
Per quanto riguarda i tempi precedenti si può risalire fino all'inizio dell'era industriale (metà Settecento). I ricercatori utilizzano i registri storici della produzione di carbone in Inghilterra e, successivamente, degli altri paesi industriali. Sebbene meno precisi dei dati odierni, questi inventari storici permettono di tracciare una curva sufficientemente chiara dell'aumento esponenziale delle emissioni. Prima del 1750, le emissioni di origine umana erano praticamente trascurabili (legate solo a piccoli incendi o agricoltura primitiva).

Il diagramma successivo riporta la successione cronologica delle temperature [°C] medie annue globali ($T_{y_{med}}$) confrontate con la media (13,7 °C) del **periodo di riferimento 1851 - 1900**. Risulta un evidente incremento dalla fine degli anni Settanta del secolo scorso, per diventare ancora più rapido nel terzo millennio fino ai valori di temperature superiori a 15 °C negli ultimi tre anni: 15,15 °C nell'anno 2023, 15,25 °C nel 2024 e 15,10 °C nel 2025.

Il diagramma successivo riporta gli scostamenti ($\Delta T_{y_{med}}$) delle temperature medie annue rispetto alla media di riferimento 1851 - 1900 (13,7 °C). Anche dall'esame di questo diagramma risulta l'elevato incremento delle temperature globali. Come sopra illustrato, con la **Conferenza Internazionale sul Clima di Parigi (COP 2015)**, quando la temperatura media annua globale era 14,8 °C (con una concentrazione atmosferica di CO₂ pari al valore già elevato di circa 400 ppm), **si era stabilita la necessità fondamentale di limitare l'aumento a 1,5 °C**, soprattutto attraverso una significativa riduzione delle emissioni dei gas-serra. Purtroppo tale limite è stato superato nel 2024 (+1,60 °C) e sfiorato nel 2023 (+ 1,48 °C) e nel 2025 (+ 1,47 °C).



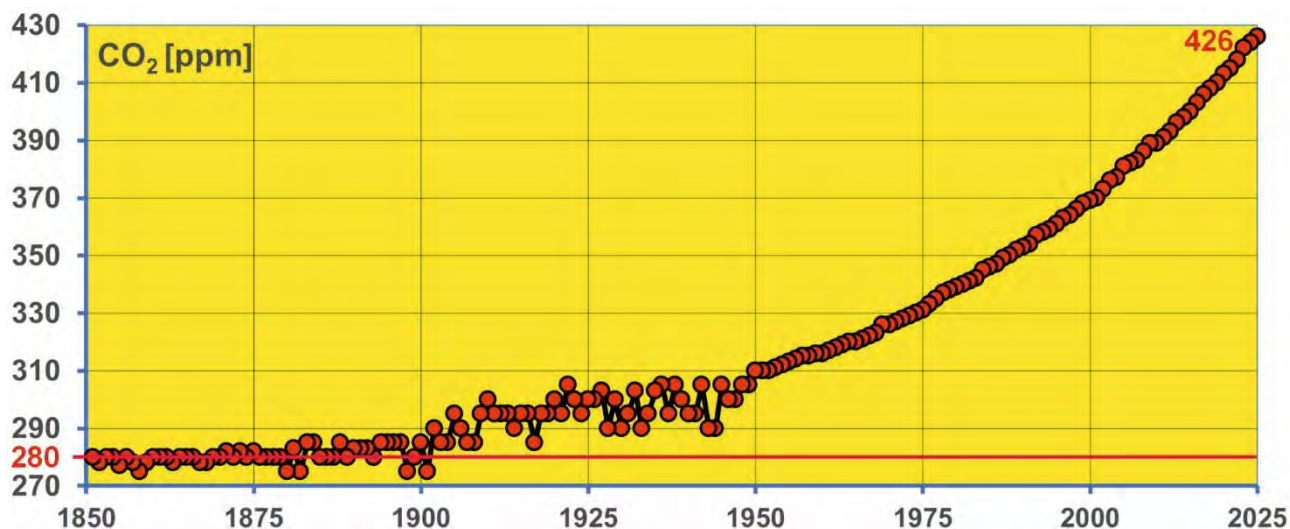
Successine cronologica delle temperature medie annue globali “ $T_{y_{med}}$ ” [°C] rispetto al valore di **13,7 °C** relativo al periodo di riferimento 1851-1900 (linea retta).



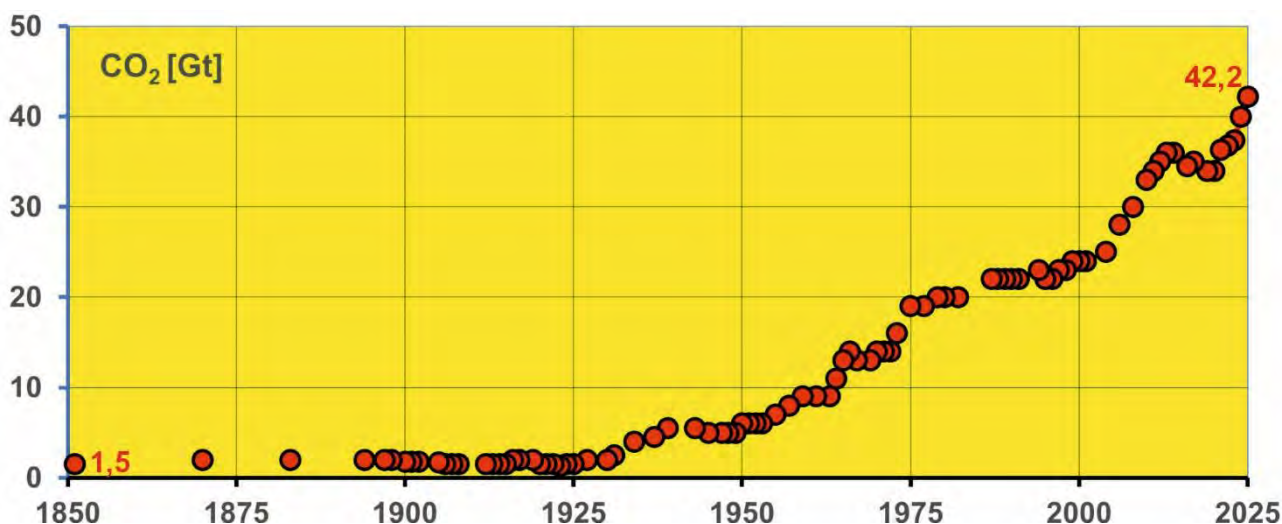
Successine cronologica degli scostamenti delle temperature medie annue globali annuali globali “ $\Delta T_{y_{med}}$ ” [°C] rispetto al valore di **13,7 °C** relativo al periodo di riferimento 1851 - 1900 (linea retta in corrispondenza dello “0”).

La temperatura media annua globale relativa all’ultimo triennio (2022 - 2025) è dunque poco oltre l’incremento di 1,5 °C rispetto al periodo di riferimento, mentre per le due stazioni meteorologiche piemontesi, come sopra illustrato, risulta ben superiore ($\Delta T = + 3,0$ °C per Torino e $\Delta T = + 2,2$ °C per Oropa). Ciò è dovuto al fatto che il dato globale è il risultato di una elaborazione complessa delle misure effettuate presso numerosissime stazioni in varie parti del globo interessate da incrementi termici assai variabili. In alcune aree tali incrementi risultano più elevati (talora anche di molto) rispetto alla situazione globale. In generale le temperature sono aumentate in misura maggiore nelle zone temperate ed in modo particolarmente accentuato in alcune aree, definite **hotspot climatici** come, per esempio, il bacino del Mediterraneo e ancor più la catena alpina.

Come noto la presenza di gas ad effetto serra determina la temperatura del globo ed è proprio l’elevata concentrazione di tali gas a determinare quella che è stata chiamata la “*febbre del pianeta*”. Ma quanto vale la concentrazione atmosferica della CO₂ (il principale gas-serra) e quanta ne viene emessa in conseguenza delle attività antropiche? Gli ultimi due diagrammi del presente rapporto illustrano le successioni cronologiche di queste due grandezze dal 1851 al 2025.



Successione cronologica dei valori annui della **concentrazione [ppm] atmosferica di anidride carbonica (CO₂)** dal 1851 al 2025. **La linea rossa indica la concentrazione (280 ppm)** rappresentativa del **periodo di riferimento** 1851 - 1900. Nel **2025** si è raggiunto il valore massimo di **426 pp**.



Successione cronologica dei totali annui delle **emissioni in miliardi di tonnellate [Gt] di anidride carbonica (CO₂)** dal 1851 al 2025 dovute alle attività antropiche. Fino ai primi decenni del Novecento i totali annui delle emissioni erano inferiori a 2 Gt. Nel **2025** si è raggiunto il valore massimo di oltre **40 Gt**.

Per tutto l'Ottocento la concentrazione atmosferica di CO₂ si è mantenuta entro i 289/290 ppm. Nella prima metà del Novecento risulta una certa variabilità interannuale, ma con prima evidenza all'incremento. A partire dal 1950 l'incremento risulta netto e continuo, fino ad arrivare al valore di ben 426 ppm., ovvero una volta e mezza il valore relativo al periodo di riferimento. Questo è il risultato dell'incremento continuo delle emissioni, quando queste avrebbero dovuto diminuire in seguito agli accordi internazionali per contrastare i cambiamenti climatici. In sintesi risulta quanto segue:

	1851 - 1900 (riferimento)	2025 (fase attuale)
Temperatura media annua globale [°C]	13,7	15,20 (+1,5)
Concentrazione atmosferica CO₂ globale [ppm]	280/290	426 (+ 49 %)
Totale annuo delle emissioni CO₂ [Gt]	1,5 - 2	42,2 (per 23,4)

Nel passato geologico recente (cfr. diagrammi sopra proposti) la concentrazione atmosferica della CO₂ non ha mai superato il valore di 300 ppm, quando la temperatura media annua era superiore di

2/3 °C rispetto al periodo di riferimento. A questo punto è probabile che l'attuale temperatura media annua globale debba ancora aumentare per "adeguarsi" (come in una sorta di "volano climatico") ad una situazione caratterizzata da una concentrazione di CO₂ già ben oltre i 400 ppm. Se poi consideriamo che le emissioni dovute alle attività antropiche continuano ad aumentare allora diventa inevitabile prevedere scenari drammatici per il futuro, ormai molto vicino. Tale impostazione non è una espressione dell'ecocatastrofismo o dell'ambientalismo talebano o di un atteggiamento radical-chic, ma è la realtà così come inevitabilmente presentata dalla ricerca scientifica. A tutto ciò occorre aggiungere gli effetti del **feedback climatico positivo** (retroazione positiva).

5 - Feedback climatico

Uno dei caratteri principali di un sistema complesso è la sua "resistenza" rispetto ai mutamenti. Esso tende naturalmente a mantenersi costante nel tempo. Quando interviene una perturbazione in grado di alterare un carattere importante del sistema, esso tende a reagire con meccanismi atti a minimizzare/annullare le cause della perturbazione stessa. Questo meccanismo viene detto **feedback negativo** o retroazione negativa. Ma se il sistema è debole, a causa di situazioni stressanti che lo hanno indebolito, può manifestarsi una retroazione positiva: il sistema reagisce con meccanismi che facilitano le cause della perturbazione, con conseguente accelerazione (che può diventare addirittura esponenziale) dei processi di cambiamento dello stato iniziale del sistema stesso; in questo caso si parla di **feedback positivo**.

Il clima del pianeta è un sistema molto delicato e dinamico. Normalmente i cambiamenti avvengono in tempi relativamente lunghi, soprattutto se rapportati a quelli dell'uomo. Ma in questa fase sta intervenendo un forte cambiamento imposto dalle attività antropiche, ovvero il più veloce incremento di uno dei principali fattori climatici probabilmente mai riscontrato nella storia geologica recente della Terra (e probabilmente in tutta la sua storia): l'effetto serra dovuto alla CO₂ in atmosfera. Si tratta di una situazione del tutto inedita nella storia evolutiva del pianeta rispetto alla quale si stanno verificando reazioni che possono essere classificate come manifestazioni di un **feedback climatico positivo**: *gli effetti del riscaldamento rinforzano la principale causa accelerando il riscaldamento globale*. I meccanismi, tra i più noti, sono descritti nel seguito.

Feedback ghiaccio - albedo. Le temperature aumentano e il ghiaccio e la neve bianchi (con albedo alta, ovvero che riflettono molta luce solare) fondono. Al ghiaccio si sostituisce l'oceano scuro, con albedo molto bassa; sulle terre i ghiacciai e le nevi fondono scoprendo terra e roccia con albedo inferiore. L'oceano scuro e le terre "scoperte" assorbono più energia solare, scaldando l'acqua e i terreni e l'aria circostante, il che fa fondere ancora più ghiacci e nevi.

Feedback del gas acqua in atmosfera. L'acqua allo stato gassoso è un gas serra importante. L'aria più calda causa una maggiore evaporazione dai mari, dagli oceani e dalle terre (evapotraspirazione); inoltre l'aria più calda può trattenere maggiori quantità di acqua allo stato di gas, ma questa incrementa l'effetto serra; la temperatura aumenta, aumentando ulteriormente l'evaporazione.

Feedback della fusione del permafrost. Nelle regioni polari e in alta montagna il permafrost imprigiona enormi quantità di materia organica antica. Il riscaldamento globale scongela il permafrost. Decompositori iniziano a decomporre la materia organica, rilasciando CH₄ e CO₂, oltre a quanto già accumulato nel sedimento. Il metano è un gas serra molto più potente della CO₂; nel rilascio, insieme alla CO₂, accelera il riscaldamento globale, che a sua volta scongela altro permafrost determinando anche smottamenti, colate detritiche, frane, minacciando strade, edifici e infrastrutture e modificando la morfologia del terreno.