

CAMBIAMENTI CLIMATICI: l'aumento della temperatura e della CO₂ nell'ultimo secolo ed il loro legame a diverse scale temporali

A. Scaioli

Abstract: L'articolo scientifico in questione analizza l'aumento della temperatura e della CO₂ a diverse scale temporali, dal passato geologico a oggi. Il contesto attuale di cambiamenti climatici ha portato alla necessità di comprendere meglio questi fenomeni per prevenire conseguenze catastrofiche sul nostro pianeta.

Il lavoro si pone due domande fondamentali: la prima riguarda l'aumento della temperatura e della CO₂ su una scala temporale di 800 000 anni fa ad oggi, e su una scala temporale dal 1900 ad oggi. La seconda domanda riguarda la possibile correlazione o addirittura una relazione causa-effetto tra l'andamento di queste due grandezze.

I risultati indicano che, a scala temporale di 800 000 anni, la temperatura e la CO₂ fluttuano attorno ad un valore medio costante, mentre, negli ultimi 100 anni, i livelli di CO₂ e temperatura sono aumentati a un ritmo senza precedenti rispetto agli ultimi due secoli.

Sulla scala geologica le emissioni e la temperatura sono correlate con un lag temporale, questo suggerisce una relazione di causa effetto, invece nell'ultimo secolo c'è una correlazione istantanea tra la funzione cumulativa di CO₂ e la temperatura.

L'articolo si conclude sottolineando l'importanza di comprendere meglio l'evoluzione della temperatura e della CO₂ per prevenire il cambiamento climatico e le sue conseguenze.

1 Introduzione

- Il seguente articolo scientifico si concentra sull'analisi di quattro diversi **dataset** per valutare le variazioni climatiche su scala di 800 000 anni e sull'ultimo secolo. I primi due dataset utilizzati sono basati sul carotaggio dei ghiacciai e la misura dell'isotopo del carbonio, provenienti dal National Centers for Environmental Information, NESDIS, NOAA, U.S. Department of Commerce.

I restanti due dataset, invece, riguardano il clima sull'ultimo secolo: quello relativo alle temperature utilizza le misurazioni di diverse stazioni meteorologiche interpolate da due ricercatori dell'Università del Delaware, mentre quello sui gas serra è stato acquisito dal Global Carbon Project.

- Il presente articolo si focalizza sull'analisi di due principali **domande** di ricerca: la prima riguarda l'aumento della temperatura e della concentrazione di anidride carbonica (CO₂) su diverse scale temporali. Si investiga se, a seconda della scala temporale considerata, il comportamento di queste grandezze presenti differenze e se le fluttuazioni riscontrate sono da attribuirsi a una variazione statistica o se, invece, si riscontra un effettivo cambio di trend. Inoltre, si indaga se esistano differenze significative in base alla scala temporale considerata. La seconda domanda di ricerca invece analizza la relazione tra le due grandezze CO₂ e temperatura su differenti scale temporali. Si cerca di valutare se tali grandezze sono correlate tra di loro e se esista un rapporto di causa-effetto tra le stesse.

- I **risultati** dell'analisi condotta hanno portato ad importanti conclusioni. In particolare, sull'arco temporale di 800 000 anni, non sono stati rilevati significativi aumenti nella temperatura né nella concentrazione di CO₂, le quali si sono mantenute attorno ad un valore medio. Tuttavia, considerando la scala temporale dell'ultimo secolo, si è osservato un'inversione di trend della temperatura, passando da costante a lineare o super-lineare, mentre le emissioni di CO₂ sono aumentate rapidamente dal medesimo periodo in poi. Tali

risultati sono stati ottenuti attraverso l'analisi delle distribuzioni di CO₂ e temperatura con t-test e p-value e l'analisi delle variazioni delle loro fluttuazioni, che, quando avvengono, possono indicare un effettivo cambio di trend.

L'analisi condotta ha anche dimostrato la presenza di una significativa correlazione tra la temperatura e la CO₂, evidenziata da coefficienti di correlazione positivi, distribuzioni dei dati e t-test. È stato possibile osservare che il sistema che descrive l'andamento della CO₂ e della temperatura sembra essere stato perturbato intorno al 1940, causando un aumento delle emissioni di CO₂ e un'inversione del trend della temperatura.

- I risultati dell'analisi hanno permesso di esplorare l'eventuale presenza di un rapporto di **causa-effetto** tra la CO₂ e la temperatura. È stato possibile osservare che sul periodo di 800 000 anni, le due serie temporali risultano maggiormente correlate con un lag temporale di 4000 anni. Tuttavia, sulla scala dell'ultimo secolo, è stata individuata una correlazione istantanea tra la funzione cumulativa della CO₂ e la temperatura, oppure tra la derivata della temperatura e le emissioni di CO₂. Questi risultati saranno oggetto di discussione nelle conclusioni, al fine di interpretare tali risultati e individuare eventuali scenari futuri.

2 Metodi

Sulla scala degli 800 000 anni, per studiare l'andamento della temperatura e della CO₂, è stato utilizzato un metodo basato sull'analisi delle variazioni di temperatura sottraendo la media. In particolare, sono stati creati due modelli nulli in cui si ipotizza che i dati si distribuiscano casualmente attorno allo zero. Questi modelli nulli sono supportati dal teorema del limite centrale e la legge dei grandi numeri grazie ai quali è stato possibile eseguire il calcolo dei t-test e dei p-value. I risultati hanno mostrato che i modelli nulli sono compatibili

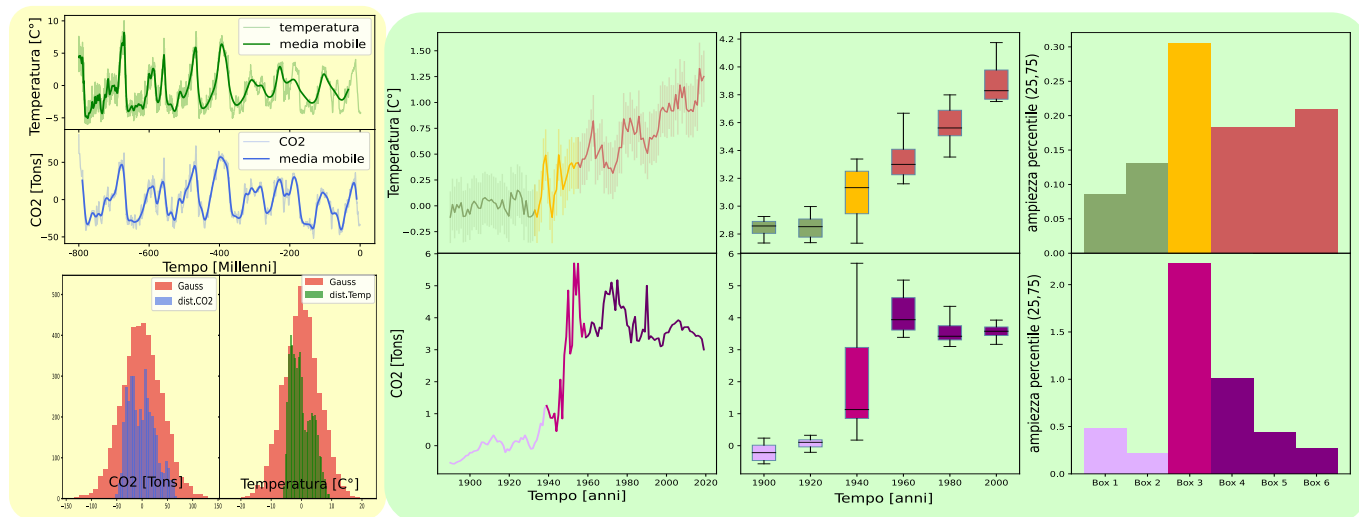


Fig. 1: la parte gialla fa riferimento allo studio della serie temporale geologica, la parte verde di quella secolare.

GIALLA: In alto c'è un'immagine delle variazioni di emissioni di CO2 e Temperatura, mentre in basso ci sono 2 modelli nulli positivi tra gaussiana e distribuzione.

VERDE: La prima riga mostra andamento, distribuzioni dei dati ogni venti anni, ed evoluzione delle fluttuazioni della temperatura. La seconda riga mostra lo stesso percorso ma con le emissioni di CO2.

con le distribuzioni dei dati, è quindi possibile affermare che CO2 e temperatura fluttuano attorno ad un valor medio costante e si distribuiscono in maniera gaussiana. Questo fornisce così una base solida per l'analisi successiva: $p_{CO2-Gauss} \approx 0.82$, $t_{CO2-Gauss} \approx 0.23$, $p_{Temp-Gauss} \approx 0.89$, $t_{Temp-Gauss} \approx 0.14$. Questo procedimento è stato ripetuto per le distribuzioni su scala temporale di un secolo con la differenza che il dataset della temperatura era mensile, quindi prima si è ottenuta una media annuale della temperatura e poi si è calcolata la variazione di temperatura sottraendo così da ottenere i seguenti risultati: $p_{CO2-Gauss} \approx 0$, $t_{CO2-Gauss} \approx -9.35$, $p_{Temp-Gauss} \approx 0$, $t_{Temp-Gauss} \approx -9.03$.

I modelli nulli sono negativi, ciò significa che c'è un'anomalia nella distribuzione dei dati.

Parallelamente a questi modelli nulli, per avere un altro tipo di analisi sulla scala dell'ultimo secolo, che sembra avere un'inversione di trend, si sono studiati, tramite boxplot, le distribuzioni dei dati ogni ventennio così da chiarire il comportamento del sistema e osservarne le fluttuazioni. Si nota, per esempio, che sia CO2 che temperatura intorno al 1940 mostrano un aumento delle fluttuazioni e fanno pensare ad una perturbazione del sistema.

Per la temperatura le fluttuazioni a seguito del 1940 calano ma sono leggermente più alte di quelle iniziali (da 0.1 a 0.19), ciò è coerente con un'inversione del trend e la comparsa di un termine di drift. Per la CO2 invece le fluttuazioni dei box 1,2,5,6 hanno circa lo stesso valore 0.3. Ciò è coerente con l'ipotesi che aumentino le emissioni nel 1940 e da lì in poi siano costanti attorno ad un'altra media.

Per indagare le correlazioni e un eventuale causa-effetto tra CO2 e temperatura si è calcolato il p-value e il t-test tra le distribuzioni di CO2 e temperatura su entrambe le scale, per la scala di 800 000 anni si sono ottenuti: $p_{CO2-Temp} \approx 1$, $t_{CO2-Gauss} \approx 0$, mentre per la scala che va dal 1900 ad ora: $p_{CO2-Temp} \approx 0.90$, $t_{CO2-Temp} \approx 0.14$.

È importante specificare che su scala secolare le distribuzioni che si sono confrontate sono la derivata della temperatura con media mobile ogni 25 anni in modo da smorzare le forti fluttuazioni della temperatura e far emergere la variazione di trend.

In aggiunta si è calcolato il coefficiente di correlazione di Pearson tra le variazioni di temperatura. Per fare ciò si è prima fatta una interpolazione dei dati per poter calcolare una cross-correlation in modo da indagare eventuali lag temporali che vanno a supportare un'inferenza causale di una grandezza rispetto ad un'altra. In seguito si è calcolata la correlazione.

Nella scala di 800 000 anni si trova una massima correlazione per un lag temporale di circa 4000 anni, mentre sull'altra scala non c'è lag temporale.

I coefficienti di Pearson tra CO2 e temperatura su scala geologica è $C_{Pearson} = 0.80$ e $\chi^2 = 6.9$, mentre su scala secolare si è studiata la correlazione tra cumulativa delle emissioni di CO2 e temperatura e si è ottenuto: $C_{Pearson} = 0.94$ e $\chi^2 = 0.28$.

3 Risultati

1. La temperatura e le emissioni di CO2 fluttuano in modo costante su scala geologica: come si vede immediatamente dal grafico in fig. 1. Questo statement viene supportato anche dai valori dei t-test e dei p-value ottenuti dai modelli nulli citati nei metodi.

2. La temperatura e le emissioni di CO2 aumentano su scala secolare: come si vede immediatamente in fig. 1. Anche in questo caso i modelli nulli, questa volta però negativi, ci permettono di affermare che i dati non si distribuiscono in modo casuale. Inoltre l'aumento delle fluttuazioni è spesso collegato ad un cambio di trend.

3. Temperatura e emissioni di CO2 sono grandezze correlate su scale geologiche con un lag di circa 4000 anni e con una probabile relazione di causa-effetto: come mostrato in fig. 2 tramite la cross-correlation abbiamo calcolato il lag temporale che suggerisce ci sia una relazione di causa-effetto grazie al quale è stato possibile correlare i dati e ottenere $C_{Pearson} = 0.80$, inoltre anche le distribuzioni dei dati restituiscono $p_{CO2-Temp} \approx 1$, $t_{CO2-Gauss} \approx 0$.

4. C'è una correlazione tra le emissioni di CO2 e la temperatura su scala secolare: come mostrato in fig. 2 si è osservato che la funzione cumulativa delle emissioni di CO2 è istantaneamente correlata alla temperatura ($C_{Pearson} = 0.94$ e $\chi^2 = 0.28$), e viceversa, la derivata della temperatura si distribuisce in modo simile alle emissioni di CO2 ($p_{CO2-Temp} \approx 0.90$, $t_{CO2-Temp} \approx 0.14$). Questi risultati indicano una forte correlazione tra le due grandezze sulla scala secolare.

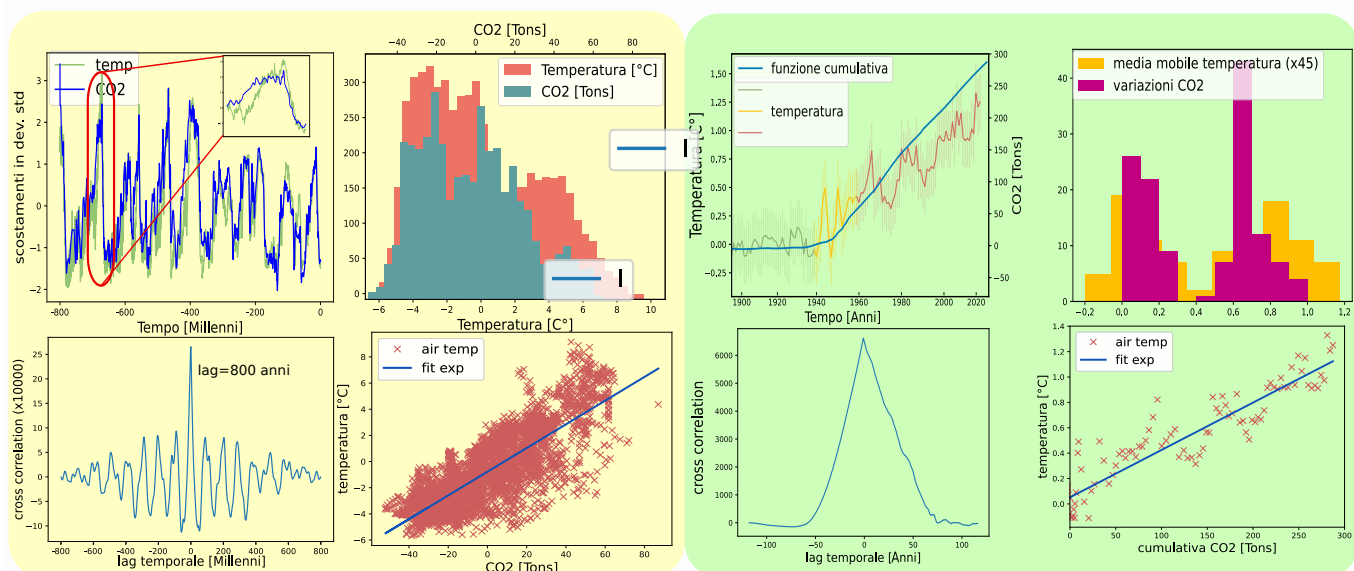


Fig. 2: La parte gialla fa riferimento allo studio della serie temporale geologica, la parte verde di quella secolare.
GIALLA: In alto c'è un'immagine delle variazioni di emissioni di CO2 e Temperatura normalizzate dove viene evidenziato il lag temporale, a fianco c'è un istogramma con le distribuzioni di CO2 e Temperatura. Nella seconda riga ci sono il grafico con la cross-correlation e il grafico di correlazione lineare con anche la regressione.
VERDE: Nel primo riquadro in alto a sinistra è mostrata la forte correlazione tra funzione cumulativa delle emissioni di CO2 e temperatura, a fianco sono mostrate le distribuzioni della derivata della temperatura e le emissioni di CO2 con gli istogrammi. Analogamente al giallo anche qui nella seconda riga ci sono la cross-correlation e la correlazione e regressione lineare.

4 Conclusione

Dai quattro statement che abbiamo analizzato, è possibile trarre importanti informazioni sui cambiamenti climatici e formulare alcune interpretazioni riguardo alle correlazioni osservate. Il confronto tra due grandezze su scale temporali diverse ci consente di valutare le fluttuazioni di una grandezza rispetto all'altra in modo tale da poter fare dei paragoni. Su scala geologica, le fluttuazioni della CO2 influenzano quelle della temperatura con un certo ritardo temporale. È ragionevole pensare che, su scale geologiche, la CO2 non aumenti a causa dell'equilibrio naturale del sistema che riassorbe la CO2 emessa e per questo il sistema è all'equilibrio.

Dopo il 1940, molti paesi hanno iniziato a produrre CO2, le emissioni sono iniziate ad aumentare e ad accumularsi nel tempo, come suggerisce la correlazione con la funzione cumulativa.

Inoltre, notando che la funzione cumulativa è l'integrale della CO2, che è correlata alla temperatura, e che la derivata della temperatura è correlata alla CO2, si potrebbe ipotizzare un sistema dinamico del tipo $T(CO2) = f[\frac{dT(t)}{dt}] + g(t)$, ma questa ipotesi richiede ulteriori verifiche.

'f' e 'g' sono funzioni ancora sconosciute da determinare tramite l'analisi dei dati e la modellizzazione del sistema dinamico. Inoltre, è importante tenere presente che una correlazione tra due grandezze non implica necessariamente una relazione causale tra di esse. Prima di fare qualsiasi inferenza causale, occorre effettuare ulteriori analisi e considerare anche altri fattori che possono influenzare il sistema.

5 Appendice

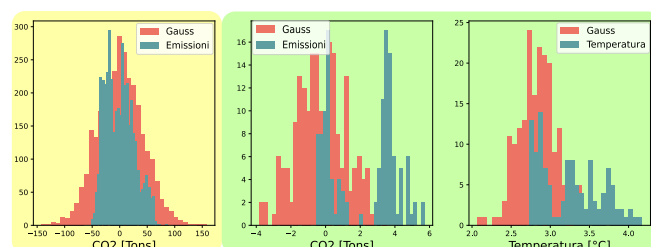


Fig. 3: la parte gialla fa riferimento allo studio della serie temporale geologica, la parte verde di quella secolare.

GIALLA: Istogramma delle emissioni di CO2 e modello nullo non positivo.

VERDE: Istogrammi di emissioni di CO2 e temperatura con modelli nulli negativi a causa di anomalie sulle cose a destra.

Di seguito riportiamo i link ai dataset utilizzati:

1. Temperatura 800 000 anni: [link](#)
2. Gas serra 800 000 anni : [link](#)
3. Temperatura dal 1900 – 2020 : [link](#)
4. Gas serra dal 1900 – 2020 : [link](#)

6 Bibliografia

- 1 AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 WGI – The Physical Science Basis, WGII – Impacts, Adaptation and Vulnerability, WGIII – Mitigation of Climate Change, and the three Special Reports: Global Warming of 1.5°C, Climate Change and Land, The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.