

# Calo dell'efficacia del meccanismo di termoregolazione del sistema climatico terrestre nel ventesimo secolo

Paolo Leoni

## 1. Introduzione

Nell'ambito delle scienze climatiche, la capacità del sistema terrestre di autoregolarsi rappresenta un principio fondamentale, sottolineando la tendenza del clima a stabilizzare le variazioni di temperatura attraverso meccanismi di feedback.

Lo studio in questione si propone di indagare il meccanismo di omeostasi del sistema climatico terrestre, ovvero la predisposizione naturale alla tendenza di una relativa stabilità su diverse scale temporali. L'interesse del lavoro è svelare se il meccanismo abbia mantenuto la sua efficacia o mostri segni di indebolimento nell'ultimo secolo.

La presente indagine è svolta sulla base di tre insiemi di dati che documentano anomalie di temperatura della superficie terrestre dal recente passato fino a periodi millenari. Risulta notevole lo studio del XX secolo, condotto per approfondire come l'attività umana abbia cambiato la natura di termoregolazione del pianeta. L'analisi del sistema di autoregolazione è condotta attraverso uno studio di correlazione tra le anomalie di temperatura e quanto velocemente il sistema si riporta allo stato di equilibrio.

## 2. Dati e Metodi utilizzati

I tre dataset utilizzati documentano le anomalie di temperatura, misurate come variazioni rispetto a un periodo di riferimento, coprendo differenti archi temporali con specifiche risoluzioni. Il dataset "A" [1] riguarda il lasso di tempo dal 1850 al 2023 con risoluzione annuale; il "B" [2] si estende dal 500 al 2000, anch'esso su base annuale e il "C" [3] va da 783.000 a 7.000 anni fa, con dati ogni mille anni. Solo il dataset "A" si basa su misurazioni dirette di temperatura, mentre per gli altri si utilizzano analisi di carotaggi nel ghiaccio, suggerendo una minore precisione per i dati più antichi. È importante specificare che le anomalie sono trattate come variabili casuali e indipendenti, essendo consci del fatto che questa sia un'approssimazione.

L'autoregolazione delle anomalie di temperatura è stata analizzata tramite la correlazione tra le anomalie stesse e la loro derivata discreta destra nel tempo come indicatore di omeostasi. Questa scelta metodologica si fonda sull'idea che esista una tendenza intrinseca del sistema a ricondursi verso l'equilibrio: maggiore è la deviazione da questo stato, più marcato sarà il tentativo di ritorno ad esso nelle osservazioni future. Prima di analizzare la correlazione, è neces-

sario rimuovere i trend presenti nei dati per evitare distorsioni nell'analisi. A questo fine sono stati adottati due metodi diversi per mostrare l'importanza di questa fase di de-trend nei risultati. Il primo è un metodo adattivo che utilizza sequenze di fit lineari. Si inizia analizzando due punti del dataset aggiungendo progressivamente ulteriori punti, uno alla volta. Ogni volta che si aggiunge un punto, si calcola il p value relativo al coefficiente di determinazione  $R^2$ . Se il p value è minore di 0.05, si considera il punto corrente come l'inizio di un nuovo segmento di fit lineare, altrimenti lo si include nel fit corrente. Questo procedimento viene ripetuto per tutti i punti dati. Alla fine, si uniscono tutti i fit ottenuti e li si sottrae dal segnale originale per detrendizzarlo. Si noti che questo metodo tende a sovrastimare i trend, introducendo più rumore nel segnale detrendizzato.

Il secondo è un metodo analiticamente meno corretto, che tuttavia fornirà risultati interessanti. Si decide la lunghezza di una finestra temporale e si divide la lunghezza del segnale per questo lasso di tempo. Ottenuti n blocchi, si esegue un fit lineare per ogni blocco e si uniscono tutti i fit. In seguito questi fit vengono sottratti al segnale. La scelta della lunghezza della finestra temporale considera:

- la dimensione del segnale per evitare tagli di dati;
- la durata dei trend, per non identificare trend eccessivi o inesistenti;
- il bilanciamento tra non frammentare troppo il segnale e non sovrastimare i trend.

Sulla base di queste condizioni per i tre dataset (A, B e C) sono state scelte finestre temporali di 30, 40 e 20 anni. Dopo aver applicato entrambi i metodi, si studia la correlazione precedentemente esplicitata in base alla distribuzione di anomalie di temperatura ottenuta nei due diversi casi.

Per esplorare il comportamento omeostatico nel XX secolo è stato selezionato un periodo di 100 anni, stabilendo così la finestra temporale di interesse. Successivamente, sono state identificate tutte le finestre temporali (secoli) contigue e non sovrapposte tra loro della medesima durata presenti nel dataset. Per ogni finestra temporale individuata, è stato calcolato il coefficiente di correlazione di Pearson in base al metodo di detrend utilizzato. L'insieme dei coefficienti di Pearson ottenuti è stato poi esaminato attraverso un box plot.

### 3. Risultati

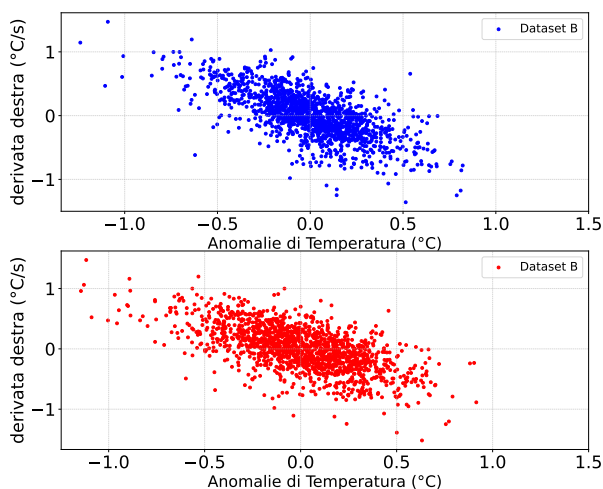
Per ogni dataset, dopo aver applicato entrambi i metodi descritti, è stata testata l'ipotesi di normalità delle distribuzioni delle anomalie di temperatura e delle derivate usando il test di Kolmogorov-Smirnov. Questo confronto è stato fatto tra le distribuzioni osservate e le corrispondenti distribuzioni normali teoriche, definite secondo il principio di massima verosimiglianza. Ne risulta che, applicando il primo metodo, i dataset B e C non superano il test di Kolmogorov-Smirnov (K-S) con un livello di significatività di 0.05. Al contrario, impiegando il secondo metodo, tutti e tre i dataset (A, B e C) superano il test di K-S mantenendo invariato il livello di significatività di 0.05. Calcolando quindi il coefficiente di Spearman nel primo caso e quello di Pearson nel secondo, si è ottenuto:

**Tabella 1:** Coefficienti di Pearson e Spearman con relativi p-values

	r Pearson	p value	r Spearman	p value
Dataset A	-0.68	0.0	-0.61	0.0
Dataset B	-0.63	0.0	-0.67	0.0
Dataset C	-0.60	0.0	-0.60	0.0

Si ribadisce che i coefficienti  $r$  di tabella 1 si riferiscono allo stesso dataset, ma detrendizzato con metodi differenti. Si osserva che la correlazione tra le variabili nei diversi dataset appare robusta rispetto a variazioni di scala e risoluzione temporale. La rilevanza di questo esito risiede nella costanza del comportamento omeostatico attraverso varie finestre temporali, sebbene possa essere condizionata dalla precisione delle misurazioni.

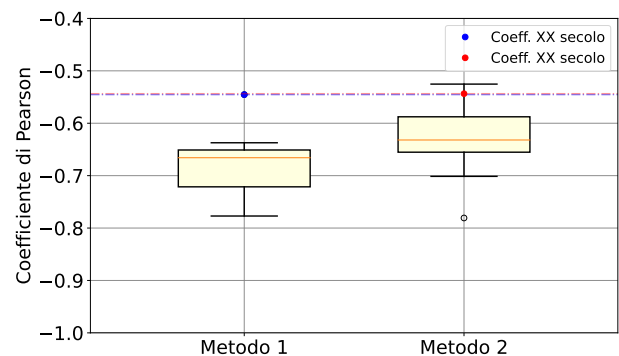
Da questo momento, si focalizza l'attenzione sul dataset B dei secoli più recenti, esaminandone il comportamento omeostatico, come precedentemente accennato. Si presentano due grafici a dispersione, rela-



**Figura 1:** Correlazione (lineare nel grafico sotto, monotona decrescente in quello sopra) tra anomalie di temperatura e derivata temporale destra

tivi al dataset B, per illustrare la correlazione tra anomalie di temperatura e loro derivata temporale destra, evidenziando così la relazione tra queste due variabili. La Figura 1, in alto, mostra i risultati del primo metodo di detrend, mentre in basso quelli del secondo metodo.

I prossimi risultati riportano il comportamento della termoregolazione nel ventesimo secolo rispetto ai secoli precedenti. Il valore di questa finestra temporale è stato scelto per poter studiare gli effetti delle attività antropogeniche. Si analizza il ventesimo secolo con il dataset B, con ambedue i metodi di detrend, confrontandolo con ogni secolo dal 500 al 1900. Risulta rilevante specificare che per questa analisi in particolare, calcolando il coefficiente di Pearson, si stanno considerando le anomalie di ciascun secolo indipendenti da quelle di tutti gli altri secoli. Questa forte approssimazione permette di trattare ogni secolo come una distribuzione indipendente, il che consente verificare se ogni secolo di dati passa il test K-S con una significatività a 0.05. E' possibile quindi calcolare il coefficiente di Pearson per ogni secolo, verificando che ogni p value sia inferiore a 0.05. Sono dunque stati creati due box plot, ognuno con i coefficienti del dataset B calcolati in base al metodo di detrend utilizzato.



**Figura 2:** Distribuzioni Coefficienti di Pearson su scale secolari, calcolati in seguito ai metodi di detrend 1 e 2

La figura 2 mostra il grafico della disposizione del coefficiente di Pearson dell'ultimo secolo rispetto alla distribuzione dei coefficienti di tutti i secoli dal 500 al 1900. Dal plot a sinistra, relativo al metodo 1, si evince che il coefficiente di Pearson in questione, che si ricorda essere l'indicatore di omeostasi per questo studio, è un outlier rispetto alla distribuzione dei coefficienti calcolati in seguito al metodo 1. Questo fatto potrebbe indicare che nell'ultimo secolo il comportamento lineare di termoregolazione del pianeta è cambiato, passando ad una correlazione lineare meno marcata rispetto ai secoli precedenti. Non è possibile tuttavia concludere che questo cambiamento rispetto ai secoli precedenti sia significativo e non dovuto al caso, a causa della piccola dimensione del campione. Utilizzando il metodo 2, il coefficiente relativo all'ultimo secolo appare come una variazione conforme alla

distribuzione generale dei coefficienti. La dimensione limitata del campione, tuttavia, preclude conclusioni definitive sulla caratterizzazione di tale valore.

La differenza nelle distribuzioni dei coefficienti osservata deriva dalle metodologie adottate per l'eliminazione dei trend: il primo approccio, propenso alla sovrastimazione dei trend, comporta una riduzione della variabilità intrinseca del segnale originale. Al contrario, il secondo metodo, incline alla sottostima dei trend, conserva le fluttuazioni iniziali del segnale a livello locale. Di conseguenza, la deviazione standard subisce una riduzione più marcata nel primo scenario rispetto al secondo, influenzando l'aumento del coefficiente di Pearson. La covarianza, presentando valori analoghi in entrambi i contesti, non influisce significativamente su tale analisi.

## 4. Simulazioni

---

In questa parte si procede all'analisi della significatività statistica del coefficiente di Pearson riferito al XX secolo, individuato come outlier nel box plot della Figura 2. L'intento è stabilire se tale dato rappresenti un'anomalia o sia attribuibile a variazioni casuali nella distribuzione dei coefficienti di Pearson per i 15 secoli compresi tra il 500 e il 2000. A tal fine, è stata effettuata una simulazione di 10000 iterazioni di un segnale della medesima lunghezza del dataset B, generando valori casuali secondo una distribuzione gaussiana con parametri di media e deviazione standard identici a quelli del dataset B, previa rimozione dei trend mediante il metodo 1. Da ciascuna simulazione si è poi estratto il coefficiente di Pearson associato agli ultimi 100 punti, a rappresentare il fenomeno omeostatico del XX secolo. Successivamente, si è adottata come statistica di confronto il calcolo della proporzione di simulazioni in cui il coefficiente di Pearson per gli ultimi 100 punti supera quello empirico, rispetto al totale delle simulazioni.

Tale procedura ha permesso di quantificare la frequenza con cui si osservano coefficienti di periodo comparabilmente estremi rispetto al dato osservato. Il p value risultante, pari a 0.44, indica che in 4400 su 10000 simulazioni si registra un coefficiente di Pearson per gli ultimi 100 anni più estremo di quello empirico, suggerendo che il dato empirico sia interpretabile come variazione aleatoria. E' importante notare che l'analisi è fortemente condizionata dalla limitata grandezza del campione considerato composto da solo 15 elementi.

## 5. Conclusioni

---

L'analisi svolta aveva come obiettivo verificare se esistesse un meccanismo di termoregolazione del sistema climatico terrestre e, una volta appurata l'esistenza, controllare se nell'ultimo secolo ci fossero evidenze della perdita di questo comportamento a causa delle attività antropogeniche.

Il risultato è che non si ha abbastanza evidenza statistica per confermare il fatto che il pianeta abbia perso questa capacità. Questo non significa che le attività umane non stiano influenzando sul clima ma piuttosto

che non è stato possibile dimostrare che tali influenze abbiano compromesso irreparabilmente i meccanismi naturali di stabilizzazione del clima.

## Riferimenti bibliografici

---

- [1] *Met Office Hadley Center observations datasets, HadCRUT.5.0.2.0.* URL: <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut5/data/HadCRUT.5.0.2.0/download.html>.
- [2] *NOAA, Paleo reconstructions.* URL: <https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/reconstructions/guillet2017/guillet2017nhtemp.txt>.
- [3] *NOAA, Paleo reconstructions.* URL: <https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/reconstructions/friedrich2016/friedrich2016temp.txt>.