

Comprendere il cambiamento del livello del mare



I mari della Terra si stanno alzando, un risultato diretto del cambiamento del clima. Le temperature degli oceani stanno aumentando, portando all'espansione degli oceani. E man mano che gli strati di ghiaccio e i ghiacciai si sciolgono, aggiungono più acqua. Un'armata di strumenti sempre più sofisticati, dispiegati attraverso gli oceani, sui ghiacci polari e in orbita, rivela cambiamenti significativi tra i fattori interconnessi a livello globale che stanno portando il livello dei mari a salire.

Fattori determinanti



La tendenza media globale verso l'aumento del livello del mare nasconde complessità più profonde. Gli effetti regionali fanno sì che il livello del mare aumenti in alcune parti del pianeta, diminuisca in altre, e persino rimanga relativamente stabile in alcuni luoghi, compresa, negli ultimi decenni, la costa della California. L'espansione termica dell'acqua marina può essere il prodotto di fenomeni regionali, come El Niño, il riscaldamento periodico del Pacifico tropicale orientale. Ma alcuni di questi cicli regionali finora non mostrano alcun legame diretto con il cambiamento climatico globale a lungo termine - nonostante, a volte, esercitino indipendentemente una potente influenza a breve termine sul clima globale.

Scioglimento del ghiaccio

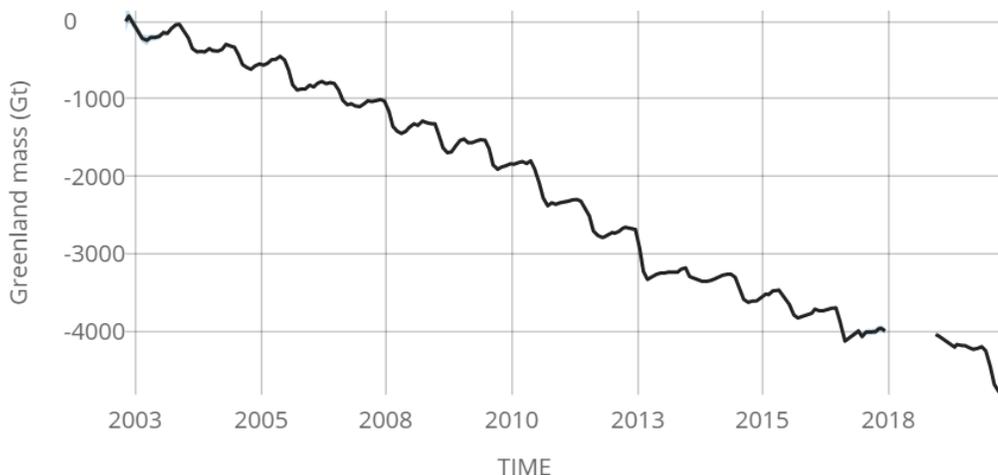
Scioglimento del ghiaccio: la perdita di massa di ghiaccio in risposta al riscaldamento. La perdita di ghiaccio vicino ai poli da ghiacciai e lastre di ghiaccio è uno dei contributi più significativi all'aumento globale del livello del mare; la più grande fonte singola è la Groenlandia, con le perdite dell'isola che aumentano nel decennio.

DIRECT MEASUREMENTS: 2002-PRESENT

Data source: Monthly measurements. Credit: JPL

RATE OF CHANGE

↓ 283
(± 21) Gt/yr



Groenlandia



I dati dei satelliti GRACE e GRACE Follow-On della NASA mostrano che la Groenlandia sta perdendo massa dal 2002. La missione GRACE ha concluso le operazioni scientifiche nel giugno 2017. GRACE Follow-On ha iniziato la raccolta dei dati nel giugno 2018 e sta continuando il record di dati sul cambiamento di massa della Groenlandia.

Questo set di dati contiene le serie temporali della massa della Groenlandia generate dai dati GRACE e GRACE Follow-On JPL RL06Mv2, che include gli ultimi miglioramenti nell'elaborazione dei dati. La serie temporale unidimensionale della massa ghiacciata mediata sulla calotta glaciale della Groenlandia da GRACE e GRACE Follow-On è espressa in massa di ghiaccio equivalente (Gt). 1 mm di equivalente al livello del mare equivale a circa 360 Gt di ghiaccio. La serie temporale inizia nell'aprile 2002 e viene continuamente aggiornata man mano che vengono raccolti più dati, con un ritardo fino a 2 mesi.

Un'animazione delle variazioni spaziali può essere trovata [here](#). These data are available in ASCII format (Reference: [Watkins et al., 2015](#), doi: 10.1002/2014JB011547).

Satellite gravimetrico

L'avvento delle misure gravimetriche con i satelliti gemelli GRACE nel 2002, insieme al più recente dispiegamento dei sensori galleggianti Argo, ha aperto la strada alla "chiusura" del bilancio del livello del mare - cioè quando la somma dei cambiamenti di massa e densità dell'oceano osservati è uguale al cambiamento totale del livello del mare [Leuliette e Willis, 2011].

GRACE misura i cambiamenti della massa d'acqua, compreso lo stoccaggio terrestre sotto forma di acque sotterranee, fiumi, neve e ghiaccio, e i cambiamenti di massa all'interno dell'oceano stesso, così come il movimento dell'acqua tra terra e oceano.

I primi tentativi non hanno raggiunto la chiusura del bilancio del livello del mare per linee di tendenza quadriennali [Willis et al., 2008, Chang et al., 2010], portando a preoccupazioni per la possibile deriva degli strumenti. Sforzi più recenti, tuttavia, hanno portato a rapporti di chiusura per periodi più estesi, compreso un rapporto NOAA che copre dal 2005 al 2013 ("The Budget of Recent Global Sea Level Rise, 2005-2013," di Eric Leuliette).

Per catturare accuratamente i cambiamenti nella massa d'acqua, gli spostamenti della massa atmosferica devono essere sottratti dalle misurazioni gravitazionali di GRACE - insieme ai cambiamenti nella massa dei bacini oceanici, il persistente effetto di ritorno dalla perdita dei ghiacciai dell'era glaciale [Tamisiea e Mitrovia, 2011].



Un approccio per ottenere un set di dati ad alta precisione è il metodo della concentrazione di massa (mascon), che suddivide le misurazioni gravitazionali di GRACE in regioni discrete di massa più elevata. Questo permette una risoluzione più precisa dei cambiamenti di massa nelle regioni più piccole rispetto alle soluzioni "armoniche" più tradizionali, che appianano le misure gravitazionali in un insieme più grande [Watkins et al., 2015].

Groenlandia e Antartide

La perdita di ghiaccio vicino ai poli è uno dei cambiamenti più critici che spingono il livello del mare ad aumentare, una conclusione supportata da dati di crescente peso e precisione. Il contributo della Groenlandia all'aumento globale del livello del mare è il più grande, e aumenta ogni decennio. Gli studi suggeriscono che il suo scioglimento è cresciuto da 0,09 millimetri all'anno tra il 1992 e il 2001, espresso come equivalente dell'aumento globale del livello del mare, a 0,59 millimetri all'anno tra il 2002 e il 2011 [Velicogna et al, 2014].

Le misurazioni dei satelliti gemelli GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) mostrano che la maggior parte delle perdite tra il 2003 e il 2013 provengono dalle porzioni sud-est e nord-ovest dell'isola, mentre il sud-ovest è responsabile di più della metà dell'accelerazione della perdita di ghiaccio. La perdita totale stimata è nell'ordine di più di 200 a più di 300 gigatoni all'anno (1 gigatone è circa 264 miliardi di galloni di acqua. Lo scioglimento di 365 gigatoni di ghiaccio aggiungerebbe 1 millimetro al livello globale del mare). È essenziale capire, soprattutto su queste brevi scale temporali, quale parte della perdita di massa è dovuta a cambiamenti nelle precipitazioni e nello scioglimento superficiale e quale parte a cambiamenti nello scarico glaciale.

Le misurazioni mostrano che il ritmo della perdita di ghiaccio in Antartide, anche se più moderato, rimane considerevole. Anche se l'Antartide orientale ha poca perdita di massa, quella dell'Antartide occidentale è significativa. La regione del Mare Amundsen e la Penisola Antartica, entrambe nell'Antartide occidentale, rappresentano il 64% del totale, circa 180 gigatoni all'anno tra il 2003 e il 2013 (una perdita compensata da guadagni di massa nell'Antartide orientale, per una perdita totale per il continente di 67 gigatoni all'anno [Velicogna et al, 2014]). E l'area del Mare di Amundsen è stata il contributo dominante all'accelerazione della perdita di ghiaccio, che è aumentata di circa 11 gigatoni ogni anno.

Il contributo dell'Antartide all'aumento del livello del mare è aumentato da 0,08 millimetri all'anno tra il 1992 e il 2001 a 0,40 millimetri all'anno tra il 2002 e il 2011 [Velicogna et al, 2014]. Insieme, la



Groenlandia e l'Antartide contribuiscono a circa un terzo dell'attuale aumento del livello del mare [Chen et al., 2013].

Uno studio del 2012 basato su dati satellitari altimetrici, interferometrici e gravimetrici, così come sulla modellazione [Shepherd et al., 2012], ha trovato che la calotta glaciale della Groenlandia ha perso 142 gigatoni all'anno tra il 1992 e il 2011, anche se con un'incertezza di 49 gigatoni all'anno. Lo stesso studio ha visto 71 gigatoni di perdita di ghiaccio in Antartide, anche questo con un grande fattore di incertezza. Questo si aggiunge ad un contributo dello strato di ghiaccio polare di circa 0,59 millimetri di aumento del livello del mare all'anno per il periodo di studio.

E una recente rielaborazione dei dati GRACE [Watkins et al., 2015] ha rilevato 289 gigatoni all'anno di perdita di massa di ghiaccio per la Groenlandia tra il 2002 e il 2014, e 141 gigatoni per l'Antartide.

Un altro studio [Rignot et al., 2014] ha rilevato un rapido tasso di ritiro per i ghiacciai del Mare di Amundsen tra il 1992 e il 2011, con le loro linee di terra, che separano il ghiaccio su roccia da quello galleggiante, ritirandosi da 10 a 35 chilometri. Questi autori hanno concluso che il ghiaccio si ritira lungo le regioni di "elevazione retrograda del letto" - dove la roccia del letto scende verso il basso, e più lontano dalla linea di base, nella direzione interna. I modelli numerici dello strato di ghiaccio trovano questa configurazione instabile.

Eppure l'Antartide illustra la capacità della media su larga scala di mascherare tassi di cambiamento molto variabili attraverso le regioni. Alcune parti del continente ghiacciato, schermate dall'isolamento e dal freddo profondo, sono apparentemente impermeabili al riscaldamento globale - almeno per il momento. Queen Maud Land nell'Antartide orientale sembra addirittura guadagnare massa di ghiaccio - circa 63 gigatoni all'anno dal 2003 al 2013 [Velicogna et al, 2014]. Anche se non abbastanza per superare la perdita netta di ghiaccio del continente, tali guadagni mostrano che alcune regioni possono gestire uno spostamento verso una maggiore massa di ghiaccio, a causa di maggiori precipitazioni e meno perdite.

Modello di ghiaccio

La modellazione degli strati di ghiaccio è fondamentale per qualsiasi proiezione del futuro aumento del livello del mare, ma è ancora nelle sue fasi iniziali. Tuttavia, i recenti tentativi di modellizzare il bilancio di massa superficiale delle lastre di ghiaccio della Groenlandia e dell'Antartide durante la seconda metà del 20° secolo concordano bene con le osservazioni - un passo importante per convalidare le proiezioni dei futuri cambiamenti nel bilancio di massa e il loro equivalente del livello



del mare [Shepherd et al., 2012]. Tali proiezioni sono tipicamente derivate da modelli climatici regionali o da modelli di circolazione generale atmosfera-oceano downscalati [Flato et al., 2013].

L'Ice Sheet System Model (ISSM), uno strumento impressionante sviluppato negli ultimi anni, integra dati provenienti da una varietà di fonti per simulare la fisica di ordine superiore del flusso di ghiaccio e per sviluppare proiezioni di equilibrio di massa per le calotte glaciali della Groenlandia e dell'Antartide [Larour et al., 2012]. Questo modello ad alta risoluzione, che include la capacità tridimensionale, rappresenta un miglioramento rispetto ai precedenti modelli "ibridi" (questi combinano simulazioni Shallow Ice Approximation e Shallow Shelf Approximation con una meccanica semplificata del flusso di ghiaccio, ma non sempre catturano in modo realistico gli strati e le piattaforme di ghiaccio). L'ISSM ha dimostrato di modellizzare le velocità superficiali del flusso di ghiaccio in buon accordo con le osservazioni per la Groenlandia [Larour et al., 2012], ed è stato utilizzato per migliorare la modellizzazione della velocità dei banchi di ghiaccio antartici [Larour et al., 2014].

Per la calotta glaciale della Groenlandia, una varietà di modelli non mostra alcuna tendenza di significato statistico dagli anni '60 agli anni '80, poi una tendenza significativa verso un contributo crescente all'aumento del livello del mare a partire dagli anni '90 [Flato et al., 2013]. Nel 2011, Rignot et al. hanno utilizzato il modello climatico atmosferico regionale (RACMO2) per dimostrare che i cambiamenti nel bilancio di massa della superficie potrebbero rappresentare circa il 60% della perdita di massa del ghiaccio dal 1992 [Rignot et al., 2011, Flato et al., 2013].

Le simulazioni antartiche sono accompagnate da una maggiore incertezza, ispirando tra gli autori dell'ultimo rapporto dell'IPCC solo una fiducia media nei risultati dei modelli per la fine del XX secolo, compresa una stima RACMO2 di un contributo negativo all'aumento globale del livello del mare: meno 5,5 millimetri all'anno, più o meno 0,3, tra il 1979 e il 2000 [Lenaerts et al., 2012].

Una valutazione recentemente pubblicata della modellazione del clima antartico da parte di 20 esperti [Bracegirdle et al., 2015] ha incluso una serie di miglioramenti consigliati:

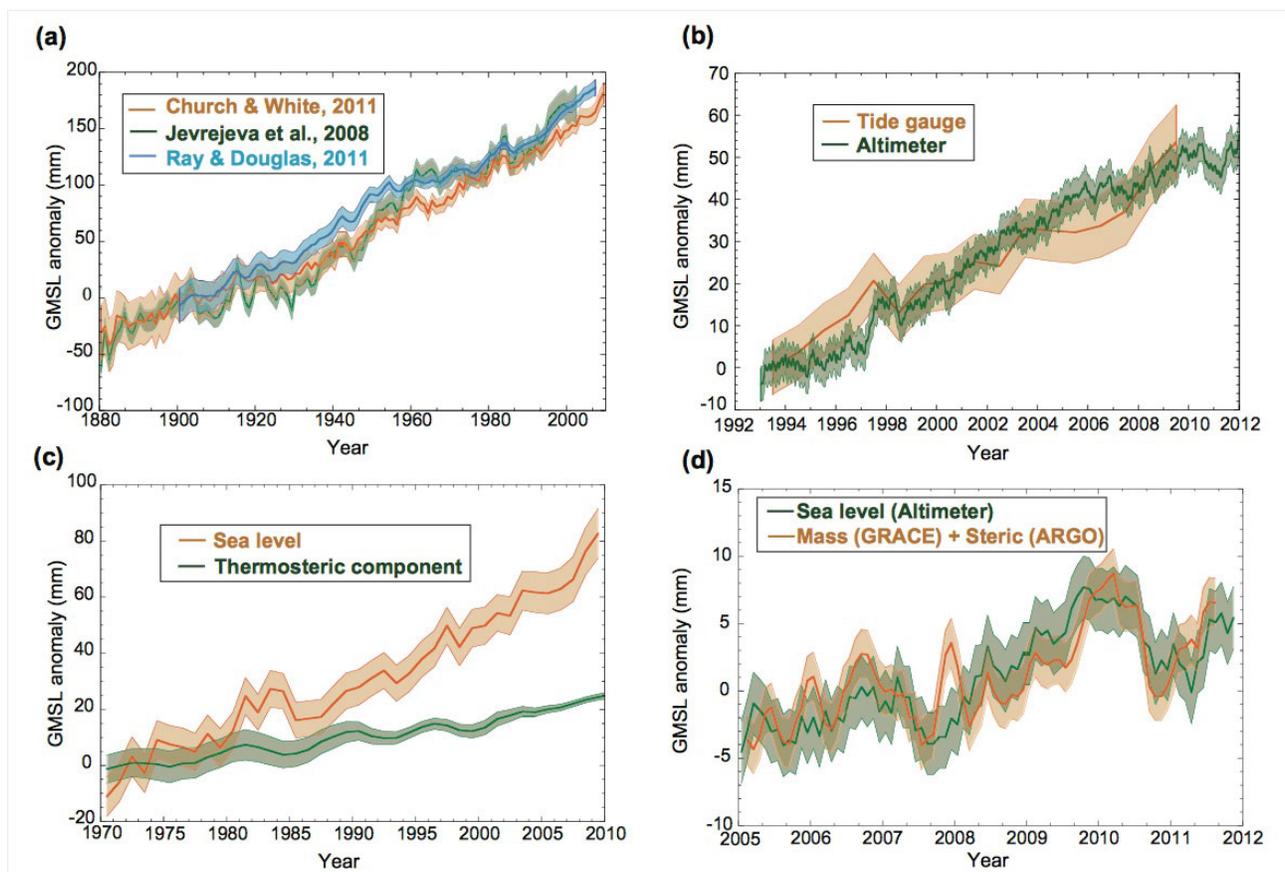
- Eliminazione di grandi distorsioni nel posizionamento del getto troposferico di media latitudine dell'emisfero meridionale, che guida i venti occidentali, nei modelli CMIP 5, per catturare meglio gli effetti della riduzione e del recupero dell'ozono stratosferico.
- Migliore modellizzazione delle nuvole sull'Oceano del Sud.
- Valutazione dei flussi di energia sull'Antartide nei modelli climatici, con l'obiettivo di sviluppare un adeguato bilancio energetico atmosferico.

- Utilizzo di ricostruzioni del paleoclima per creare simulazioni più efficaci del tasso di riscaldamento relativo sul continente meridionale, noto come "amplificazione polare".
- Simulare in modo affidabile le connessioni tra il Pacifico tropicale e l'Antartide, specialmente gli effetti climatici di un atteso spostamento verso est delle onde di Rossby dirette a sud - uno spostamento previsto dalla maggior parte dei modelli.

La valutazione ha anche raccomandato una migliore modellizzazione della circolazione dell'Oceano Meridionale.

Espansione termica

L'acqua dell'oceano si espande quando si riscalda, riempiendo volumi più grandi. L'oceano assorbe più del 90% del calore che i gas serra intrappolano nell'atmosfera terrestre, rendendo l'espansione termica un contributo significativo all'aumento globale del livello del mare - circa un terzo del totale osservato.





Anomalie del livello medio globale del mare (in mm) dai diversi sistemi di misurazione come si sono evoluti nel tempo, tracciati rispetto ai valori medi di 5 anni che iniziano nel (a) 1900, (b) 1993, (c) 1970 e (d) 2005. (a) GMSL medio annuale ricostruito dai mareografi (1900-2010) con tre diversi approcci (Jevrejeva et al., 2008; Church e White, 2011; Ray e Douglas, 2011). (b) GMSL (1993-2010) da mareografi e altimetria (Nerem et al., 2010) con variazioni stagionali rimosse e lisce con una media di 60 giorni. (c) GMSL (1970-2010) dai misuratori di marea insieme con la componente termosterica a 700 m (3 anni di media) stimata dai profili di temperatura in situ (aggiornato da Domingues et al., 2008). (d) Il GMSL (non stagionale) dall'altimetria e quello calcolato dalla componente di massa (GRACE) e dalla componente sterica (Argo) dal 2005 al 2010 (Leuliette e Willis, 2011), tutti con un filtro di media corrente di 3 mesi. Tutte le barre di incertezza sono un errore standard come riportato dagli autori. La componente termosterica è solo una parte del livello marino totale e non ci si aspetta che concordi con il livello marino totale. (Fonte: IPCC Fifth Assessment Report)

Il riscaldamento della Terra è dovuto principalmente all'accumulo di gas serra che intrappolano il calore, e più del 90% di questo calore intrappolato viene assorbito dagli oceani. Il volume dell'acqua aumenta con la temperatura a causa dell'espansione termica - un altro importante fattore di innalzamento del livello del mare. Il tasso stimato di espansione termica, o aumento termosterico del livello del mare, dal 1971 al 2010 è di 0,4-0,8 millimetri all'anno; la stima ha un livello di affidabilità del 90-100% [Rhein et al., 2013]. Questo corrisponde a un tasso di riscaldamento di 0,015 gradi Celsius per decennio nei 700 metri superiori dell'oceano globale tra il 1971 e il 2010. Per confronto, una stima utilizzando i galleggianti Argo ha trovato la componente termosterica dell'aumento del livello del mare sopra i 2000 metri di profondità di 0,5 millimetri all'anno, più o meno 0,5 millimetri, tra gennaio 2005 e settembre 2010 [Leuliette e Willis, 2013]. Le misure di temperatura della superficie del mare, prese da navi, satelliti e sensori galleggianti, insieme alle misure del sottosuolo e alle osservazioni dell'aumento globale del livello del mare, portano i ricercatori a concludere che questo riscaldamento dell'oceano superiore nel corso di quattro decenni è praticamente certo. Un contributo all'innalzamento del livello del mare di circa 0,1 millimetri all'anno dal riscaldamento delle acque oceaniche in profondità, da 700 metri a 2.000 metri, è considerato probabile, con circa altri 0,1 millimetri causati dal riscaldamento più profondo di 2.000 metri [Rhein et al., 2013].

Il record di espansione è breve; prima del 1971, le misurazioni oceaniche erano troppo poche per consentire stime significative. Tuttavia, il record è abbastanza robusto da rivelare che i cambiamenti di volume dell'acqua marina indotti dalla temperatura variano stagionalmente, così come attraverso i decenni. Combinati con il movimento stagionale delle precipitazioni, che porta spostamenti nella



massa d'acqua, tali cambiamenti possono causare fluttuazioni del livello del mare in un dato emisfero per cifre vicine al centimetro [Chen et al., 2005].

La grandezza dell'effetto dell'espansione porta alcuni ricercatori a sollecitare l'adozione dell'aumento del livello del mare come il vero "indice di riscaldamento globale". Mentre potremmo istintivamente guardare alla media globale della temperatura dell'aria superficiale come punto di riferimento del cambiamento climatico, il segnale del livello del mare, questi scienziati sostengono, segue da vicino la maggior parte dell'assorbimento di calore del pianeta.

Proiezioni empiriche

Le proiezioni dell'innalzamento globale del livello del mare entro il 2100, l'anno su cui i modellatori climatici tipicamente si concentrano, variano ampiamente a seconda dei metodi di modellazione e delle ipotesi - il tasso di aumento delle emissioni di gas serra, per esempio, e soprattutto come gli strati di ghiaccio risponderanno al riscaldamento dell'aria e delle acque oceaniche. Le proiezioni recenti vanno da 0,2 metri a 2,0 metri (da 0,66 a 6,6 piedi) [Melillo et al., 2014; vedi le sezioni 13.5.1 e 13.5.2 del rapporto IPCC 2013 per una discussione dettagliata].

Le proiezioni per il prossimo secolo si concentrano sui due maggiori contributori: l'espansione termica dell'acqua marina e lo scioglimento dei ghiacci terrestri. Le proiezioni di consenso nel più recente rapporto dell'IPCC, chiamato quinta valutazione o AR5, includono i cambiamenti dinamici nelle grandi lastre di ghiaccio - un miglioramento rispetto alla valutazione precedente, AR4, anche se molto rimane incerto nel giovane campo della modellazione delle lastre di ghiaccio [Church et al., 2013].

L'ultima valutazione fornisce una serie di proiezioni per una varietà di scenari di emissioni di gas serra e il forcing radiativo associato (l'energia iniettata nel sistema climatico dall'azione di questi gas). I quattro scenari rappresentativi dei percorsi concentrati, o RCP, salgono da basse ad alte emissioni, ciascuno applicato ai modelli CMIP 5 per produrre possibili cambiamenti futuri del livello del mare.

L'AR5 esprime una "fiducia media" in queste proiezioni, derivate da modelli basati su processi, cioè tentativi di simulare i meccanismi e le interazioni dei fattori che guidano l'innalzamento del livello del mare e i cambiamenti del ghiaccio terrestre. Ma i modelli numerici di circolazione generale accoppiati - considerati "basati sui processi" - spiegano il 90% dell'aumento del livello del mare osservato tra il 1971 e il 2010, così come quello osservato durante un periodo più breve, dal 1993 al 2010 (vedi "By the Numbers"). Questo aumenta la fiducia che questi modelli siano affidabili nelle



condizioni attuali, nonostante il fatto che l'attuale tasso di innalzamento dei modelli, 3,7 millimetri all'anno, sia significativamente più alto di quello mostrato dalle osservazioni. Poiché questi modelli accoppiati non includono le instabilità degli strati di ghiaccio, le loro proiezioni rappresentano molto probabilmente un "limite inferiore" per il futuro aumento del livello del mare.

I modelli basati sui processi proiettano un aumento da 0,26 a 0,55 metri, con un valore mediano di 0,4, per lo scenario RCP 2.6, in cui le emissioni di gas diminuiscono dopo un picco, mentre i livelli di anidride carbonica rimangono sotto le 500 parti per milione. Per lo scenario RCP 8.5, con le sue maggiori concentrazioni di gas serra e con l'anidride carbonica sopra le 700 parti per milione, l'aumento previsto è da 0,52 a 0,98 metri, con un valore mediano di 0,6. Church et al., 2013].

Il riscaldamento degli oceani e le perdite dello strato di ghiaccio sono "molto probabili" per guidare il tasso di aumento del livello del mare più alto nel 21° secolo rispetto al tasso misurato dal 1971 al 2010, secondo l'AR5 [Church et al., 2013]. Per il periodo 2081-2100, rispetto al 1986-2005, il rapporto considera probabile, con media confidenza, che l'innalzamento medio globale del livello del mare scenda tra il cinque e il 95 per cento dell'intervallo previsto dai modelli basati sui processi. Solo il collasso di porzioni marine della calotta antartica potrebbe portare il livello del mare oltre questi intervalli "probabili", hanno concluso gli autori, e non più di qualche decimo di metro [Church et al., 2013].

E mentre il rapporto dell'IPCC riconosce un approccio alternativo più recente, noto come modellazione semi-empirica, le sue proiezioni guadagnano solo "bassa fiducia" da parte dell'IPCC [Church et al., 2013]. Gli autori del report non potevano valutare la probabilità che i modelli semi-empirici, o SEM, si avverassero, e credevano che la comunità scientifica mancasse di consenso sulla loro affidabilità.

I SEM [Rahmstorf et al., 2012 e relativi riferimenti] adottano un approccio semplice - una sorta di scorciatoia - per simulare il futuro aumento del livello del mare. Invece di cercare di modellare i processi alla base del cambiamento del livello del mare, questi modelli si basano sui cambiamenti del livello del mare osservati nei decenni precedenti e sulla loro relazione con la temperatura globale. Poi applicano la stessa relazione al secolo a venire. Le proiezioni risultanti tendono ad essere significativamente più alte di quelle derivate dalla modellazione basata sui processi.

Un esempio illustrativo può essere trovato in un recente studio che contrasta le proiezioni di modelli basati sui processi e semi-empirici [Perrette et al., 2013]. L'innalzamento medio globale del livello del mare dalle fonti principali - espansione termica, ghiacciai e lastre di ghiaccio della Groenlandia e dell'Antartide - ammonta a 0,42 metri entro il 2100 nel modello basato sui processi RCP 6.0,



considerato uno scenario di emissioni standard di medio raggio. Ma aggiornato con l'approccio semi-empirico, lo stesso modello produce un totale di 0,86 metri, più del doppio del valore basato sui processi.

Per lo scenario RCP 2.6, la proiezione mediana dei SEM è di circa 0,75 metri entro la fine del secolo, e circa un metro per lo scenario RCP 8.5. All'estremità alta degli intervalli di confidenza (95%), il livello del mare raggiunge più di 1,5 metri per quest'ultimo scenario, principalmente basato sui lavori di Rahmstorf e di Jevrejeva. Un altro studio sull'affidabilità dei modelli, in cui Rahmstorf et al. hanno eseguito un'ampia analisi dei loro SEM [Rahmstorf et al., 2012], ha concluso che un aumento di circa un metro, prodotto da un riscaldamento di 1,8 gradi Celsius, rappresenta un risultato solido, derivato dai dati pubblicati e dal loro modello.

Dopo la pubblicazione dell'AR5, anche le più recenti osservazioni della calotta glaciale sono suggestive dei valori più alti per l'innalzamento del livello del mare. Le misurazioni del ritiro della linea di terra nei ghiacciai dell'Antartide occidentale [Rignot et al., 2014] hanno fornito prove di un rapido ritiro tra il 1992 e il 2011. Ancora più importante, i ricercatori non hanno trovato un "grande ostacolo di fondo che impedirebbe ai ghiacciai di ritirarsi ulteriormente e di tirare giù l'intero bacino [Rignot et al., 2014]". Il bedrock lungo i canali di scarico diventa più profondo in direzione dell'interno, aiutando la linea di terra a spostarsi più all'interno. Uno studio complementare [Morlighem et al., 2014] ha scoperto che le valli glaciali attraverso le quali la Groenlandia scarica il ghiaccio nell'oceano sono più profonde di quanto si credesse in precedenza, rendendole più vulnerabili allo scioglimento da parte delle acque oceaniche adiacenti e più calde.

Fonte

<https://sealevel.nasa.gov/understanding-sea-level/overview>