

Evoluzione del clima sulla Terra nel prossimo futuro

E' indubbio che il clima stia cambiando. Cosa intendiamo esattamente con questa affermazione? Ogni estate ci appare più calda della precedente, più arida, caratterizzata da eventi atmosferici estremi sempre più intensi e frequenti. Le cause di questo risultato sono in parte naturali e in parte dovute alla presenza umana. Sulle seconde sarebbe bene intervenire al più presto e in modo efficace.

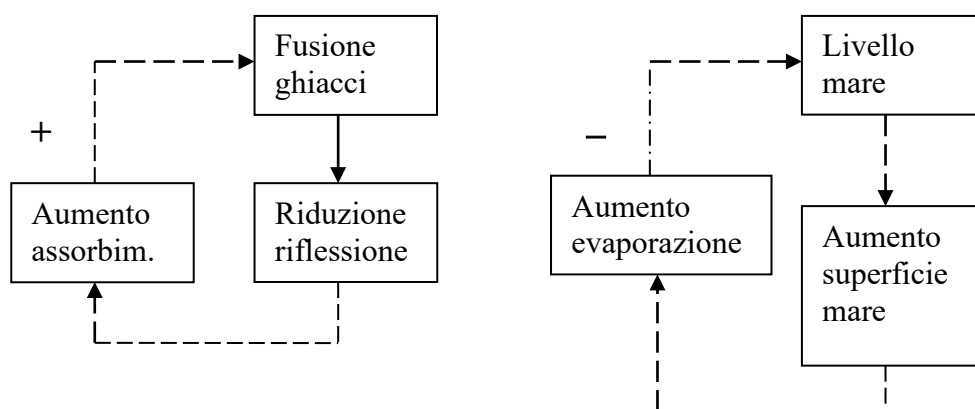
Prima di sviluppare qualsiasi previsione, conviene definire attentamente i termini del problema, dando alcune definizioni. Esistono catene di fenomeni legate da rapporti di causa-effetto. Queste catene non sono monadi indipendenti tra loro, ma risultano fortemente correlate. Ciò rende l'analisi particolarmente complessa. Il tempo gioca un ruolo determinante. Si hanno fenomeni la cui evoluzione si svolge nell'arco di giorni, altri che invece richiedono anni o perfino decenni. Se potessimo isolare un fenomeno da tutti gli altri, vedremmo che vi è una grandezza misurabile che, in media, sta aumentando o diminuendo.

Esiste quasi sempre una retroazione al termine di un ciclo temporale in cui il fenomeno si attua. Con riferimento ad una sola grandezza per semplicità, diremo che se la variazione di tale grandezza mantiene uguale segno (ad esempio un aumento origina un ulteriore aumento), si tratta di una retroazione positiva. Se invece la variazione cambia segno, si tratta di una retroazione negativa.

Le retroazioni positive tendono a destabilizzare il sistema, portandolo rapidamente ad una condizione intollerabile. Invece le retroazioni negative tendono a stabilizzarlo. Purtroppo vedremo che le retroazioni negative sono più rare.

Come primo esempio, consideriamo il fenomeno della fusione dei ghiacci, sia quelli perenni nei ghiacciai, sia quelli delle calotte polari (la cui estensione ha una componente periodica annuale). La diminuzione nella superficie ghiacciata origina una minore riflessione della luce solare, e quindi favorisce l'assorbimento del calore proveniente dal Sole. Ciò provoca una ulteriore fusione. E' questa una retroazione positiva. La superficie ghiacciata tenderà a ridursi progressivamente fino a scomparire del tutto.

Come secondo esempio, consideriamo l'innalzamento del livello del mare. Esso riduce la superficie delle terre emerse, quindi implica una aumentata superficie libera delle acque, che dovrebbe favorire l'evaporazione. Ciò riduce l'entità dell'acqua allo stato liquido, e ha come conseguenza un abbassamento progressivo del livello del mare. In assenza di altri fenomeni, il risultato dovrebbe essere una stabilizzazione del livello del mare, per la presenza di una retroazione negativa.

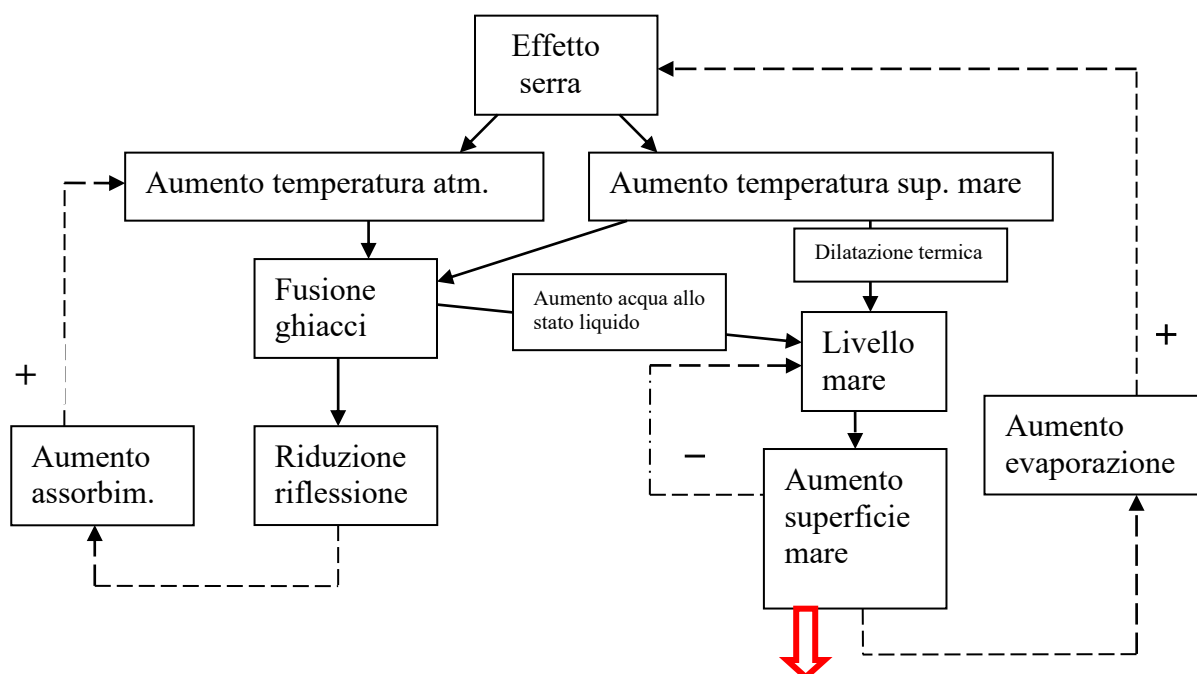


Esempi di retroazioni, una positiva e l'altra negativa

Abbiamo trattato due situazioni molto semplificate, in cui una stessa grandezza misurabile veniva adottata come parametro per stimare l'evoluzione del sistema nel tempo. Nel primo caso si trattava della superficie coperta dai ghiacci, nel secondo caso dell'altezza del livello medio marino. Nello schema a sinistra è illustrata la prima situazione, e in quello a destra la seconda situazione. Con il segno + abbiamo denotato la retroazione positiva e con il segno – quella negativa.

Per poter sviluppare analisi più ampie, occorre mettere in conto grandezze diverse, ricercando cause più remote o effetti più indiretti. Ad esempio, all'origine di molti fenomeni vi è il così detto effetto serra, dovuto alla presenza nell'atmosfera di gas come l'anidride carbonica, il metano o il vapore acqueo. L'effetto serra provoca un innalzamento della temperatura dell'atmosfera presso il suolo e della temperatura superficiale del mare. Sono questi due aumenti di temperatura che causano sia la fusione dei ghiacci, sia l'innalzamento del livello medio marino. Precisamente, quest'ultimo effetto è provocato direttamente dalla dilatazione termica, e indirettamente dal maggior volume di acqua allo stato liquido, conseguenza della fusione dei ghiacci.

Tenuto conto di queste precisazioni, si può tracciare un unico diagramma che contiene tutto quanto visto finora, come illustra lo schema qui sotto riportato.



Concatenazione di numerosi fenomeni

E' interessante osservare che le due retroazioni abbracciano adesso un maggior numero di fenomeni. In particolare, quella a sinistra agisce sull'aumento di temperatura in atmosfera, ed è quest'ultimo fenomeno che alimenta la fusione dei ghiacci. Una tale distinzione era necessaria.

Ancora più complicata è l'analisi della retroazione a destra. Qui la maggiore evaporazione fa aumentare l'effetto serra, e quindi tale retroazione si sdoppia. In piccola parte fa diminuire l'altezza del livello medio del mare, come già detto, contribuendone alla stabilizzazione, ma in gran parte incrementa l'effetto serra, causa prima di tutti questi fenomeni. Si può quindi ritenere trascurabile il beneficio di un ampliamento della superficie del mare per il solo fine di contenere l'innalzamento del suo livello medio, rispetto al danno legato a un peggioramento dell'effetto serra.

Vi è anche una conseguenza perfino peggiore. Infatti l'aumento di altezza della superficie del mare fa arretrare le coste, le foci dei fiumi vengono invase dall'acqua marina, le città portuali dovranno essere abbandonate. Questi effetti sono indicati complessivamente con la freccia rossa. Si tratta ad esempio di siccità, desertificazione, eventi meteorologici estremi e inevitabili migrazioni di

popolazioni umane. Anche questi eventi potranno provocare fenomeni capaci di innescare retroazioni, complicando sempre di più l'analisi.

Anche in presenza di retroazioni positive, spesso esistono situazioni in cui emergono ostacoli alla crescita incondizionata di un parametro. Nasce una forma di saturazione, solitamente ben descritta attraverso una così detta curva logistica. Essa mostra, in funzione del tempo t , una prima fase di crescita sempre più rapida, simile a quello di una curva esponenziale, poi una fase di crescita stazionaria, praticamente lineare, e infine una fase di crescita sempre più lenta fino ad arrivare ad un valore di saturazione.

Come esempi, possiamo citare la diffusione di un virus in una popolazione, la numerosità di una specie vivente in un ambiente, i volumi di estrazione di una materia prima. Il tempo t viene espresso in ore, giorni o anni, a seconda del fenomeno illustrato. Come variabile dipendente da t consideriamo l'entità del parametro misurabile che vogliamo rappresentare.

Pensando di voler rappresentare la temperatura media rilevata in una stessa località e in uno stesso intervallo di tempo (un anno), assumeremo come variabile indipendente t gli anni durante i quali si è svolta la nostra osservazione. L'andamento che ci appare a livello microscopico, cioè anno per anno, mostra un profilo aleatorio, con fluttuazioni ora positive ora negative. A una più attenta analisi, scopriamo che vi è una tendenza all'aumento. E' come se il valore medio di questo profilo crescesse con il tempo t . Ciò è conseguenza del riscaldamento del clima globale (effetto macroscopico). Il problema è cercare di modellizzare efficacemente il fenomeno, liberandolo dalle fluttuazioni microscopiche.

Possiamo eseguire una sorta di media, ma non tra le diverse località, bensì attraverso una finestra temporale scorrevole della durata di alcuni anni (una decina o poco più). Questo procedimento è denominato filtraggio dei dati di tipo passa-basso.

In alternativa, possiamo effettuare una interpolazione adottando una idonea funzione interpolante. Stante la suddetta tendenza verso un aumento, potremo trascurare l'eventualità di una futura riduzione, troppo lontana nel tempo, e limitarci alla fase di crescita verso una condizione di saturazione. Qui interviene la scelta di una curva logistica.

Scriviamo dunque l'espressione matematica della nostra curva,

$$T(t) = T_0 + \frac{\Delta T}{1 + \exp[-k(t - t_o)]} \quad ,$$

dove i parametri hanno il seguente significato

T_0 : temperatura iniziale

ΔT : incremento di temperatura alla fine del periodo considerato

k : tasso di crescita

t_o : istante in cui la crescita è massima

Con questa espressione, il valore di temperatura di saturazione (asintoto superiore) è $(T_0 + \Delta T)$. Precisamente T_0 è un valore di comodo, molto piccolo, il cui scopo è quello di evitare l'asintoto inferiore che farebbe iniziare la curva a sinistra da $t = -\infty$.

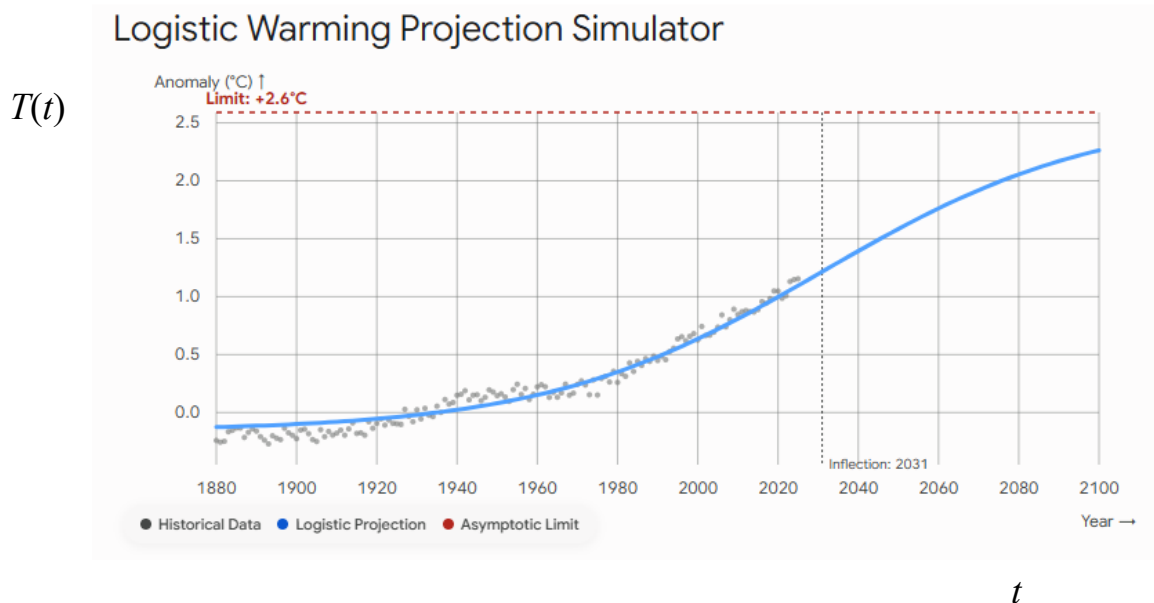
Il parametro più importante è k , che rappresenta la pendenza della fase centrale, dove la curva diviene approssimativamente una retta. Nell'istante $t = t_o$ il valore della temperatura risulta $T(t_o) = T_0 + \Delta T/2 \cong \Delta T/2$. Tale istante centrale è anche detto punto di flesso della curva, poiché la curvatura cambia segno, passando da positiva a negativa. ΔT si può interpretare come l'incremento netto di temperatura a partire dalla situazione assunta come riferimento.

Il modello descritto finora è stato espressamente associato ad una precisa località. Tuttavia il discorso può essere ripetuto con la media della temperatura globale. In quest'ultimo caso si avranno fluttuazioni annuali minori, ma il concetto non cambia. Il parametro più importante da stimare resta k . Precisamente, un valore di k maggiore implica una crescita più rapida. Un altro parametro molto importante è ΔT . Esso definisce il valore di incremento di temperatura al quale si manifesta una stabilizzazione. Più basso è ΔT , minore sarà la modifica che la crisi climatica avrà apportato all'ambiente terrestre, quando finalmente si esaurirà.

Fatte queste premesse, consideriamo il ruolo del parametro t_o . Esso è conseguenza del momento in cui l'umanità adotterà efficaci misure contro l'immissione di gas serra nell'atmosfera. Tuttavia t_o potrebbe anche trovarsi molti anni più a destra di questo momento, a causa dell'enorme inerzia che il sistema possiede. Ebbene, dato che l'anidride carbonica e il metano, principali gas serra nell'atmosfera attuale, vengono assorbiti molto lentamente, la loro immissione, avendo per obiettivo un bilanciamento, dovrà risultare veramente molto esigua. In conclusione, la crescita approssimativamente lineare intorno al punto di flesso t_o potrebbe essere ancora lontana.

E' evidente che i tre parametri k , ΔT e t_o si influenzano a vicenda e i dati empirici per procedere ad una loro stima purtroppo riguardano solo gli anni trascorsi, che sono tutti a sinistra di t_o . Non di meno, si potranno trarre delle interessanti indicazioni sull'efficacia delle soluzioni da impiegare, considerando diversi scenari.

Ho chiesto alla AI Gemini di adattare una curva logistica ai dati di temperatura media annuale globale registrati dal 1880 al 2026, intervallo di tempo entro il quale si hanno rilevazioni affidabili. Dopo qualche aggiustamento, siamo giunti al risultato riportato in questo grafico.



Curva logistica per stimare l'aumento della temperatura media annuale globale rilevata sulla superficie terrestre ad una quota di 0 metri s.l.m.

I parametri stimati per il modello sono

$$T_0 = -0.16 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 2.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$k = 0.029 \text{ anni}^{-1}$$

$$t_o = 2031$$

Come anticipato, il valore ottenuto per T_0 serve solo a testimoniare, con la sua piccolezza, l'affidabilità dell'interpolazione eseguita. Il valore di $t_0 = 2031$ indica che dovremmo ormai essere abbastanza vicini al punto di flesso, dopo il quale l'incremento dovrebbe ridursi progressivamente. La stima di un valore di saturazione $\Delta T = 2.6 \text{ }^\circ\text{C}$, a cui ci si avvicinerebbe a fine secolo, è solo apparentemente piccolo. Infatti deve essere comparato con la soglia di $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$, fissata nella COP21 di Parigi, a dicembre 2015. Infine il risultato $k \approx 0.03 \text{ anni}^{-1}$ denota una crescita molto lenta nel punto di flesso, al quale ci stiamo avvicinando. Direttamente dal grafico, attraverso una molto approssimativa interpolazione lineare, possiamo stimare il valore di circa $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ogni 10 anni.

Ma il parametro più critico è ΔT . La sua predizione è poco affidabile per la mancanza di dati relativi agli anni futuri. Se per caso esso dovesse risultare maggiore di quanto sopra riportato, il punto di flesso si allontanerebbe e la crescita cumulata sarebbe superiore, con effetti ancora più catastrofici di quelli finora rilevati.

Vi è poi l'ulteriore problema costituito dalla diversa entità di un certo fenomeno nei diversi luoghi della Terra. A questo proposito, il Mare Mediterraneo, per la sua forma chiusa e la non elevata profondità, è quello che sta subendo un riscaldamento maggiore. Nelle acque dell'arcipelago delle isole Baleari, mercoledì 5 agosto 2026, alle ore 16, è stata misurata la temperatura superficiale istantanea più alta di sempre, con il valore di $33.02 \text{ }^\circ\text{C}$. La media degli anni precedenti, nello stesso periodo dell'anno, era almeno 5 gradi inferiore. Questo significa che le fluttuazioni locali possono essere molto ampie, e provocare effetti considerevoli, come mutazioni nelle correnti marine, migrazione o quasi completa estinzione di specie viventi, restituzione di elevate quote di calore alla terraferma.

In questa mappa è riportata la temperatura superficiale del mare nel momento del picco di valore sopra descritto. Un colore rosso sempre più scuro denota le temperature più alte.



Mappa del riscaldamento della superficie del mare mediterraneo. Fonte Consorzio LAMMA (www.lamma.toscana.it)

Il mare in superficie (fino a qualche metro di profondità) ha una temperatura molto prossima a quella dell'aria che lo sovrasta, con le fluttuazioni diurne e stagionali. Poi, man mano che la profondità aumenta, essa tende a diminuire, fino a raggiungere, nelle fosse oceaniche, un valore praticamente costante di $4 \text{ }^\circ\text{C}$. Proprio in questa proprietà risiede l'effetto mitigante delle coste marine sul clima delle città che su di esse si affacciano. Purtroppo però anche gli strati a media profondità cominciano a riscaldarsi. Ciò provocherà in futuro un inevitabile riflusso di questo calore verso la terraferma, rallentando qualunque eventuale processo di stabilizzazione.

GvLL, 1 settembre 2026