

Il Clima della Terra

Roberto Buizza

(Scuola Universitaria Superiore Sant'Anna, Pisa)

L'ultimo rapporto dell' Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, il Summary for Policy Makers pubblicato ad agosto 2021), conferma che molti dei cambiamenti osservati sono senza precedenti, e non sono mai stati osservati non solo nelle ultime migliaia di anni, ma neanche nelle ultime centinaia di migliaia di anni.

Alcuni di questi cambiamenti, purtroppo, continueranno ad influenzare il clima per i prossimi centinaia e migliaia di anni. Tuttavia, è possibile limitare il riscaldamento, ed i suoi impatti, se si implementano azioni immediate e concrete di riduzione delle emissioni di CO₂ e degli altri gas serra (ad esempio, il metano, CH₄).

Durante questo ciclo di seminari, analizzeremo quali sono le componenti del sistema Terra che determinano il suo clima. Vedremo come, utilizzando una combinazione di osservazioni e modelli numerici dedotti applicando le leggi della fisica, si possa ricostruire il clima passato e generare proiezioni future.

Queste brevi note riassumono alcuni concetti importanti per comprendere il cambiamento climatico:

1. Le componenti del sistema Terra che determinano il suo clima
2. Modelli: cosa è un modello del sistema Terra?
3. Osservazioni del sistema Terra e ricostruzione del clima passato
4. Certezze ed errori, feedback e punti di non ritorno
5. Breve storia del clima della Terra
6. Il cambiamento climatico e gli scenari futuri

1. Le componenti principali del sistema Terra che determinano il suo clima

- Differenza tra 'clima' e eventi meteorologici
- La 1^a legge della termodinamica ci aiuta a capire il bilancio energetico della Terra
- La sorgente dell'energia che causa e mantiene i moti/processi del sistema Terra è il Sole, che emette radiazione a onda corta
- La radiazione di corpo nero: la legge di Stefan-Boltzmann ci permette di calcolare la dipendenza della radiazione emessa da un corpo (quale la Terra) dalla sua temperatura
- L'albedo terrestre (la percentuale della radiazione che la Terra riflette) determina quanta energia entra nel sistema, e quindi determina il clima della Terra
- L'effetto serra è fondamentale per rendere la Terra vivibile;
- Il calore viene trasportato in tre modalità: per radiazione, conduzione o convezione
- La temperatura della Terra varia con la latitudine, la stagione, e dipende dalla geografia (contrasto terra-mare, presenza di montagne, ..)
- La composizione chimica dell'atmosfera determina il suo clima
- Il vapore d'acqua è uno dei principali gas serra
- Gli oceani hanno un ruolo fondamentale nel determinare il clima della Terra

- Due sono i tipi di circolazione degli oceani: la circolazione superficiale, e quella termoalina, che controlla la ridistribuzione di calore tra l'equatore ed i poli
- La salinità dell'oceano determina la densità, ed i suoi moti (sia convettivi che a grande scala)
- La criosfera gioca un ruolo importante nella determinazione del clima della Terra
- Anche la neve gioca un ruolo importante (influenza l'albedo, ..)
- La biosfera determina il clima locale, e la ri-distribuzione dell'umidità
- La geografia, la distribuzione delle terre emerse, determinano la variabilità del clima

2. Modelli: cosa è un modello del sistema Terra?

- Modelli semplici, 0-dimensionali, basati sul bilancio energetico
- La complessità della natura è evidente dal video della variazione della concentrazione di CO₂ (2015)
- Uno dei motivi per cui è estremamente difficile e complesso prevedere sia il tempo (meteorologico) che l'evoluzione del clima del sistema Terra è che sono determinati dall'interazione di moltissime scale spazio-temporali diverse
- Le leggi della fisica ci aiutano a capire i fenomeni, e a scrivere dei modelli che li rappresentino in maniera realistica;
- Per l'atmosfera e l'oceano, partendo dalla legge di Newton $F=ma$ scritta per un fluido in un sistema di riferimento rotante, si possono dedurre le equazioni che descrivono la loro evoluzione;
- Per l'atmosfera, le variabili fondamentali che ci aiutano a descrivere il suo stato, sono la temperatura, la pressione, la densità, la velocità, l'umidità
- Le equazioni sono troppo complesse per essere risolte analiticamente, con carta e penna; vengono risolte numericamente con l'aiuto di super-calcolatori
- Più precisamente, se consideriamo ad esempio l'atmosfera, le equazioni vengono risolte su un grigliato 3-dimensionale, con un punto griglia ogni 10 km in orizzontale, e con ~100 livelli in verticale
- Sostanzialmente, quello che il modello ci permette di fare è di descrivere l'evoluzione del valore medio delle variabili di stato per ogni 'cubetto' di dimensione 10km x 10km x 500m
- Ad esempio, Il modello del Centro Meteorologico Europeo (ECMWF), ha un grigliato con circa 10^9 punti (1 miliardo!)
- Più la griglia del modello è fine (più i cubetti sono piccoli) e maggiore è la capacità del modello di simulare processi a scala piccola
- Il continuo aumento della potenza di calcolo disponibile ha permesso di utilizzare modelli sempre più complessi, e con passi-griglia sempre più fini: tra il 1976 ed oggi, la potenza di calcolo è aumentata di circa un fattore 10^6 (1 milioni di volte!); più o meno un aumento di potenza (a parità di costo) di un fattore 2 ogni ~20 mesi
- I modelli di oggi non sono perfetti, ma sono comunque in grado di simulare molto realisticamente i processi dinamici dell'atmosfera e dell'oceano

3. Osservazioni del sistema Terra e ricostruzione del clima passato

- Le osservazioni sono essenziali, fondamentali per capire i fenomeni, e ricostruire il clima passato

- In meteorologia, le osservazioni sono essenziali per stimare lo stato attuale del sistema Terra, per conoscere la posizione e temperatura delle masse d'aria, le zone affette da copertura nevosa, l'estensione dei ghiacci, le onde del mare, l'umidità del terreno: senza queste osservazioni non potremmo stimare accuratamente lo stato del sistema, e quindi prevedere la sua evoluzione futura
- Oggi, ci sono circa 4.000 satelliti/oggetti in orbita attorno alla Terra (circa il 70% sono inattivi)
- Osservazioni da satellite costituiscono oggi la maggior parte delle osservazioni del sistema Terra (il 95%): ogni giorno circa 600 milioni di osservazioni vengono scambiate tra gli enti/stati che li raccolgono, per stimare lo stato dell'atmosfera e permettere di generare previsioni meteorologiche
- Una nuova generazione di satelliti quali i Sentinels del progetto europeo Copernicus, ci permettono di monitorare anche lo stato chimico dell'atmosfera
- L'oceano è molto meno osservato e conosciuto: ogni giorno vengono scambiati circa 250.000 osservazioni raccolte da boe, navi, sonde; lo stato dell'oceano viene osservato anche con strumenti a bordo di satelliti (ad esempio, gli altimetri)
- Per stimare il clima del lontano passato, vengono usati carotaggi di ghiaccio, dalla Groenlandia e l'Antartico; permettono di ricostruire la temperatura e la concentrazione della CO₂ fino a circa 800.000 anni fa'
- Il clima degli ultimi 800.000 anni è caratterizzato da 8 era glaciali ed inter-glaciali, che si sono susseguite ad intervalli regolari
- La dendrocronologia, l'analisi delle caratteristiche degli anelli degli alberi, ci permette di ricostruire il clima passato degli ultimi centinaia di anni
- Un'altra sorgente di informazioni del clima passato viene dalla costituzione dei fossili
- La ricostruzione del clima passato mostra che, in termini di concentrazione della CO₂, la Terra negli ultimi 2.5 milioni di anni ha visto valori più bassi di quelli di oggi (420 ppm)
- In particolare, negli ultimi 800.000 anni, la concentrazione è oscillata tra 200 e 280 ppm; le variazioni sono occorse su tempi lunghi, migliaia e decine di migliaia di anni (al confronto dell'aumento della concentrazione osservato oggi, da 270 ppm a 420 ppm nell'arco di 120 anni).

4. Certezze ed errori, feedback e punti di non ritorno

- L'incertezza non può venire eliminata, va' stimata al meglio
- Due sono le sorgenti principali dell'incertezza che influenzano le previsioni meteo, o le previsioni del clima futuro: errori/incertezze legate alle osservazioni dello stato attuale del sistema, errori/incertezze/approssimazioni del modello che utilizziamo, ed errori legati alle assunzioni sugli scenari futuri
- Per le previsioni meteo, gli errori/incertezze delle osservazioni sono dominanti per le previsioni dei primi 5 giorni, mentre dopo i 5 giorni gli errori legati ai modelli diventano dominanti
- Una delle più importanti differenze tra le previsioni meteo e quelle del clima dei prossimi 20-50 anni, è che queste ultime dipendono dalle assunzioni sui possibili scenari di emissioni futuri, scenari che dipendono dalla demografia, dallo sviluppo economico, dal disaccoppiamento tra la produzione di energia e le emissioni di gas
- Quindi, nel caso delle previsioni del clima futuro, gli errori/approssimazioni del modello e le incertezze delle assunzioni sugli scenari futuri (della crescita della popolazione, della crescita economica, delle de-carbonizzazione dei processi) sono dominanti

- Un ulteriore fattore che determina incertezza è la variabilità naturale: anche nel futuro, così come accade oggi, la stessa stagione di 2-3 anni consecutive può essere molto diversa, a causa delle variazioni della circolazione meteo; lo stesso accade per il clima futuro, dove la variabilità interna del sistema può causare incertezza sugli scenari
- L'evoluzione, i miglioramenti dei modelli negli ultimi ~40 anni hanno portato a grandi migliorie, ad un maggiore realismo, e ad una riduzione dell'incertezze di quello che sarà il clima futuro
- Oggi, il bilancio energetico di un modello del sistema Terra è molto simile a quello del sistema reale: i progressi effettuati sono importantissimi, dato che anche piccolissimi errori del ciclo energetico, se ripetuti per decine di anni, possono causare errori di ampiezza simili al segnale che si cerca di prevedere (in termini di temperatura media globale, di ~1 grado su 100 anni)
- Un altro aspetto che va' simulato correttamente se si vogliono fare previsioni del clima futuro sono i processi di feedback, cioè il modo in cui diverse componenti del sistema Terra possono influenzarsi a vicenda
- Tra le componenti del sistema Terra che causano i feedback più importanti ricordiamo il l'albedo, l'umidità, i gas serra, le nubi, la neve ed i ghiacci
- Un ultimo concetto importante per comprendere l'evoluzione di sistemi complessi e non-lineari, sono i punti di non-ritorno: cambiamenti drammatici, irreversibili dello stato del sistema, che rendono di fatto impossibile tornare allo stato precedente
- Nel caso del clima del sistema Terra, sappiamo che ci sono delle sue componenti che stanno cambiando notevolmente le loro caratteristiche, e che potrebbe trasformarsi in maniera irreversibile: i ghiacciai della Groenlandia, i ghiacciai dell'Antartico, la foresta dell'Amazzonia, il Sahel, l'India ed il monzone Indiano.

5. Breve storia del clima della Terra

- Il clima della Terra è sempre variato su scale di tempo molto lunghe (migliaia e decine di migliaia di anni), tra periodi con alte concentrazioni di gas serra a periodi con valori più, da periodi più caldi a periodi più freddi; ma le variazioni di ogni epoca sono state causate da motivi diversi
- Quindi dall'analisi del clima passato possiamo capire come il sistema Terra possa evolvere, ma dobbiamo tenere conto che il passato non è un buon predittore del futuro, dato che eventi del passato non accadono più, o accadono con frequenze ed intensità molto diverse
- Partendo da circa 6 miliardi di anni fa', vediamo come diversi aspetti abbiano condizionato l'evoluzione del clima: metamorfismo, attività vulcanica, presenza di batteri che hanno prodotto ossigeno, impatti di asteroidi, movimenti delle placche tettoniche
- Teniamo sempre presente, durante la nostra analisi, che le ricostruzioni del lontano passato sono più incerte di quelle del passato vicino, degli ultimi secoli
- La ricostruzione del clima indica, ad esempio, la frequenza dei periodi glaciali ed interglaciali, ed il ruolo nel determinare tale frequenza delle variazioni dell'orbita della Terra e dell'asse di rotazione terrestre
- E' interessante analizzare cosa è successo circa 20.000 anni fa', alla fine dell'ultima era glaciale: lo scioglimento della calotta di ghiaccio che copriva l'America del nord, ed il suo impatto sull'oceano Atlantico, sulla circolazione termoalina, ed il feedback di queste variazioni sul clima

- Ricostruzioni del clima degli ultimi 2.000 anni mostrano che le variazioni naturali sono state dell'ordine di qualche decimo di grado (0.2-0.4 su intervalli di tempo di decine di anni): mai il clima degli ultimi 2.000 anni è variato così intensamente e velocemente come negli ultimi 100 anni
- Per capire perché sia importante operare affinché il clima della Terra non subisca variazioni troppo brusche, che possano portare alcuni suoi componenti a variazioni irreversibili, è interessante analizzare le ragioni per cui si siano potute sviluppare forme di vita avanzate
- Ci sono almeno 7 ragioni fondamentali perché questo sia avvenuto, legate alla temperatura superficiale, alla distanza Terra-Sole, al movimento delle placche tettoniche, all'esistenza del ciclo dell'acqua, alla presenza di altri grossi pianeti, alla presenza della Luna, alla rotazione terrestre
- E' interessante analizzare come, dall'analisi degli isotopi dell'idrogeno, dell'ossigeno e del carbonio, si possano stimare la temperatura e la concentrazione dei gas serra nei carotaggi di ghiaccio
- E' interessante anche cercare di capire se la Terra sia mai stata una 'palla di ghiaccio', e, se questo fosse successo, come abbia potuto uscire da questa condizione
- Questa breve e veloce analisi del clima del lontano passato della Terra ci dovrebbe far capire perché sia importante lavorare affinché il clima presente della Terra non cambia drasticamente, e perché ciò che noi viviamo oggi sia una sfida nuova, legata a processi diversi da quelli 'naturali' del passato.

6. Il cambiamento climatico e gli scenari futuri

- Iniziamo ad analizzare cosa sta succedendo alla concentrazione del principale gas serra (dopo il vapore d'acqua): l'anidride carbonica, CO₂
- Osservazioni mostrano come continui a salire, e come la sua concentrazione abbia raggiunto 420 ppm, un valore mai superato negli ultimi 2.5 milioni di anni
- E' interessante notare il ciclo annuale nella concentrazione media mensile della CO₂, e come dipenda dal ciclo annuale della vegetazione dell'emisfero nord
- Purtroppo, non solo la concentrazione della CO₂ continua a salire, ma continua a salire sempre più rapidamente: siamo passati da aggiungere ~1 ppm l'anno negli anni '60, a circa 2.5 ppm nell'ultima decade
- In termini di riscaldamento medio globale, il 2020 è stato (alla pari del 2016) l'anno più caldo dal 1979; i 5 anni più caldi sono stati tutti dopo il 2015;
- Sempre in termini di temperatura media globale, oggi il clima è circa 1.2° C gradi più caldo che nell'era pre-industriale (media tra il 1850 ed il 1900)
- Proiezioni basate sugli ultimi 20 anni (da Copernicus Climate Change Service, C3S), ci dicono che se continuiamo ad emettere gas serra come abbiamo fatto fino ad ora, il riscaldamento supererà 1.5° C gradi entro il 2034;
- Altri segnali che il cambiamento climatico stia accelerando vengono dall'analisi dell'estensione dei ghiacci dell'Artico, e dall'innalzamento del livello del mare
- I ghiacci dell'Antartico per ora mostrano una riduzione minore dell'estensione, perché la corrente oceanica circumpolare isola il polo sud dall'impatto del riscaldamento dell'oceano; osservazioni mostrano comunque, purtroppo, che lo spesso del ghiaccio in Antartico diminuisce, e di fatti ogni anno si osservano sempre più frequentemente distacchi di iceberg della dimensione di isole

- Uno degli impatti del cambiamento climatico è l'aumento della frequenza degli eventi estremi, sia caldi che freddi
- Un'atmosfera più calda può contenere più vapore d'acqua, e quindi può sostenere piogge più intense
- Un'atmosfera più calda è anche più energetica, e può quindi sostenere, dar vita a processi più intensi (quali uragani, tempeste di vento, Medicanes)
- Uno dei motivi principali per cui occorre fermare il cambiamento climatico, è che, a causa della continua crescita della popolazione mondiale (tra poco supereremo 7.9 miliardi), centinaia di milioni di persone vivono in zone al limite della vivibilità
- Quindi, il continuo riscaldamento renderà sempre più difficile per loro riuscire a vivere nei loro paesi, e dovranno migrare per sopravvivere; e le migrazioni causeranno tensioni, e guerre;
- In sostanza tutti, anche i paesi più ricchi, subiranno l'impatto del continuo riscaldamento, direttamente (a causa di un aumento dell'intensità e della frequenza degli eventi estremi che colpiscono il loro territorio) o indirettamente (a causa delle migrazioni forzate dal cambiamento climatico)
- L'umo, le attività umane, sono la causa principale del cambiamento climatico: occorre trasformare per ridurre le emissioni di gas serra
- Ogni singola persona può ridurre il suo contributo cambiando il suo stile di vita, l'alimentazione, il modo in cui viaggia
- L'ultimo rapporto IPCC pubblicato ad agosto 2021, indica chiaramente che possiamo contenere il riscaldamento globale al di sotto dei 2° C se riduciamo le emissioni di gas serra
- Più specificamente, il rapporto dice che possiamo emettere solo altre 1.800 Gt (giga tonnellate, 10⁹ tonnellate) di gas serra: se teniamo presente che nel 2019 le emissioni globali sono state di 49 Gt, se continuiamo così emetteremo in atmosfera 1.800 Gt in circa 40 anni; in altre parole, supereremo i 2° C di riscaldamento entro il 2060, e quindi arriverà a 2.5° C o più entro la fine del secolo
- In Italia il clima sarà molto diverso, dato che la regione Mediterranea è una delle regioni più soggette all'impatto del cambiamento climatico: in questa regione, oggi la temperatura media è circa 2.5-3° C più calda che nel periodo pre-industriale, ed entro la fine del secolo potrebbe essere 5-6° C più calda
- Possiamo ridurre le emissioni cambiando il modo con cui produciamo elettricità', cambiando i sistemi di trasporto, trasformando l'agricoltura, rendendo più efficienti i processi produttivi, riciclando, consumando meno

Roberto Buizza – 23 novembre 2021