

Evoluzione del clima e della biodiversità: analisi delle anomalie di temperatura su diverse scale temporali e correlazioni con le variazioni della biodiversità nel passato geologico

Francesco Farinelli

Questo report è suddiviso in due parti principali: in primo luogo si sono studiate su tre scale temporali, ovvero fino a 170 anni fa, fino a 2000 anni fa e fino a 800 mila anni fa, le anomalie delle GST (Global Surface Temperatures) della Terra per caratterizzare le recenti anomalie di temperatura; come punto successivo si è valutato su una scala temporale comune, ovvero fino a 500 milioni di anni fa, le temperature della superficie degli oceani e il numero di specie presenti sulla terra concludendo che ci sia una correlazione tra le due quantità.

Introduzione

Negli ultimi anni il cambiamento climatico è diventato un argomento centrale nel dibattito dell'opinione pubblica, e spesso ho notato che se ne parla senza una vera e propria comprensione del fenomeno. Il cambiamento climatico è un fatto naturale ed è avvenuto regolarmente nel corso della storia della Terra: questo è facilmente osservabile sia sulla scala di migliaia di anni (FIG. 2a)) che su scala di milioni di anni (FIG. 3a)): quello che voglio caratterizzare è l'aumento recente.

Quindi, il primo obiettivo che mi sono prefissato è quello di rispondere alla domanda: “La temperatura sta aumentando?” valutando con una semplice analisi statistica il recente aumento di anomalie temperatura registrato negli ultimi 50 anni e guardando il fenomeno a diverse scale temporali (fino a 800 mila anni da oggi, poi 2000 anni e infine 170 anni). Successivamente mi sono chiesto se nel passato, fino a 500 milioni di anni fa gli aumenti di temperatura fossero correlati, e in quale modo, alle estinzioni di massa e più in generale alla perdita di biodiversità sul nostro pianeta.

Origine dei dati

I dati sulle anomalie di temperatura a diversa scala temporale utilizzati nel primo punto provengono da tre diverse ricerche: i dati fino a 170 anni fa sono stati raccolti dal dataset HadCRUT5 del Met Office Hadley Centre nel Regno Unito, i dati degli ultimi 2000 anni provengono dal sesto rapporto di valutazione dell'IPCC (the Intergovernmental Panel on Climate Change), mentre i dati degli ultimi 800 mila anni vengono dal progetto *European Project for Ice Coring in Antarctica Dome C ice core*.

I dati sulle temperature degli oceani negli ultimi 500 anni utilizzati nella seconda parte sono stati raccolti dalla ricerca *Seawater Temperature and Dissolved Oxygen over the Past 500 Million Years* pubblicata sulla rivista *Journal of Earth Science*, mentre i dati sulle specie presenti sulla terra sono stati presi dalla ricerca *Cycles in fossil diversity* pubblicata su *Nature*.

Analisi dati

La temperatura sta aumentando

Come punto di partenza per studiare le anomalie degli ultimi 170 anni ho utilizzato la media mobile su un intervallo di 10 anni per visualizzare i dati in maniera ottimale, individuando un cambiamento negli ultimi 52 anni. Ho quindi effettuato la regressione lineare su questo intervallo di tempo e ne ho valutato la bontà attraverso il test del chi quadro, ottenendo un valore di chi quadro ridotto $\chi_{rid} = 0.4$, che corrisponde a un p-value $p = 1$, che è indice di un'ottima compatibilità con il modello di crescita lineare di temperatura. Ho scelto questa finestra temporale (1970-2022) perché i fit lineari con un numero maggiore di dati hanno tutti un chi quadro più alto rispetto a quello degli ultimi 52 anni.

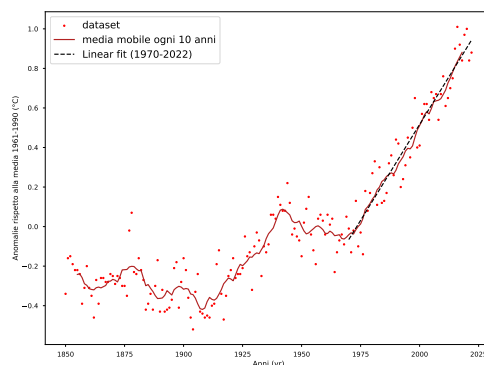


FIG. 1 In questa figura sono rappresentate le anomalie di temperatura degli ultimi 170 anni, la media mobile su 10 anni e il fit lineare degli ultimi 52 anni

Ho poi notato che sia su scala di 2000 anni che su quella di 170 anni ci sono delle fluttuazioni nelle anomalie di temperatura: questa è una caratteristica intrinseca di una serie temporale, e viene chiamata parte stocastica, o rumore. Ho quindi cercato di capire se il rumore nelle anomalie degli ultimi 2000 anni fosse interpretabile come una fluttuazione statistica. Ho valutato il rumore della serie temporale sottraendo la media mobile in ciascun punto ai dati: ho fatto questo processo fino al periodo pre-industrializzazione, quindi scegliendo come data limite il 1850, per non considerare i fattori antropici

che potrebbero causare un'anomalia aggiuntiva. Ho scelto come modello nullo per descrivere le fluttuazioni quello che prevede che esse si distribuiscano attorno a un valore medio nullo (perché ho sottratto ad ogni punto la media mobile in quel punto) secondo una distribuzione gaussiana con deviazione standard σ pari a quella del dataset del rumore. Per valutare la compatibilità delle due distribuzioni (FIG. 2d)), cioè quella sperimentale e quella simulata, ho effettuato il test di Kolmogorov-Smirnov: il valore del p-value ottenuto è $p = 0.3$, che non permette di concludere che le differenze riscontrate siano significative, e quindi che si possa considerare il rumore fino al 1850 come una fluttuazione statistica. Se invece andiamo a considerare la finestra temporale 1850-2000, otteniamo un p-value $p = 2 \cdot 10^{-3}$ che indica una non compatibilità statistica, il che ci suggerisce che ci debbano essere altri fattori che non stiamo considerando.

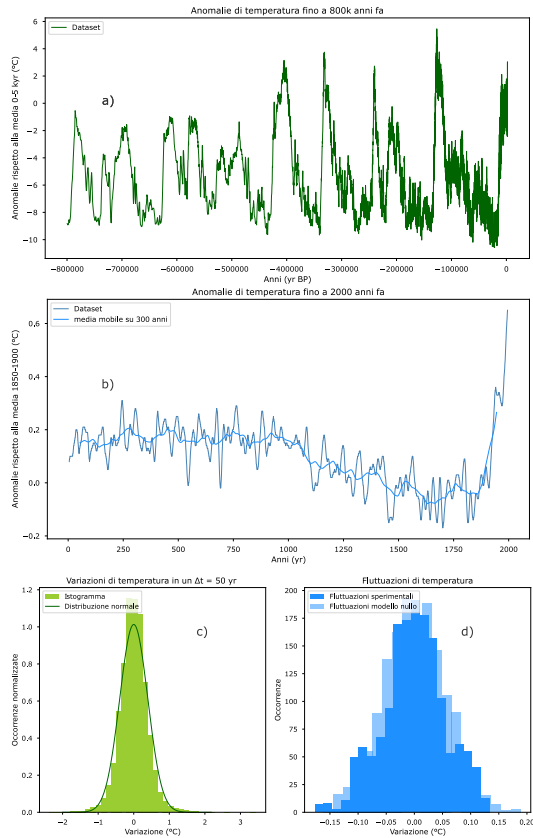


FIG. 2 In questa figura troviamo rappresentati 4 grafici: a) anomalie di temperatura fino a 800 mila anni fa, b) anomalie di temperatura fino a 2000 anni fa e media mobile su 300 anni, c) variazioni di temperatura ogni 100 anni, valutate con i dati del grafico a), per valutare la statistica dell'aumento di temperatura negli ultimi 100 anni, d) istogramma con fluttuazioni di temperatura valutate a partire dai dati degli ultimi 2000 anni (grafico b)) fino al periodo pre-industriale, quindi fino al 1850, per mostrare l'origine statistica delle fluttuazioni, confrontandole con un modello nullo gaussiano.

Successivamente mi son concentrato sul dataset degli ultimi 800 mila anni: qui noto l'effetto dei cicli

di Milanković¹, infatti vedo un andamento oscillatorio tra ere glaciali, in corrispondenza dei minimi, e di periodi molto caldi, in corrispondenza dei massimi. Ho subito notato che il dataset non è campionato con regolarità: allora ho effettuato un'interpolazione lineare distanziando tutti i punti di 1 anno, per poi sostituire nel nuovo dataset da me creato i dati originali. Successivamente ho valutato la compatibilità delle due serie con il test di Kolmogorov-Smirnov e ho ottenuto un valore di $p = 0.99$, che ci fa scartare l'ipotesi che le differenze tra le due serie siano significative.

A questo punto mi sono chiesto quanto variasse la temperatura ogni 50 anni negli ultimi 800 mila, per confrontarla con il valore $\Delta T(1970 - 2022) = 0.89^\circ\text{C}$: ho realizzato un istogramma (FIG. 2c)) che rappresenta la situazione, e noto che grazie al teorema del limite centrale, la mia osservabile, ovvero ΔT in 50 anni, si distribuisce come una gaussiana, e quindi ho effettuato lo z-test testando il valore degli ultimi 50 anni. Quello che ho ottenuto è un valore di $z = 2.26$ che corrisponde a $p = 0.01$, e quindi che il valore $\Delta T(1970 - 2022)$, dato il modello gaussiano, è un'osservazione estremamente improbabile. Ho poi cercato di identificare una periodicità nel segnale tramite l'utilizzo della trasformata di Fourier: l'esito però è stato negativo, infatti il picco della trasformata è sulla frequenza $\nu = 0$, che mi suggerisce una non periodicità del segnale.

Questi risultati mi portano a concludere che l'aumento di temperatura registrato negli ultimi 50 anni risulta non essere spiegabile con elementi di statistica e che quindi **la temperatura sta** con molta probabilità **umentando** per altre cause.

L'aumento delle temperature e le estinzioni di massa sono fatti correlati

Mi sono chiesto se su scala di milioni di anni potessi trovare una correlazione tra la variazione di temperatura e la variazione di biodiversità sul pianeta Terra. Per fare un'analisi ottimale di correlazione tra serie temporale occorre che esse siano stazionarie, e quindi ho verificato che quelle a mia disposizione lo fossero. Il risultato, tramite due test statistici per verificare la stazionarietà, rispettivamente ADF e KPSS test², è stato negativo: infatti sull'esempio di quanto fatto nel paper *Cycles in fossils diversity*, ho trovato un fit cubico per ognuna delle due variabili, quindi li ho sottratti e ho normalizzato le serie per renderle confrontabili visivamente (FIG. 3b)). A questo punto ho ripetuto i test ADF e KPSS per verificare la stazionarietà e hanno dato esito positivo su entrambe le serie.

Ho quindi considerato le date delle 5 grandi estinzioni di massa³, e ho verificato il valore della correlazione tra le due serie temporali a partire da 500 milioni di anni fa fino a tutte le date di estinzioni di massa, e quello che ho ottenuto è che la correlazione

¹ Per più dettagli, *Cicli di Milanković*

² Per più dettagli, *ADF test e KPSS test*

³ Per più dettagli *Estinzioni di Massa*

tra le due serie è sempre negativa e con il passare degli anni diminuisce, ma si mantiene sempre al di sopra di $c_{tot} = -0.36$ che è il valore che assume quando confrontiamo le due serie complete, che indica una correlazione negativa moderata tra le due serie temporali, ma non molto forte.

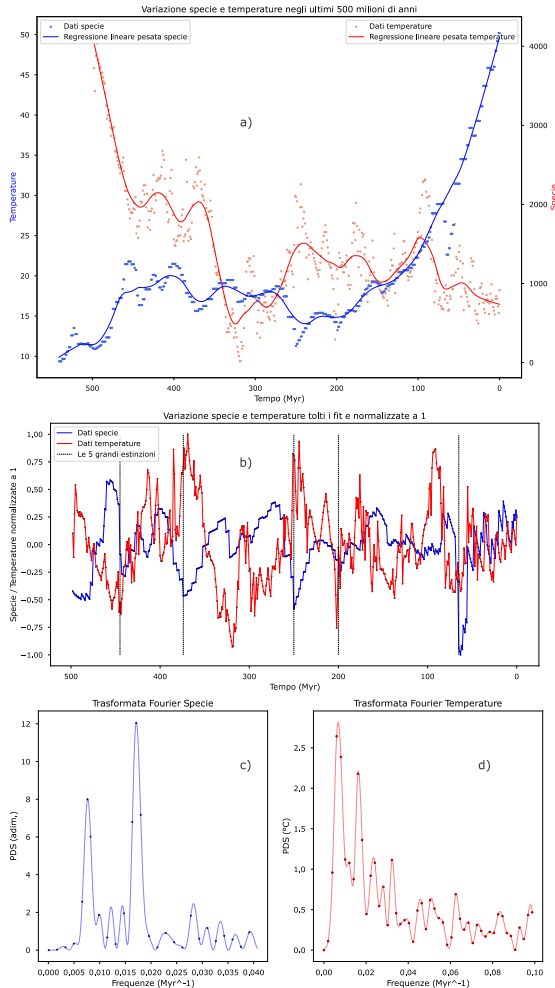


FIG. 3 In questa figura sono rappresentati 4 grafici: a) serie temporali del numero di specie e delle variazioni di temperatura negli ultimi 500 milioni di anni con una regressione lineare pesata localmente, b) serie temporali tolto il trend cubico a entrambe e normalizzate a 1, c) trasformata di Fourier della serie detrendata delle specie, d) trasformata di Fourier della serie detrendata della temperatura. In questi ultimi due grafici non sono state utilizzate le serie normalizzate.

Dal grafico 3b) si nota infatti visivamente che negli ultimi 65 milioni di anni la correlazione non sia fortissima, cosa che invece c'è nei primi milioni di anni a partire da 500 milioni di anni fa: infatti se mi limito alle prime tre estinzioni, noto che i valori di correlazione sono $c_1 = -0.89$, $c_2 = -0.54$, e $c_3 = -0.48$ che suggeriscono correlazioni forti o moderatamente forti, e ci indicano che **le due serie sono quindi fortemente correlate**. Inoltre un'estinzione di massa ha una durata maggiore di 1 milione di anni, e quindi ho pensato di realizzare una *lagged cross-correlation analysis* per vedere se, ritardando le serie di qualche anno, la correlazione cresce o meno. Il risultato

è stato che, con un lag di 6 milioni di anni, la correlazione tra le due serie aumenta (in modulo) fino a $c_{6M} = -0.42$, che indica una correlazione sensibilmente più forte di quella precedente.

Come ultimo passo mi sono chiesto se a questa scala temporale fosse possibile trovare delle periodicità nella variazione di temperatura, perché sulla variazione di specie questa periodicità è già stata trovata ed è spiegata sempre nel paper citato in precedenza. Quello che ho fatto è stato anche vedere se ci fossero dei picchi simili, infatti per la variazione di specie ci sono due frequenze principali, che sono $\nu_1 = 0.0161 \pm 0.0009 \text{ Myr}^{-1}$ che corrisponde a un periodo $T_1 = 62 \pm 3 \text{ Myr}$ e $\nu_2 = 0.0072 \pm 0.0008 \text{ Myr}^{-1}$ con periodo $T_2 = 140 \pm 15 \text{ Myr}$, dove l'errore è la FWHM, FIG. 3c). Ho quindi applicato la trasformata di Fourier alla serie temporale delle temperature detrendata (FIG. 3d)) e ho ottenuto tre frequenze principali, che corrispondono ai periodi $T_3 = 165 \text{ Myr}$, $T_4 = 124 \text{ Myr}$ e $T_5 = 62 \text{ Myr}$: ho notato che $T_1 = T_5$ e che T_4 è appena fuori dal margine di errore di T_2 . In entrambi i casi però assumendo come valore vero T_1 e T_2 , e valutando lo z-score rispettivamente di T_5 e T_4 , si ottiene un'ottima compatibilità statistica ($p_1 = 1$, $p_2 = 0.14$). Il ciclo principale per le temperature, quello con T_3 , non mostra invece evidenti collegamenti con la variazione di specie ($p_3 = 0.04$), e potrebbe essere dovuto ad altri fenomeni.

In conclusione sia la cross-correlation che l'analisi di Fourier ci indicano che **i fenomeni di variazione di temperatura e di perdita di biodiversità sono correlati**.

Bibliografia

- **Temperature degli ultimi 170 anni:** *Had-CRUT5*.
- **Temperature degli ultimi 2000 anni:** *PAGES2k Consortium et al. A global multiproxy database for temperature reconstructions of the Common Era*, Scientific data 4, 2017.
- **Temperature degli ultimi 800 mila anni:** *Jouzel, J., V. Masson-Delmotte, et al. Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years*, Science, 2007.
- **Temperature degli ultimi 500 milioni di anni:** *Haijun and Wignall, Paul B and Song et al. Seawater Temperature and Dissolved Oxygen over the Past 500 Million Years*, Journal of Earth Science, 2019.
- **Specie negli ultimi 500 milioni di anni:** *Rohde, R., Muller, R.. Cycles in fossil diversity*, Nature, 2005.
- **Codice python per l'analisi dati:** *datanal-isis.py*

Le scritte in corsivo nelle note a piè pagina e nella bibliografia sono link ipertestuali che portano a quanto descritto.