

La fisica del cambiamento CLIMATICO

di William Collins, Robert Colman,
James Haywood, Martin R. Manning e Philip Mote

Perché i climatologi sono tanto sicuri che le attività umane stanno riscaldando pericolosamente la Terra?

Alcuni scienziati che hanno partecipato alla revisione più recente e completa delle prove scientifiche del fenomeno riassumono i termini del dibattito e discutono sulle restanti incertezze

Per uno scienziato che studia il cambiamento climatico, i momenti di entusiasmo sono rari. In genere si progredisce con una minuziosa ricostruzione delle prove ricavate da ogni nuova misurazione della temperatura, dal rilevamento di un satellite o da un esperimento con un modello climatico. I dati sono controllati e ricontrrollati, le idee vengono verificate innumerevoli volte. Le osservazioni corrispondono ai cambiamenti previsti? C'è una spiegazione alternativa? I bravi climatologi, come tutti i bravi scienziati, vogliono assicurarsi che gli standard di dimostrazione più elevati siano applicati a ogni loro scoperta.

E le prove del cambiamento sono aumentate con l'estensione dei dati sul clima, con una migliore comprensione del sistema climatico e con l'aumento dell'affidabilità dei modelli. Nel corso degli ultimi vent'anni, le prove dell'influenza umana sul clima si sono accumulate in modo inesorabile, tanto che all'interno della comunità scientifica non si è mai stati così certi della realtà del recente cambiamento climatico e del potenziale per un mutamento futuro più grande. L'aumento di certezza è chiaramente riflesso nell'ultimo rapporto dell'International Panel on Climate Change (IPCC), il quarto di una serie di rapporti che valutano lo stato della conoscenza sull'argomento e che sono redatti e corretti da centinaia di scienziati di tutto il mondo.

Nel febbraio 2007 l'IPCC ha pubblicato una sintesi della prima parte del rapporto che verte sulla fisica alla base del cambiamento climatico. Definita come *Sintesi per i decisori politici*, ha fornito sia ai decisori che alla collettività un messaggio non ambiguo: gli scienziati sono più che mai sicuri del fatto che gli esseri umani hanno interferito con il clima e che un ulteriore cambiamento climatico indotto dall'uomo è alle porte. Anche se il rapporto afferma che alcuni di questi ulteriori cambiamenti sono ormai inevitabili, la sua analisi conferma che il futuro, in particolare a lungo termine, è in gran parte nelle nostre mani: l'intensità del cambiamento dipende da quello che faremo riguardo alle emissioni di gas serra.

La valutazione relativa alla fisica si concentra su quattro temi: determinanti del cambiamento, cambiamenti osservati nel sistema climatico, comprensione dei rapporti causa-effetto e proiezione dei mutamenti futuri. Dal rapporto dell'IPCC del 2001 sono stati fatti importanti progressi nella ricerca che interessa tutte queste aree, e nelle pagine

seguinti presentiamo le scoperte chiave che documentano le proporzioni del cambiamento, portando all'inevitabile conclusione che il cambiamento è indirizzato dall'attività umana.

Le determinanti del cambiamento

Le concentrazioni atmosferiche di molti gas, principalmente anidride carbonica, metano, ossido d'azoto e idrocarburi alogenati, sono aumentate in seguito alle attività umane. Questi gas intrappolano energia termica (calore) all'interno dell'atmosfera mediante l'effetto serra che porta al riscaldamento globale. Le concentrazioni atmosferiche di anidride carbonica, metano e ossido d'azoto sono rimaste piuttosto stabili per quasi 10.000 anni, prima degli aumenti repentini e in rapida accelerazione degli ultimi due secoli (si veda il box a p. 77). I tassi di crescita delle concentrazioni di anidride carbonica sono stati più rapidi negli ultimi dieci anni rispetto a qualsiasi altro decennio da quando è iniziato il monitoraggio continuo dell'atmosfera, cioè negli anni cinquanta; oggi le concentrazioni sono superiori del 35 per cento rispetto ai livelli pre-industriali. I livelli di metano sono approssimativamente due volte e mezzo più elevati rispetto ai livelli pre-industriali, e quelli dell'ossido d'azoto sono superiori del 20 per cento.

Come possiamo essere certi che siano gli esseri umani i responsabili di questi aumenti? Alcuni gas serra (gli idrocarburi alogenati, per esempio) non hanno un'origine naturale. Per gli altri, due importanti osservazioni dimostrano l'influenza umana. Le differenze geografiche nelle concentrazioni indicano che le fonti sono localizzate in modo preponderante sulla terraferma dell'emisfero settentrionale, il più popolato. E poi l'analisi degli isotopi, che distingue tra le fonti delle emissioni, dimostra che la maggior parte dell'aumento di anidride carbonica deriva dalla combustione dei carburanti fossili. Il metano e l'ossido d'azoto derivano dalle pratiche agricole e dal consumo di combustibili fossili.

I climatologi ricorrono al concetto di «forcing radiativo» per quantificare l'effetto che questo incremento nelle concentrazioni produce sul clima. Il forcing radiativo è la misura dell'alterazione causata nell'equilibrio energetico globale della Terra rispetto all'era pre-industriale, ed è espresso in watt per metro quadrato. Un forcing positivo induce il riscaldamento, un forcing negativo induce il raffreddamento. Possiamo determinare il forcing radiativo associato ai gas serra durevoli in

IN SINTESI

- Gli scienziati sono certi del fatto che gli esseri umani hanno interferito con il clima e che ci aspettano ulteriori cambiamenti climatici indotti dall'uomo.
- La spinta principale del recente mutamento climatico è l'emissione di gas serra proveniente dalle attività umane, soprattutto dall'impiego dei combustibili fossili (carbone, petrolio e gas naturale).
- Il rapporto dell'International Panel on Climate Change indica la probabilità che il riscaldamento globale sia causato dalle attività umane con una percentuale superiore al 90 per cento. Il precedente rapporto del 2001 indicava una percentuale superiore al 66 per cento.
- Anche se ulteriori cambiamenti del clima sono ormai inevitabili, il futuro, in particolare a lungo termine, è in gran parte nelle nostre mani. L'ordine di grandezza del cambiamento dipende da quello che gli uomini sceglieranno di fare riguardo alle emissioni di gas serra.

Tom Dräger Design; da sinistra a destra: John McCormick AP Photo; Jaap Hart iStockphoto; iStockphoto; Malcolm Romain iStockphoto; Tony Tremblay iStockphoto; Rob Hill iStockphoto



GLOSSARIO

IL FORCING RADIATIVO

è la variazione dell'equilibrio energetico della Terra a partire dall'era pre-industriale fino a oggi.

I GAS SERRA DUREVOLI

comprendono l'anidride carbonica, il metano, l'ossido d'azoto e gli idrocarburi alogenati. Gli aumenti registrati di questi gas sono il risultato dell'attività umana.

L'OZONO

è un gas presente sia a livello del suolo sia nello strato superiore dell'atmosfera. Al suolo, l'ozono è un inquinante. Nello strato superiore protegge la vita sulla Terra dai raggi ultravioletti nocivi del Sole.

L'ALBEDO SUPERFICIALE

è la riflettività della superficie terrestre: una superficie più luminosa, come un manto nevoso, riflette più radiazione solare rispetto a una superficie scura.

GLI AEROSOL

sono particelle trasportate per via aerea che derivano sia da fonti naturali (tempeste di polvere, incendi boschivi, eruzioni vulcaniche) sia da fonti artificiali, come il consumo di combustibili fossili.

LE SCIE DI CONDENSAZIONE

o scie di vapore sono tracce di condensa e nuvole artificiali lasciate dagli scarichi dei motori degli aerei.

LA TROPOSFERA

è lo strato dell'atmosfera vicino alla Terra. Si estende dal livello del mare fino a 12 chilometri di quota.

LA STRATOSFERA

si trova appena sopra la troposfera e si estende per circa 50 chilometri.

modo piuttosto preciso, perché conosciamo le loro concentrazioni atmosferiche, la loro distribuzione spaziale e la fisica alla base della loro interazione con la radiazione.

Il cambiamento climatico non è guidato unicamente dall'aumento delle concentrazioni dei gas serra; anche altri meccanismi, sia naturali sia causati dall'uomo, fanno la loro parte. Tra le determinanti naturali abbiamo i cambiamenti nell'attività solare e le grandi eruzioni vulcaniche. Il rapporto identifica diversi ulteriori e significativi meccanismi forzanti indotti dall'uomo: aerosol, ozono stratosferico e troposferico, albedo superficiale (riflettività) e scie degli aerei. Tuttavia le influenze di questi meccanismi sono assai meno certe rispetto a quelle dei gas serra (si veda il box nella pagina a fronte).

Le maggiori incertezze riguardano l'effetto albedo della nuvola di aerosol, secondo cui gli aerosol di origine umana interagiscono con le nuvole rendendole più brillanti e riflettendo la luce del Sole nello spazio. Un'altra fonte di incertezza viene dall'effetto diretto di questi aerosol: in che misura riflettono e assorbono la luce solare come particelle? Nel complesso questi effetti favoriscono un raffreddamento che potrebbe compensare l'effetto dei gas serra. Ma in che misura? Tra i progressi compiuti dal 2001 c'è il fatto che gli scienziati hanno quantificato le incertezze associate a ogni singolo meccanismo forzante combinando numerosi studi basati sia sui modelli sia sulle osservazioni. Di conseguenza siamo in grado di stimare con una certa sicurezza la componente totale indotta dall'uomo. La nostra stima migliore è circa dieci volte superiore rispetto alla stima migliore del forcing radiativo naturale causato dalle variazioni di attività solare.

L'aumento della certezza di un forzante radiativo positivo netto si adatta bene alle prove osservative del riscaldamento. Possiamo immaginare questi forzanti come un tiro alla fune, dove i forzanti positivi tirano la Terra verso un clima più caldo e quelli negativi verso uno più freddo. Ma non c'è gara: conosciamo la forza dei concorrenti meglio che mai. La Terra è trascinata verso un clima più caldo, e sarà spinta sempre più in questa direzione quanta più forza acquisterà il «giocatore di punta» del riscaldamento dovuto all'effetto serra.

Cambiamenti climatici osservati

Le numerose serie di dati osservativi, nuove e migliorate, a disposizione per il rapporto IPCC del 2007 hanno permesso una valutazione più com-

pleta e precisa dei cambiamenti rispetto alle analisi precedenti. I dati indicano che 11 degli ultimi 12 anni sono stati i più caldi dal 1850 circa, cioè da quando sono iniziate le prime rilevazioni affidabili. Le probabilità che anni così caldi si verifichino in sequenza per caso sono estremamente esigue. Le variazioni di tre importanti grandezze – temperatura globale, livello del mare e copertura nevosa nell'emisfero settentrionale (si veda il box a p. 78) – mostrano tutte la prova del riscaldamento, anche se i dettagli variano. Il precedente rapporto dell'IPCC indicava un trend del riscaldamento di $0,6 \pm 0,2$ gradi durante il periodo 1901-2000. In seguito al recente e forte riscaldamento, il trend aggiornato per il periodo 1906-2005 è $0,74 \pm 0,18$ gradi. Osserviamo che il trend per il più breve arco di tempo dal 1956 al 2005 è di $0,65 \pm 0,15$ gradi, evidenziando che la maggior parte del riscaldamento del XX secolo è attribuibile agli ultimi cinquant'anni. Il clima continua a variare intorno alle medie aumentate, e anche gli estremi sono cambiati: le giornate gelide, come anche le giornate e le notti fredde, sono diventate meno frequenti, mentre le ondate di calore e le giornate e le notti calde sono diventate più comuni.

Le proprietà del sistema climatico includono non soltanto concetti familiari come le medie delle temperature, le precipitazioni e così via, ma anche lo stato degli oceani e della criosfera (il ghiaccio marino, le grandi calotte della Groenlandia e dell'Antartide, i ghiacciai, la neve, il suolo gelato, il ghiaccio presente sui laghi e nei fiumi). Le complesse interazioni tra le diverse componenti del sistema climatico sono una parte fondamentale del cambiamento del clima; per esempio la riduzione del ghiaccio marino aumenta l'assorbimento di calore da parte dell'oceano e il flusso di calore tra l'oceano e l'atmosfera, che può influenzare la nuvolosità e le precipitazioni.

Molte osservazioni aggiuntive concordano ampiamente con il riscaldamento osservato e riflettono un flusso di calore dall'atmosfera verso altri componenti del sistema. Il manto nevoso primaverile, che si riduce con l'aumento delle temperature primaverili alle latitudini settentrionali medie, è diminuito bruscamente intorno al 1988 e da allora non si è più ripreso. Una riduzione preoccupante, perché la copertura nevosa è importante per l'umidità del suolo e le risorse idriche.

Nell'oceano osserviamo chiaramente le tendenze al riscaldamento, che diminuiscono con la profon-

dità. Questi cambiamenti indicano che l'oceano ha assorbito più dell'80 per cento del calore aggiunto al sistema climatico, e questo riscaldamento è il maggior responsabile dell'aumento del livello del mare. Il livello aumenta sia perché scaldandosi l'acqua si espande sia perché l'acqua proveniente dallo scioglimento dei ghiacciai e delle calotte polari finisce negli oceani.

A partire dal 1993 le osservazioni satellitari hanno permesso calcoli più precisi dell'aumento del livello del mare su scala globale, oggi stimato in $3,1 \pm 0,7$ millimetri all'anno nel periodo 1993-2003. Alcuni decenni precedenti hanno mostrato tassi di aumento analoghi, e occorreranno rilevazioni satellitari più lunghe per determinare in modo ine-

quivocabile se il ritmo di crescita del livello del mare stia accelerando. Negli ultimi decenni abbiamo poi osservato riduzioni sostanziali del ghiaccio marino artico a partire dal 1978 ($2,7 \pm 0,6$ per cento ogni decennio nella media annuale e $7,4 \pm 2,4$ per cento ogni decennio in estate), aumenti di temperatura del permafrost e riduzioni delle superfici glaciali a livello globale, nonché delle calotte glaciali della Groenlandia e dell'Antartide. Purtroppo molte di queste grandezze non sono state monitorate bene fino ad anni recenti, così i punti di partenza delle rispettive rilevazioni differiscono.

Anche i cambiamenti idrologici sono ampiamente congruenti con il riscaldamento. Il vapore acqueo è il gas serra più forte, ed è aumentato, per lo me-

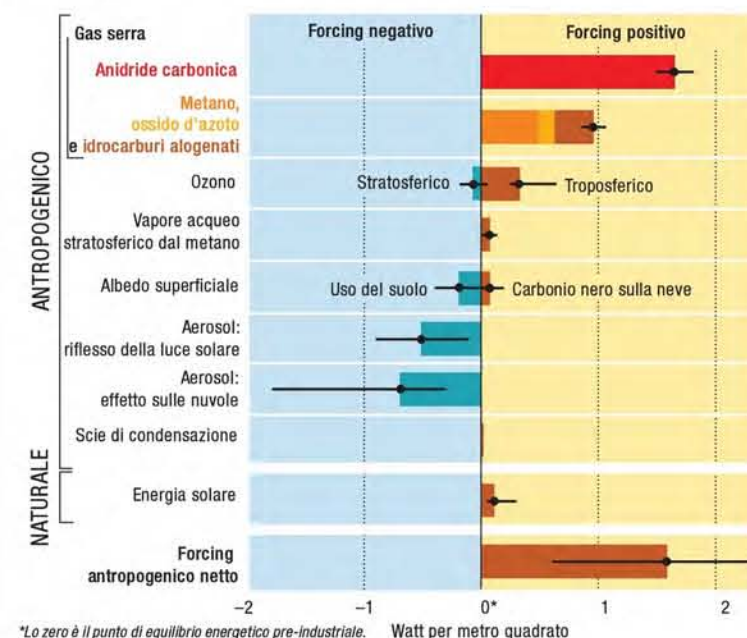
Attualmente la concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera è circa il 35 per cento al di sopra dei livelli pre-industriali

Influenze sul clima

Il tiro alla fune tra forzanti positivi (che causano un riscaldamento del clima) e forzanti negativi (che causano un raffreddamento) si conclude con una facile «vittoria» per le forze indotte dall'uomo che portano al

riscaldamento (grafico a sinistra). I forzanti principali indotti dall'uomo sono i gas serra durevoli. Le concentrazioni di questi gas sono cresciute rapidamente negli ultimi 200 anni (grafico a destra).

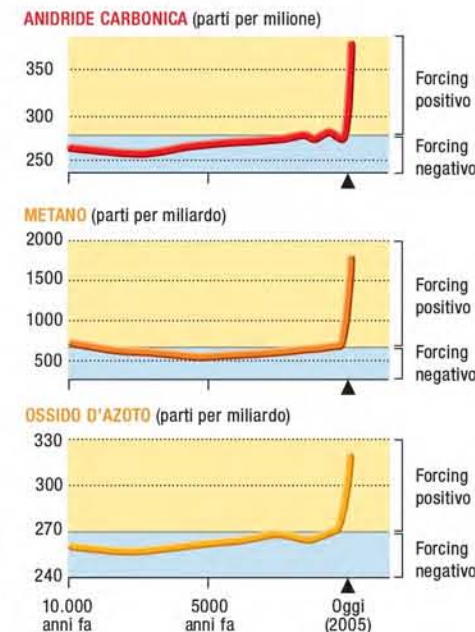
FORZANTE RADIATIVO: IN SINTESI



*Lo zero è il punto di equilibrio energetico pre-industriale.

Le stime delle medie globali del forzante radiativo nel 2005 sono illustrate nei loro principali meccanismi. Le linee nere (barre di errore) indicano il livello di certezza associato a ogni forzante: la probabilità che i valori si trovino all'interno delle barre è del 90 per cento. Il forzante radiativo dei gas serra, per esempio, è piuttosto certo, in opposizione all'incertezza legata agli effetti degli aerosol. (Gli aerosol vulcanici non sono inclusi perché episodici.)

GAS SERRA: I PRINCIPALI FORZANTI



In passato, le concentrazioni di anidride carbonica, metano e ossido d'azoto erano ricavate dalle carote di ghiaccio; quelle più recenti derivano da campioni presi dall'atmosfera. I notevoli aumenti recenti sono attribuibili alle attività umane.



L'estensione del ghiaccio nell'Artico si è ridotta di molto



Ghiaccio marino artico, 1979



Ghiaccio marino artico, 2005

no a partire dagli anni ottanta. Ma a differenza degli altri gas serra è controllato principalmente dalla temperatura. Le precipitazioni sono molto variabili localmente, ma sono aumentate in diverse grandi regioni del mondo, tra cui quelle orientali del Nord e del Sud America, l'Europa settentrionale, l'Asia settentrionale e centrale. Un aumento della siccità è stato osservato nel Sahel, nel Mediterraneo, in Africa meridionale e in parti dell'Asia meridionale. La salinità oceanica può funzionare come un enorme pluviometro. Le acque degli strati più superficiali degli oceani sono diventate più dolci alle medie e alte latitudini, mentre sono diventate più salate alle latitudini più basse, in accordo con i cambiamenti nei modelli delle precipitazioni a grande scala.

Le ricostruzioni del clima del passato, il paleoclima, basate sugli anelli di accrescimento annuale degli alberi e su altri indicatori, forniscono ulteriori importanti strumenti di comprensione del funzionamento del sistema climatico con e senza l'influsso umano. Indicano che il caldo dell'ultimo mezzo secolo è inusuale almeno nei precedenti 1300 anni. Il periodo più caldo tra il 700 d.C. e il 1950 è stato probabilmente dal 950 al 1100 d.C., periodo più fresco di diversi decimi di grado rispetto alla temperatura media registrata a partire dal 1980.

Attribuzione del cambiamento

Ora possiamo dire con ragionevole certezza sia che le attività umane hanno causato un forcing radiativo positivo sia che il clima sta cambiando. Ma possiamo collegare con altrettanta sicurezza le due cose? In altre parole: le attività umane sono le principali responsabili dei cambiamenti osservati o è possibile che questi ultimi siano riconducibili ad altra causa, una sorta di forcing naturale o una variabilità spontanea del sistema climatico? Il rapporto del 2001 definiva *probabile* (cioè con più del 66 per cento di probabilità) che la maggior parte del riscaldamento a partire dalla metà del XX secolo fosse attribuibile agli esseri umani. Il rapporto del 2007 è andato oltre, concludendo che è *molto probabile* (più del 90 per cento di probabilità).

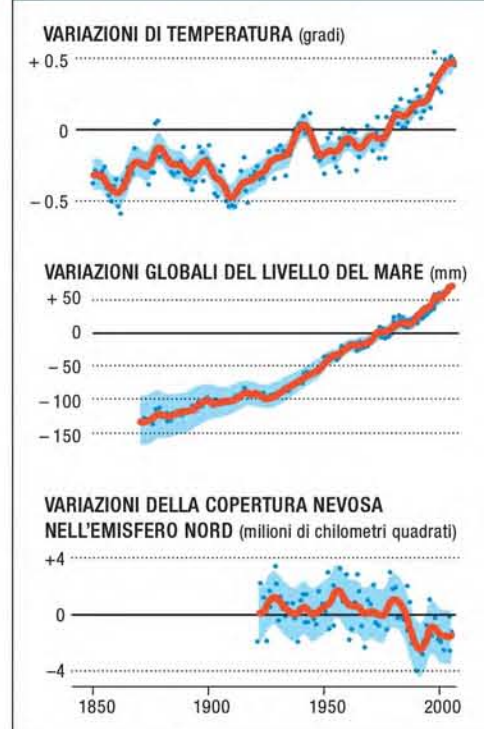
Questa maggiore sicurezza deriva da una moltitudine di progressi indipendenti. Per cominciare, ora disponiamo di dati osservativi relativi a circa cinque anni in più, e l'aumento della temperatura globale durante questo periodo è stato ampiamente congruente con le proiezioni IPCC effettuate nel 1990 relative al riscaldamento causato dai gas serra. Inoltre sono stati considerati cambiamenti in

più aspetti del clima, come quelli della circolazione atmosferica o delle temperature interne degli oceani, che restituiscono un quadro coerente e più ampio dell'intervento umano. Sono stati perfezionati anche i modelli climatici, ora in grado di rappresentare il clima attuale e del recente passato con considerevole fedeltà. E l'ultimo rapporto ha risolto alcune importanti incongruenze apparenti nei dati osservativi.

La contraddizione più importante era tra la rilevazione della temperatura superficiale strumentale (che ha mostrato un riscaldamento sensibile durante gli ultimi decenni, coerente con l'impatto umano) e la rilevazione atmosferica da satellite e da palloni aerostatici (che ha mostrato solo in parte il riscal-

Prove osservate

Le osservazioni relative alla temperatura superficiale media globale, al livello del mare medio globale e alla copertura nevosa nell'emisfero settentrionale in marzo e aprile documentano un aumento del riscaldamento. Le linee rosse rappresentano le medie dei valori nell'arco di un decennio, mentre l'ombreggiatura blu indica l'intervallo di incertezza; i puntini blu indicano i valori annuali.



NASA Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio (immagini ghiaccio artico); Tom Draper Design; Stephen Strathdee (stockphoto); iStockphoto; Martin Bond Photo Researchers, Inc.; Bettmann/Corbis; Nick Trolow (stockphoto); Jeremy Edwards (stockphoto); Hasan Kursad Ergun (stockphoto); Rick Riay (stockphoto)

damento atteso). Diversi nuovi studi basati sui dati provenienti da satelliti e palloni hanno risolto questa discrepanza, riscontrando un considerevole riscaldamento sia in superficie sia in atmosfera.

Un esperimento con il mondo reale che riproducesse il clima del XX secolo con i gas serra costanti (invece che in aumento) sarebbe l'ideale per verificare la causa del cambiamento, ma è ovviamente impossibile. Così gli scienziati fanno l'altra cosa da fare: simulano il passato con i modelli.

Dall'ultima valutazione dell'IPCC si sono ottenuti due importanti progressi che hanno aumentato la fiducia nell'uso dei modelli, sia per l'attribuzione sia per la proiezione dei cambiamenti climatici. Il primo è lo sviluppo di un insieme completo e coordinato di simulazioni di 18 gruppi di ricerca in tutto il mondo, che si occupano di creare modelli dell'evoluzione passata e futura del clima. Usare tanti modelli contribuisce a quantificare gli effetti delle incertezze in diversi processi climatici nell'intervallo coperto dalle simulazioni. Sebbene alcuni processi siano ben compresi e ben rappresentati dalle equazioni (per esempio il flusso di atmosfera e oceano o la propagazione della luce solare e del calore), la comprensione di alcuni componenti cruciali del sistema climatico è meno chiara, come le nuvole, i vortici oceanici e la traspirazione vegetale. Gli scienziati che costruiscono i modelli si avvicinano a questi componenti con rappresentazioni semplificate, dette parametrizzazioni. La ragione principale per sviluppare un insieme multi-modello per le valutazioni dell'IPCC è capire come la mancanza di certezza si ripercuote sull'attribuzione e sulla previsione del cambiamento climatico. L'insieme usato per l'ultimo rapporto non ha precedenti in quanto a numero di modelli ed esperimenti effettuati.

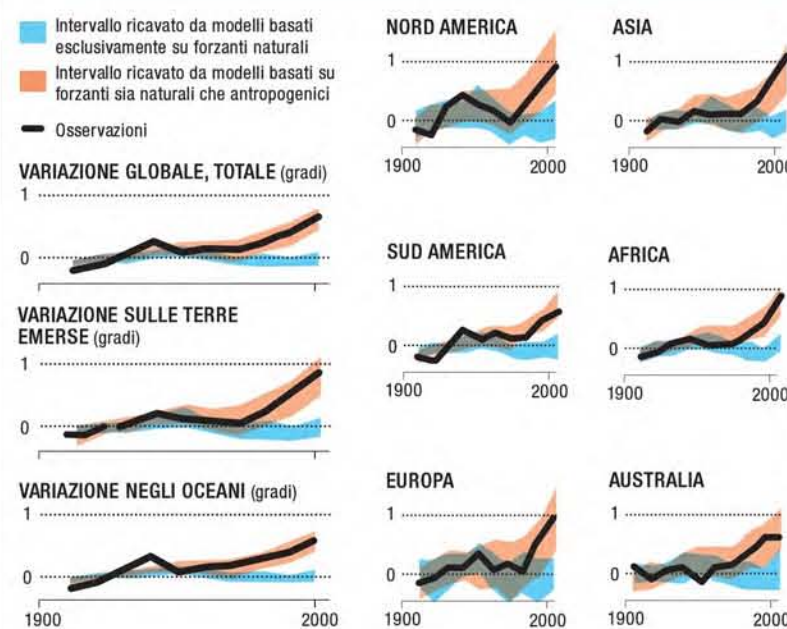
Il secondo passo avanti è stato includere nei modelli rappresentazioni più realistiche dei processi climatici, tra i quali il comportamento degli aerosol atmosferici, la dinamica del ghiaccio marino e lo scambio d'acqua ed energia tra terra e atmosfera. Quando gli scienziati ricorrono ai modelli climatici negli studi di attribuzione, per prima cosa fanno simulazioni basate su stime di influenze «naturali» degli ultimi cento anni, poi creano modelli che includono aumenti di gas serra e aerosol causati dall'uomo. I risultati sono stupefacenti (si veda il box qui a fianco): i modelli basati solo su forzanti naturali non spiegano il riscaldamento globale osservato dalla metà del XX secolo, men-

tre lo spiegano se si aggiungono ai fattori naturali quelli antropogenici. Inoltre, quando si considerano tutti i forzanti, gli schemi della variazione di temperatura a grande scala sono i più congruenti tra i modelli e le osservazioni.

Gli schemi che forniscono le impronte dell'influenza umana sono due. Nel primo c'è un riscaldamento maggiore sulla terra rispetto all'oceano e un riscaldamento maggiore sulla superficie marina rispetto agli strati profondi. Questo schema è coerente con il riscaldamento indotto dai gas serra dell'atmosfera sovrastante: l'oceano si scalda più lentamente a causa della sua grande inerzia termica. Il riscaldamento indica inoltre che una grande quantità di calore è assorbita dall'oceano, dimostrando così che il bilancio energetico del pianeta è stato portato fuori equilibrio. Nel secondo schema, mentre la troposfera (lo strato più basso dell'atmosfera) si è scaldata, la contigua stratosfera si è raffreddata. Se fosse stata la variazione dell'attività solare a causare il forcing dominante, ci

Variazione delle temperature indotta dall'uomo

I modelli basati esclusivamente su forzanti naturali (in blu) non riflettono gli effettivi aumenti di temperatura. Quando si includono sia i forzanti naturali sia i forzanti indotti dall'uomo (in arancione) i modelli riproducono l'aumento della temperatura effettivamente rilevato nel mondo reale, sia a scala globale che a scala continentale. Le variazioni illustrate sono relative alla media per il periodo 1901-1950.





si aspetterebbe un riscaldamento di entrambi gli strati. Il contrasto osservato è proprio quello che ci si aspetta dalla combinazione tra aumento dei gas serra e diminuzione dell'ozono della stratosfera. Questa prova complessiva, quando è sottoposta a un'accurata analisi statistica, è il fondamento dell'affermazione secondo cui le attività umane sono responsabili del riscaldamento globale osservato. Le ipotesi per cui i raggi cosmici influenzano le nuvole, e quindi il clima, si basavano su correlazioni con dati limitati: non hanno retto il confronto con dati supplementari, e i meccanismi fisici restano speculativi.

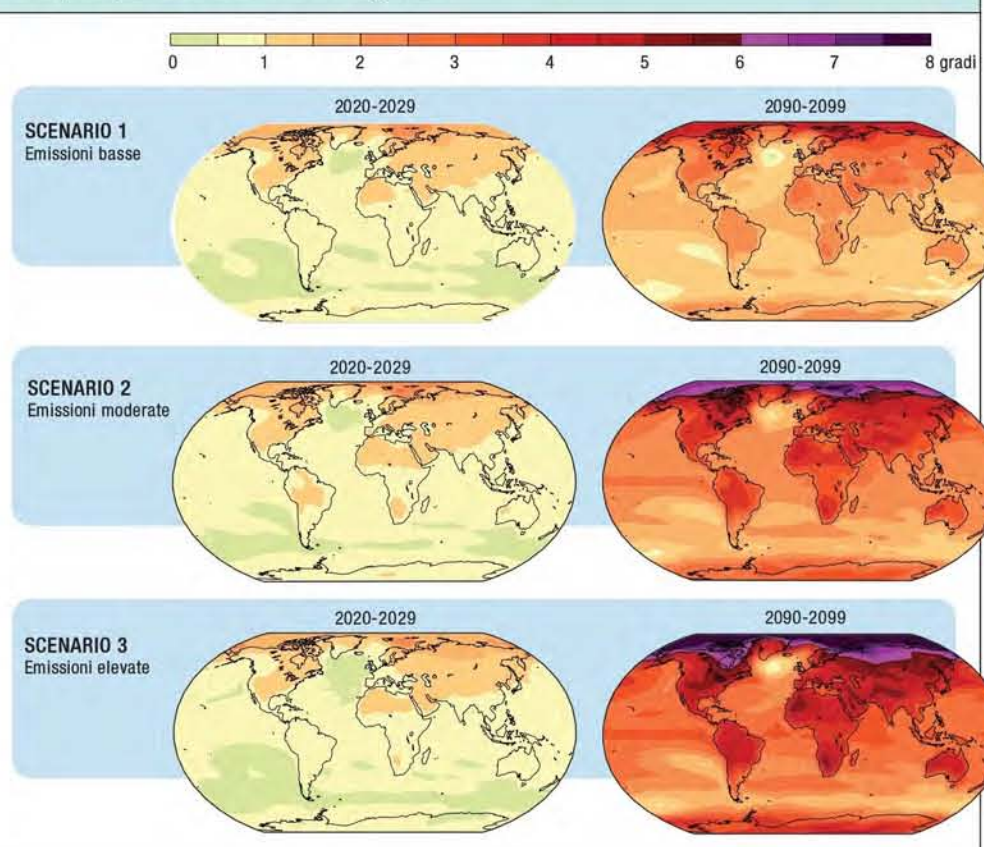
Che cosa succede a scale inferiori? Riducendo la scala temporale e spaziale, l'attribuzione dei cambiamenti diventa più difficile perché le variazioni naturali della temperatura a scala ridotta sono

meno mediate, e quindi mascherano più facilmente il segnale del cambiamento. Tuttavia un riscaldamento continuo indica che il segnale sta emergendo a scale più ridotte. Il rapporto ha riscontrato come probabile il fatto che l'attività umana abbia influenzato la temperatura in modo sensibile, fino ad arrivare alla scala continentale, in tutti i continenti tranne l'Antartide.

L'influenza dell'uomo è riconoscibile anche in alcuni eventi estremi come le notti insolitamente calde o gelide e l'incidenza delle ondate di calore. Questo non significa che i singoli eventi estremi siano «dovuti» al cambiamento climatico indotto dall'uomo: in genere questi eventi sono complessi e attribuibili a una varietà di cause. Ma significa che le attività umane hanno, con tutta probabilità, influenzato la possibilità del loro verificarsi.

Variazioni delle temperature previste per il XXI secolo

Le proiezioni dei cambiamenti delle temperature alla superficie (relative al periodo 1980-1999), basate su 22 modelli da 17 diversi programmi, sono state calcolate per tre scenari socio-economici. Tutti e tre i casi sono basati su studi realizzati prima del 2000 e non ipotizzano alcuna politica climatica supplementare; in altre parole, non si tratta di scenari di mitigazione.



Daniela Naomi Mohar. Fonte: Climate change 2007: The Scientific Basis, Summary for Policy Makers, Intergovernmental Panel on Climate Change (mappe); Tom Draper Design; iStockphoto; Peter Essick Aurora Photos; Oleg Fedorenko iStockphoto; Daniel Stein iStockphoto; Oleg Fedorenko iStockphoto; Shaun Lowe iStockphoto; Burcu Arat iStockphoto

GLI AUTORI

Gli autori hanno partecipato al Gruppo di lavoro I del rapporto di valutazione IPCC del 2007.

WILLIAM COLLINS è professore ordinario presso il Dipartimento di scienze terrestri e planetarie dell'Università della California a Berkeley, e senior scientist presso il Lawrence Berkeley National Laboratory e il National Center for Atmospheric Research di Boulder, negli Stati Uniti.

ROBERT COLMAN è senior researcher del Climate Dynamics Group dell'Australian Bureau of Meteorology Research Center a Melbourne, in Australia.

JAMES HAYWOOD è il responsabile della ricerca sugli aerosol dell'Observational Based Research Group and the Chemistry, Climate and Ecosystem Group, al Met Office di Exeter, Regno Unito.

MARTIN R. MANNING è direttore dell'Unità di supporto al Gruppo di lavoro I dell'IPCC, NOAA, Earth System Research Laboratory a Boulder, negli Stati Uniti.

PHILIP MOTE è climatologo dello Stato di Washington, ricercatore all'Università di Washington nel Climate Impacts Group, e professore associato del Dipartimento di scienze atmosferiche.

Proiezioni di cambiamenti futuri

Come cambierà il clima nel XXI secolo? A questa domanda si cerca di rispondere con simulazioni basate sulle proiezioni delle emissioni future di gas serra e di aerosol. Le simulazioni suggeriscono che con emissioni di gas serra ai tassi attuali o superiori, i cambiamenti saranno con ogni probabilità di portata maggiore rispetto a quelli osservati nel XX secolo. Anche se le emissioni fossero subito ridotte per stabilizzare le concentrazioni dei gas ai livelli attuali, il cambiamento continuerebbe per secoli. Questa inerzia è il risultato di una combinazione di fattori, tra i quali ci sono la capacità termica degli oceani e il fatto che sono necessari millenni affinché la circolazione oceanica mescoli calore e anidride carbonica in profondità in modo da raggiungere un equilibrio con le nuove condizioni.

In particolare, i modelli prevedono che durante i prossimi vent'anni, per un intervallo verosimile di emissioni, la temperatura globale aumenterà a un tasso medio di circa 0,2 gradi ogni dieci anni, vicino al tasso osservato negli ultimi trent'anni. Circa la metà di questo riscaldamento nel brevissimo termine è un vincolo al futuro cambiamento climatico, derivante dall'inerzia della reazione del sistema climatico alle attuali concentrazioni atmosferiche dei gas serra.

Il riscaldamento a lungo termine del XXI secolo, invece, è fortemente influenzato dalle emissioni future, e le proiezioni coprono una varietà di scenari che vanno da una crescita economica molto rapida a una più modesta, e da una maggiore o minore dipendenza dai combustibili fossili. Le stime migliori dell'aumento delle temperature globali vanno da 1,8 a 4 gradi per i diversi scenari di emissioni. Per gli impatti regionali, le proiezioni indicano con più sicurezza che mai che si verificheranno gli *andamenti* osservati nel corso degli ultimi cinquant'anni (maggiore riscaldamento sulla terra rispetto all'oceano, per esempio), ma l'entità sarà maggiore di quanto non sia stata finora.

Le simulazioni, inoltre, suggeriscono che l'eliminazione dall'atmosfera dell'anidride carbonica in eccesso per via dei processi naturali diventerà meno efficiente con l'aumentare del riscaldamento. Questa mutazione implica che una percentuale più elevata della CO₂ emessa rimarrà nell'atmosfera, accelerando ulteriormente il processo di riscaldamento. Si tratta di un importante *feedback* positivo sul ciclo del carbonio (lo scambio dei composti del carbonio all'interno del sistema climatico). An-

che se i modelli indicano tutti che i mutamenti del ciclo rappresentano un feedback positivo, la gamma delle loro risposte è molto ampia, in relazione tra l'altro a variazioni poco conosciute della vegetazione o dell'assorbimento del carbonio da parte del suolo con un clima sempre più caldo.

I modelli prevedono inoltre che il cambiamento climatico si ripercuoterà sulle caratteristiche fisiche e chimiche degli oceani. Le stime dell'innalzamento del livello dei mari nel corso del XXI secolo vanno dai 30 ai 40 centimetri, e più del 60 per cento è causato dall'espansione termica dell'oceano. Le stime basate sui modelli non comprendono però la possibile accelerazione dello scioglimento dei ghiacci delle calotte della Groenlandia e dell'Artico. La conoscenza di questi effetti è molto limitata, tuttavia potrebbero contribuire a far innalzare il livello del mare di altri 10 o 20 centimetri, e non si esclude l'eventualità di innalzamenti sensibilmente più elevati. La chimica degli oceani ne risentirà, perché diventeranno più acidi con l'aumentare della concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera.

Alcuni dei principali cambiamenti sono previsti per le regioni polari. Tra questi, sensibili aumenti della temperatura sulle terre emerse alle alte latitudini e nella profondità del disgelo nelle aree coperte di permafrost, oltre a pesanti riduzioni nell'estensione del ghiaccio marino estivo nel bacino artico. Alle latitudini più basse si verificheranno probabilmente più ondate di calore, precipitazioni più abbondanti, uragani e tifoni più intensi (forse meno frequenti). La misura in cui uragani e tifoni potranno intensificarsi è ancora oggetto di studio.

Restano alcune importanti incertezze. Per esempio il modo in cui le nuvole risponderanno all'aumento della temperatura è un fattore decisivo che governa l'entità del riscaldamento. La complessità delle nuvole implica che la loro reazione è difficile da definire, e che si deve fare molta ricerca.

Viviamo in un'era in cui sia l'uomo che la natura influenzano l'evoluzione della Terra e dei suoi abitanti. La sfera di cristallo dei modelli climatici si fa più opaca per le previsioni che vanno oltre un secolo. La scarsa conoscenza della risposta dei sistemi naturali e delle società umane ai crescenti impatti del cambiamento climatico aggrava l'incertezza. Un risultato del riscaldamento globale, però, è certo. Piante, animali ed esseri umani dovranno convivere con le conseguenze del cambiamento climatico almeno per i prossimi mille anni. ■

LA PROCEDURA DELL'IPCC

L'IPCC è stato fondato nel 1988 per fornire valutazioni sulle informazioni disponibili, scientifiche e tecniche, riguardanti il cambiamento climatico. La procedura delle valutazioni è stata adottata per assicurare un'elevata credibilità nella comunità scientifica e nella comunità politica.

Le valutazioni globali elencate nei rapporti sono state pubblicate nel 1990, 1995, 2001 e 2007.

I tre Gruppi di lavoro, diversi e indipendenti, esaminano la fisica del cambiamento climatico, gli effetti sulla natura e sulla società, i metodi per mitigarlo.

Gli autori principali, che sono ricercatori in campi di studio rilevanti, sono nominati dai governi. Si fa attenzione a bilanciare i diversi punti di vista così come il sesso, l'età e la nazionalità dei partecipanti.

Un processo di revisione verifica le valutazioni degli autori servendosi di un gruppo di esperti più ampio. Più di 600 esperti hanno rivisto e fornito oltre 30.000 commenti al rapporto del Gruppo di lavoro I, su cui si basa questo articolo.

Ciascuno dei tre gruppi, inoltre, pubblica una *Sintesi per decisori politici* scritta in collaborazione con i delegati dei governi per assicurare un linguaggio che sia chiaro ai decisori politici.

Letture

Tutti i rapporti e le sintesi dell'IPCC sono disponibili all'indirizzo www.ipcc.ch.

Il futuro che ci aspetta

LE CONSEGUENZE DEL RISCALDAMENTO IN ATTO

Il riscaldamento globale è reale e, come ha dichiarato il Gruppo di lavoro I dell'IPCC nel report di gennaio-febbraio 2007, è «molto probabile» che sia in gran parte il risultato delle attività umane dal 1950, come minimo, in poi. Ma questo riscaldamento è abbastanza significativo da creare problemi reali? La risposta ricade sul Gruppo di lavoro II, formato da scienziati di diversi paesi, che si è concentrato sulla vulnerabilità al cambiamento climatico degli ambienti naturali e umani. Nella sintesi dei suoi risultati pubblicata in aprile, il Gruppo di lavoro II ha concluso che il riscaldamento indotto dall'uomo durante gli ultimi 35 anni ha esercitato un'influenza percepibile su molti sistemi fisici e biologici. Le prove osservative provenienti da tutti i continenti e da numerose aree oceaniche mostrano che molti sistemi naturali stanno subendo l'influenza dei mutamenti climatici regionali, in particolare gli aumenti di

temperatura. Il suolo nelle zone di permafrost sta diventando sempre più instabile, le frane nelle aree montuose si fanno più frequenti, gli alberi mettono le foglie in anticipo, alcuni animali e piante si stanno spostando verso latitudini o quote più elevate. Per il futuro, inoltre, il gruppo ha previsto che i cambiamenti climatici potrebbero ripercuotersi sulla salute e sul benessere di milioni di persone in tutto il mondo. La gravità degli effetti dipenderà in modo preciso dall'entità del riscaldamento. Tra le conseguenze più probabili:

- Ondate di calore, inondazioni, tempeste, incendi e periodi di siccità sempre più frequenti aumenteranno i decessi, gli infortuni e le relative malattie.
- Alcune malattie infettive, come la malaria, si diffonderanno in nuove regioni.
- Elevate concentrazioni di ozono al suolo inaspriranno le malattie cardiache e respiratorie.

■ Entro gli anni ottanta di questo secolo, l'innalzamento del livello dei mari provocherà inondazioni che interesseranno milioni di persone, in particolare sugli ampi delta dell'Asia e dell'Africa e sulle piccole isole. I danni procurati da questi cambiamenti saranno più gravi per le comunità povere, maggiormente dipendenti dalle risorse sensibili al clima come l'acqua e il cibo locali, e per definizione con limitate capacità di adattamento economico. Per esempio, temperature più alte danneggeranno la crescita di importanti cereali nei paesi equatoriali, ma per un po' di tempo incrementeranno l'agricoltura alle medie e alte latitudini. Quando l'aumento supererà i tre gradi, il declino agricolo sarà globale.

CENTRO E SUD AMERICA

- Sostituzione della foresta tropicale con la savana nell'Amazzonia orientale
- Sostituzione della vegetazione semiarida con la vegetazione arida
- Specie estinte in molte aree tropicali
- Riduzione della disponibilità di acqua
- Perdita di terra arabile nelle aree più secche
- Diminuzione delle rese per alcune importanti coltivazioni
- Riduzione della produttività del bestiame

momento si stanno avvicinando a 400 ppm). Per gli scienziati, temperature più alte potrebbero scatenare gravi fenomeni alluvionali in alcune regioni e forti siccità in altre, causare l'estinzione di molte specie e provocare il collasso economico. Il loro rapporto analizza in dettaglio le tecnologie e le politiche più promettenti per mantenere i gas al livello di 445 ppm. Sottolinea l'importanza del miglioramento dell'efficienza energetica negli edifici e nei veicoli, ricorrendo a fonti di energia rinnovabili e salvando le foreste come «pozzi di carbonio». Le politiche comprendono un obiettivo per le emissioni globali, programmi di scambio delle emissioni, tetti, tasse e incentivi. Ma gli scienziati hanno effettuato la valutazione prima che uno studio pubblicato sui «PNAS» lo scorso maggio avesse riportato che le emissioni di anidride carbonica a livello mondiale tra il 2000 e il 2004 sono aumentate con un tasso tre volte maggiore di quello registrato negli anni novanta: dall'1,1 al 3,1 per cento all'anno. In altre parole, dal 2000 le emissioni globali sono cresciute più rapidamente rispetto alle proiezioni dello scenario peggiore tra quelli sviluppati dall'IPCC.

CHE COSA SI DEVE FARE

La nostra specie può rispondere al cambiamento climatico in due modi: adattamento e mitigazione. Adattarsi significa capire come sopravvivere e prosperare in un mondo più caldo. Mitigare significa capire come limitare l'entità del riscaldamento futuro riducendo il rilascio netto in atmosfera di gas serra. Visto che siamo già investiti dall'aumento delle temperature e che un aumento ininterrotto sarebbe travolgente, una forte combinazione di adattamento e mitigazione sarebbe essenziale. Purtroppo sappiamo che fino a oggi i disaccordi sulla fattibilità, sui costi e sulla necessità delle mitigazioni hanno bloccato la risposta globale. Allo scopo di progettare strategie di mitigazione per i problemi incombenti, e per i loro costi, nel suo rapporto del 2007 il Gruppo di lavoro III dell'IPCC ha considerato diverse stime per l'espansione economica, la crescita della popolazione e l'uso dei combustibili fossili. I sei scenari risultanti prevedono concentrazioni atmosferiche di equivalenti dell'anidride carbonica (vale a dire gas serra e aerosol equivalenti all'anidride carbonica) che vanno da 445 a 1130 parti per milione (ppm), con aumenti corrispondenti della temperatura da 2,0 fino a 6,1 gradi rispetto ai livelli pre-industriali. Il gruppo stima che il mondo deve stabilizzare la quantità di gas serra nell'atmosfera entro il 2015 a 445 ppm, al fine di mantenere l'aumento globale di temperatura al livello più basso di queste proiezioni. (Al

IL QUADRO REGIONALE

Gli elenchi indicano solo alcuni degli effetti inquietanti, oltre quelli citati nella pagina a fronte, che il Gruppo di lavoro II prevede per diverse parti del mondo nel corso del secolo. La maggior parte di queste previsioni ha una certezza elevata o molto elevata. Per maggiori dettagli, rinviamo alla pagina web www.ucar.edu/news/features/climatechange/regionalimpacts.jsp e al sito dell'IPCC (www.ipcc.ch).

NORD AMERICA

- Sui rilievi occidentali, riduzione delle nevi, aumento delle inondazioni invernali e riduzione dei corsi d'acqua in estate
- Lungo periodo di rischio elevato di incendi e aumento delle aree bruciate
- Aumento dell'intensità, della durata e del numero di ondate di calore nelle città già colpite dal fenomeno
- Sulle coste, aumento della pressione su persone e proprietà a causa dell'interazione del clima con lo sviluppo e gli inquinanti

EUROPA

- Aumento del rischio di inondazioni improvvise nell'interno
- Al Sud, aumento delle ondate di calore pericolose per la salute e degli incendi, minore disponibilità di acqua e riduzione della potenza idroelettrica, produzione delle coltivazioni a rischio e riduzione del turismo estivo
- Nelle aree centrali e orientali, aumento delle ondate di calore pericolose per la salute e degli incendi nelle torbiere, riduzione delle piogge estive e della produttività delle foreste
- Al Nord, alla fine gli impatti negativi supereranno i benefici iniziali quali la riduzione della domanda di riscaldamento, l'aumento delle rese delle coltivazioni e la crescita delle foreste

ASIA

- Aumento delle inondazioni, delle frane e sconvolgimento delle risorse idriche
- Rischio continuo di fame in numerose regioni in via di sviluppo a causa della minore produttività agricola e del rapido aumento della popolazione e dell'urbanizzazione

AUSTRALIA E NUOVA ZELANDA

- Entro il 2030 aumento dei problemi di sicurezza idrica nell'Australia dell'est e del sud, e in parti della Nuova Zelanda
- Entro il 2020 ulteriore perdita di biodiversità nei siti ecologicamente ricchi
- Aumento di gravità e frequenza delle tempeste

PICCOLE ISOLE

- Pericoli per le infrastrutture vitali, gli insediamenti e gli impianti a causa dell'aumento del livello dei mari
- Entro la metà del secolo diminuzione delle risorse idriche in molte aree
- Erosione delle spiagge, sbiancamento dei coralli e altre condizioni che deteriorano le coste, danneggiano la pesca e riducono il valore turistico dei luoghi
- Invasione di specie aliene, specialmente nelle isole alle medie e alte latitudini

REGIONI POLARI

- Diminuzione dello spessore e dell'estensione dei ghiacciai e delle calotte glaciali
- Cambiamenti nell'estensione del ghiaccio marino artico e del permafrost
- Disgelo più profondo del permafrost

AFRICA

- Entro il 2020, da 75 milioni a 250 milioni di persone avranno una minore disponibilità idrica
- Perdita di terra coltivabile, diminuzione delle stagioni di crescita e della resa in alcune aree
- Calo delle riserve ittiche nei grandi laghi

Daniela Naomi Molnar (mappa); fonti: University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) e IPCC