

# Variabilità climatica naturale e proiezioni future del cambiamento climatico, con particolare attenzione all'Artico

di *Michele Rebesco* e *Angelo Camerlenghi*

OGS - Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale

## Sommario

Nella storia geologica del nostro pianeta periodi caldi e glaciali si sono alternati e si va verso un generale graduale raffreddamento. I fattori del cambio climatico sono molteplici e intercorrelati. Per prevedere gli scenari climatici futuri occorre analizzare gli indicatori indiretti del clima del passato. Le proiezioni future sono preoccupanti e l'esposizione ai rischi naturali è inevitabilmente in aumento.

## Parole chiave

cambio climatico, paleo-clima, anidride carbonica, indicatori indiretti, archivi geologici, ghiacciai polari, Artico, livello del mare, rischi naturali.

## Summary

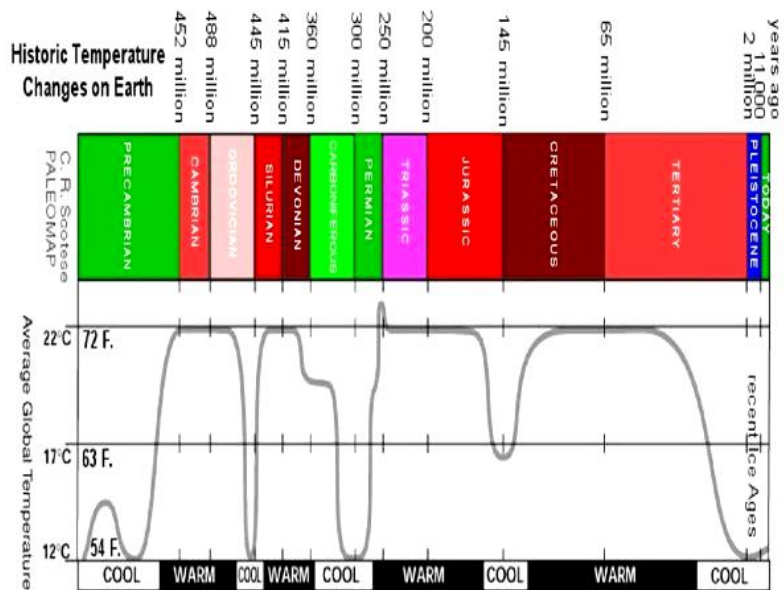
In the geologic history of our planet, warm and glacial periods have alternated and we go towards a general gradual cooling. Climate change factors are multiple and interrelated. In order to predict future climate scenarios, it is necessary to analyze the proxies for the past climate. Future projections are worrying and exposure to natural hazards is inevitably rising.

## Keywords

climate change, paleo-climate, carbon dioxide, proxies, geological archives, polar glaciers, Arctic, sea level, natural hazards.

La ricerca polare è uno dei pilastri del nostro Istituto di Ricerca, l'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS). E infatti l'Italia è particolarmente attiva nella ricerca polare, finanziata in generale dal Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (MIUR) tramite il Programma Nazionale per la Ricerca in Antartide (PNRA), e nello studio del cambiamento climatico (ad esempio tramite il dottorato in "Scienza e gestione del cambiamento climatico" presso l'Università Ca' Foscari di Venezia, a cui partecipa anche l'OGS).

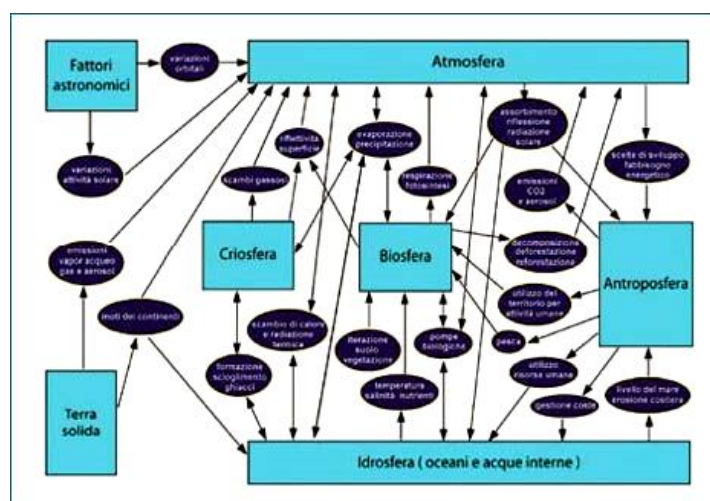
La prima cosa da sapere sul cambiamento climatico è che nella lunga storia del nostro pianeta (a partire da oltre 4 miliardi di anni fa) ci sono stati diversi periodi glaciali e periodi caldi (**Figura 1**)



**Figura 1.** Variazioni della temperatura media globale nel corso delle varie epoche geologiche.

Nei periodi caldi, le concentrazioni atmosferiche di anidride carbonica arrivavano fino a 10 volte l'attuale, le temperature erano superiori anche di parecchi gradi, e non esistevano calotte polari. Questi cambiamenti non hanno portato ad estinzioni di massa e gli ecosistemi si sono lentamente adattati. Inoltre, negli ultimi 60 milioni di anni si sta verificando un graduale raffreddamento, con il passaggio dal cosiddetto “Mondo Serra” (Green House World, in Inglese) al “Mondo di Ghiaccio” (Ice House World, in Inglese). Nonostante questa generale (geologica) tendenza al raffreddamento del nostro pianeta, è sotto gli occhi di tutti il riscaldamento in atto a scala più breve (centennale). La velocità di questo cambiamento sembra non avere precedenti e non sappiamo se l'ecosistema umano è abbastanza adattabile a questo cambiamento così rapido.

La seconda cosa, è che i fattori del cambio climatico sono molteplici e inter-correlati (**Figura 2**).



**Figura 2.** Una scomposizione del sistema clima in sottosistemi e relative interazioni

Questi includono:

- la tettonica a placche, che controllando la distribuzione dei continenti, dirige la circolazione oceanica ed atmosferica (e quindi lo scambio di calore terrestre), e il contenuto atmosferico di anidride carbonica e polvere (che influenzano l'effetto serra);
- la circolazione oceanica o "termosalina" (cioè controllata dalle variazioni di temperatura e salinità delle acque), che è il grande scambiatore di calore planetario trasportando masse di acqua fredda ai tropici e acqua calda verso i poli;
- il vulcanismo, che controlla l'immissione di gas a effetto serra in atmosfera e la chimica degli oceani (e di conseguenza la loro produttività biologica e la loro possibilità di "sequestrare" sul fondo l'anidride carbonica ad effetto serra);
- le variazioni nell'orbita terrestre, che controllano la quantità di insolazione Terrestre, e quindi la quantità di calore ricevuto dal nostro pianeta. Queste variazioni hanno periodicità milankoviane (dal nome del loro scopritore, lo scienziato Serbo Milutin Milanković) che corrispondono a 100.000 anni (dovute a modificazioni nell'eccentricità dell'orbita terrestre), 41.000 anni (dovute a oscillazioni dell'inclinazione dell'asse di rotazione terrestre rispetto alla perpendicolare del piano dell'orbita), 21-25.000 anni (dovute alla precessione degli equinozi, cioè la variazione della direzione dell'asse terrestre misurata rispetto alle stelle fisse) e loro combinazioni armoniche (frequenze il cui valore è multiplo della frequenza base);
- l'attività solare, con ciclicità di circa 11 anni, che controlla l'insolazione Terrestre;
- i gas a effetto serra (principalmente vapore acqueo, anidride carbonica e metano), che contribuiscono a trattenere all'interno dell'atmosfera terrestre gran parte della radiazione termica solare (cioè del calore proveniente dalla nostra stella);
- il ruolo delle aree polari, con lo scioglimento dei ghiacci che contribuisce ad aumentare il livello del mare e a ridurre l'albedo (che è la percentuale di radiazione termica solare riflessa dalla superficie Terrestre, in funzione del colore della superficie stessa). Minori sono le aree coperte da neve e ghiaccio (quindi molto chiare) e maggiore è l'assorbimento di calore da parte del nostro pianeta.

La terza è che le informazioni sul clima del passato geologico sono ottenute attraverso una serie di indicatori indiretti (proxies, in Inglese) di una certa proprietà fisica (ad esempio la temperatura del mare in un certo momento del passato). Ci sono diverse fonti di informazioni paleoclimatiche e diversi indicatori indiretti (**Figura 3**).



**Figura 3.** Visualizzazione delle diverse sorgenti di informazioni paleoclimatiche (archivi) e degli indicatori climatici indiretti.

Per poter essere utilizzati, questi indicatori, devono essere corredati da una informazione circa l'età del campione, cioè il momento geologico a cui si riferiscono. Le età geologiche sono ottenute per mezzo di una serie di metodi, tra cui le datazioni radiometriche che sono basate sul decadimento radioattivo di isotopi instabili. Infatti, essendo noto il tempo di dimezzamento (cioè il tempo occorrente perché la metà degli atomi di un campione puro dell'isotopo decadano in un altro elemento), è possibile risalire all'età di un oggetto raffrontando le abbondanze osservate di un opportuno isotopo radioattivo (ad esempio il Carbonio-14) e quelle dei suoi prodotti di decadimento.

Gli indicatori che si possono analizzare nei campioni di sedimenti marini comprendono tra gli altri:

- la quantità di detriti lasciati cadere in mare dallo scioglimento degli iceberg, che ci danno una misura della variazione dell'estensione dei ghiacci e quindi del livello del mare e della temperatura.

- il tipo (abbondanza e composizione) di zooplancton marino calcareo (tra cui i foraminiferi), che dipende dalla temperatura e salinità delle acque, disponibilità di nutrienti e abbondanza di predatori, dal rilascio di acqua dolce (causato dallo scioglimento dei ghiacci) e dalla presenza di ghiaccio marino.

- le variazioni nella percentuale di isotopi stabili all'interno dei gusci calcarei del plankton marino. Quelli dell'Ossigeno (O-18 e O-16) sono largamente usati per ricostruire le temperature delle acque circostanti e sono influenzati anche dalla salinità (in funzione di evaporazione e rilascio di acqua dolce). Quelli del Carbonio (C-12 e C-13) riflettono il micro-habitat in cui vive il plankton e sono influenzati dalla produttività primaria. Il rapporto Magnesio/Calcio è un indicatore della temperatura, ma non influenzato dalla salinità e quindi permette di risolvere le ambiguità nel significato delle variazioni degli isotopi dell'Ossigeno (ma in compenso ha lo svantaggio di essere dipendente dal tipo di specie di plankton analizzata).

- altri tipi di micro-organismi planktonici marini, tra cui coccolitoforidi, diatomee, radiolari e dinoflagellati.
- il rapporto Carbonio/Azoto, che permette di capire se la materia organica nei sedimenti marini è di origine terrestre o marina.
- i composti organici nei lipidi delle membrane di alcuni organismi marini, che anche danno un indizio sulla temperatura.
- i coralli di acqua profonda (che vivono anche in condizioni di buio e freddo), che in maniera simile agli alberi hanno degli anelli concentrici di accrescimento che permettono di ricostruire la storia climatica Terrestre per mezzo degli isotopi stabili e instabili che compongono il loro scheletro calcareo. Sono buoni indicatori delle condizioni ambientali (ad es. temperatura e acidità delle acque) e delle condizioni biologiche (ad esempio la disponibilità di nutrienti e la dinamica della rete alimentare).

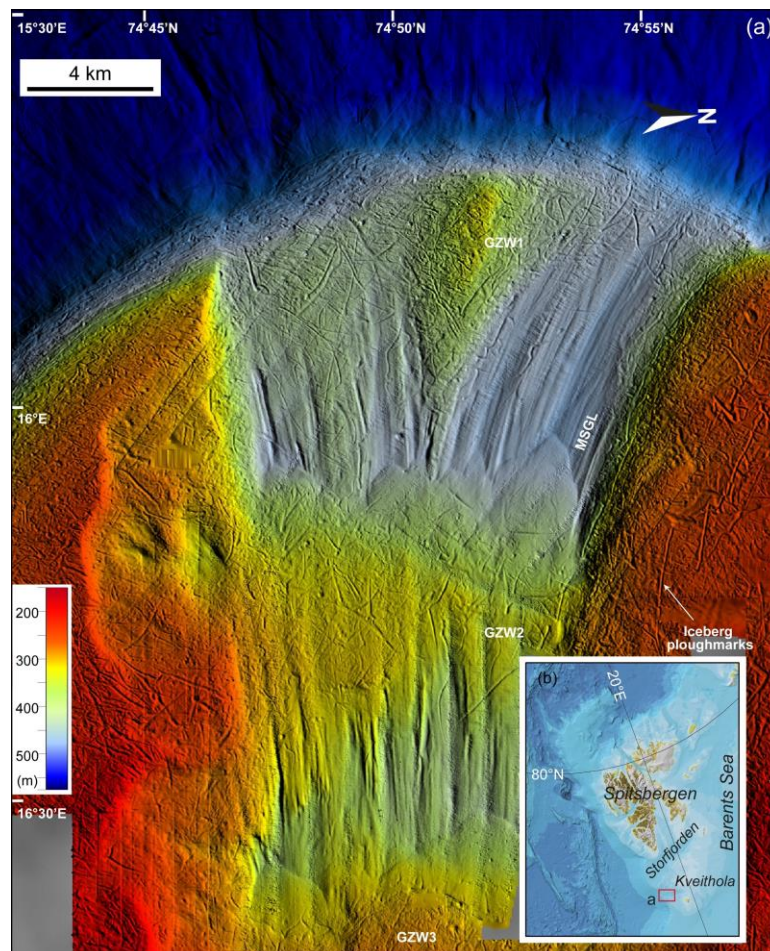
Un'altra sorgente di informazioni paleoclimatiche molto importanti si ricava dalle carote di ghiaccio raccolte nelle calotte polari (ad es. presso la base Franco-Italiana Concordia in Antartide). In queste carote vengono analizzate le particelle di polvere e le composizioni isotopiche del ghiaccio e dell'anidride carbonica e metano contenuti nelle "bolle d'aria" all'interno del ghiaccio stesso. Questo tipo di informazioni è a maggiore risoluzione rispetto a quello contenuto nelle carote di sedimento (capace di risolvere al massimo le variazioni millenarie) ma risale meno indietro nel tempo (solo fino a circa 1 milione di anni fa, contro i vari milioni nei sedimenti marini). Nei sedimenti lacustri (alpini o delle alte latitudini) la risoluzione può essere ancora maggiore, addirittura annuale o stagionale, perché i depositi ritmici (varve) formati da alternanze fittissime e sottili di sabbie e argille che si depositano annualmente sul fondo dei laghi hanno caratteri diversi a seconda della stagione.

Per prevedere gli scenari climatici futuri occorre prima analizzare e comprendere epoche passate in cui le temperature e le concentrazioni atmosferiche di anidride carbonica erano più elevate di quelle attuali, e quindi simili a quelle che ci aspettiamo per la fine di questo secolo. Tuttavia, per poter trovare analoghi simili occorre andare indietro nel tempo molto più a lungo di quanto è permesso dalle carote di ghiaccio e dai sedimenti lacustri. Occorre risalire ad epoche di almeno 3 milioni di anni fa o anche più. Per questo è fondamentale studiare gli "archivi" dei cicli glaciali-interglaciali contenuti nei sedimenti marini.

Bisogna sapere allora che questi sedimenti possono essere portati in mare da sistemi fluviali (alle basse latitudini) o da sistemi glaciali (alle alte latitudini). I primi sono modulati dal livello del mare e il loro studio quindi permette di ricostruire questo tipo di informazione. I secondi sono controllati invece dalla dinamica delle calotte glaciali e il loro studio permette quindi di comprendere meglio le variazioni climatiche e le ciclicità glaciali-interglaciali.

Per questo scopo si indagano le grandi conoidi sottomarine che si sviluppano sui margini continentali delle alte latitudini allo sbocco di fosse glaciali. Questi grandi accumuli di sedimento marino si generano proprio in quei punti perché è lì che il ghiaccio è più dinamico. Il ghiaccio nelle calotte polari infatti non è tutto uguale. Il ghiaccio continentale all'interno delle grandi calotte glaciali contiene dei veri e propri "fiumi di ghiaccio" (icestream, in Inglese) che fluiscono a velocità di oltre 1 km/anno e sono separati da zone di ghiaccio meno dinamiche. Le calotte glaciali (spesse fino a 4 km) si prolungano poi in mare per mezzo di piattaforme di ghiaccio galleggianti (spesse anche più di 200 metri). Da qui si distaccano gli iceberg che galleggiano nei mari polari, in cui si trova anche il ghiaccio marino (che, a differenza di quello continentale e delle piattaforme, si è formato direttamente in mare).

Nel loro fluire verso il mare gli icestream scavano delle lunghe fosse glaciali (che partono dal continente e arrivano fin sul mare a parecchi chilometri dalla costa) e lasciano sul fondo i segni del loro passaggio: delle striature giganti che sono larghe centinaia di metri e possono essere lunghe parecchie decine di chilometri (**Figura 4**).



**Figura 4.** Immagine del fondo mare nel Mare di Barents ottenuta con ecoscandaglio che mostra diverse striature giganti prodotte dal fluire dei ghiacci nel passato.

Allo sbocco di queste fosse (dove il fondo del mare si approfondisce oltre qualche centinaio di metri) si sviluppano le grandi conoidi sottomarine. Infatti è qui che il

sedimento è trasportato dai fiumi di ghiaccio per mezzo di una serie di processi. Tra questi, l'effetto buldozer dei ghiacciai, le acque di scioglimento all'interno di tunnel sub-glaciali, e le colate in massa di detrito che per gravità fanno scivolare verso il mare profondo i sedimenti lasciati dal ghiaccio poco oltre la costa.

Nelle conoidi si trovano alternanze di sedimenti depositi dalle colate in massa di detrito durante i massimi glaciali e sedimenti meno "consistenti" (a elevato contenuto d'acqua) depositi direttamente in mare durante i periodi inter-glaciali. Questa alternanza di diversi tipi di sedimenti risulta pericolosa in quanto instabile e favorisce il distacco di grandi frane sottomarine, che possono colpire le infrastrutture umane (piattaforme petrolifere, cavi di telecomunicazione, etc...) e/o generare tsunami.

Un altro elemento importante nell'Artico è la presenza di metano. Il metano è un idrocarburo in forma gassosa (alle temperature e pressioni a cui siamo abituati noi). Può essere immesso nell'ambiente naturale dall'uomo (tramite le discariche di rifiuti, la produzione di idrocarburi, le miniere di carbone, la gestione dello stallatico e del bestiame, il trattamento delle acque e la coltivazione del riso) o da altre sorgenti naturali (dalle zone umide, dai termitai, dal mare - per digestione dello zooplankton e metanogenesi spontanea nei sedimenti, dalla crosta terrestre per frazionamento di materiali profondi, e dai gas idrati). Nelle alte latitudini il metano si può trovare imprigionato proprio in forma di gas idrati (composti con acqua allo stato solido e gas imprigionato nel reticolo dei cristalli di ghiaccio) all'interno del permafrost (suolo ghiacciato con temperatura permanentemente sotto lo zero per almeno due anni). I gas idrati conservati nei sedimenti marini possono dissociarsi (sciogliersi) a causa del riscaldamento climatico e risalire nella colonna d'acqua marina. I gas idrati sono molto importanti, sia come potenziale sorgente di energia, che fonte di geo-rischio (dissociandosi destabilizzano i pendii sottomarini con conseguente genesi di frane), ma soprattutto come controllori naturali del cambiamento climatico. Infatti, c'è un processo di feed-back che coinvolge gas idrati e cambiamento climatico: il riscaldamento aumenta le emissioni di metano, che a sua volta rafforza l'effetto serra e riscalda la Terra, che a sua volta genera ulteriori emissioni di metano, e così via...

A livello globale, l'organismo internazionale per la valutazione della scienza relativa ai cambiamenti climatici è il gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico (IPCC). L'IPCC è stato istituito nel 1988 dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO) e dal Programma delle Nazioni Unite per l'Ambiente (UNEP) per fornire ai responsabili politici valutazioni periodiche della base scientifica del cambiamento climatico, dei suoi impatti e dei rischi futuri, e le opzioni per l'adattamento e la mitigazione.

A livello Artico, il Programma di Monitoraggio e Valutazione dell'Artico (AMAP), uno dei sei gruppi di lavoro del Consiglio Artico, ha il mandato di:

- Monitorare e valutare lo stato della regione artica rispetto all'inquinamento e ai cambiamenti climatici.

- Documentare i livelli e le tendenze, i processi e gli effetti sugli ecosistemi artici e sugli esseri umani e proporre ai governi le azioni per ridurre le minacce associate.

- Produrre valutazioni, con basi scientifiche, rilevanti per la politica e documenti per la divulgazione per informare il grande pubblico circa le politiche e i processi decisionali in Artico. Uno di questi documenti è la Valutazione dell'Impatto Climatico in Artico (ACIA) da cui abbiamo preso molte delle informazioni che seguono.

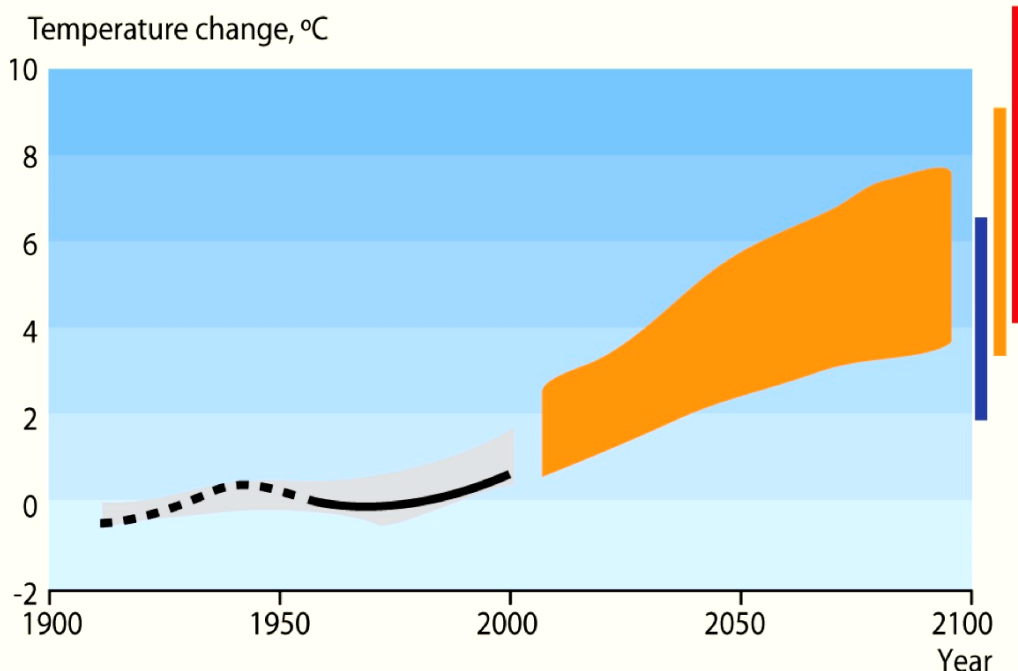
Le proiezioni per gli scenari futuri sono preoccupanti, specialmente in Artico. L'Artico si sta scaldando (attualmente) da due a tre volte più velocemente della media globale e ci si aspetta che si scaldi più di qualsiasi altra zona del pianeta. Gli inquinanti climatici a vita breve (Short Lived Climatic Pollutants, in Inglese) che rimangono in atmosfera per periodi compresi tra qualche giorno a poche decine di anni, contribuiscono a aumentare lo scioglimento dei ghiacci artici, e la fuliggine (black carbon, in Inglese) depositata sulla superficie di neve e ghiaccio amplifica il surriscaldamento (perché le superfici scure hanno minor albedo, cioè assorbono più calore). Una rapida applicazione delle misure per la riduzione di questi inquinanti potrebbe aumentare le possibilità di contenere l'aumento della temperatura globale entro i due gradi centigradi rispetto ai livelli pre-industriali. Le ricostruzioni climatiche per l'Artico durante il ventesimo secolo confermano infatti che l'anidride carbonica è il principale forzante del sistema climatico Artico. Tra le misure per la riduzione di questi inquinanti, c'è l'accordo di Parigi (Cop 21) che è un accordo globale sui cambiamenti climatici che è stato raggiunto il 12 dicembre 2015 a Parigi. La Cop 21 è la ventunesima conferenza annuale delle parti, l'organo della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (United Nations framework convention on climate change, in Inglese), il trattato che conta l'adesione di 196 paesi e aperto alle firme durante la Conferenza sull'ambiente e lo sviluppo di Rio de Janeiro, in Brasile, del 1992. L'accordo di Parigi si applicherà a partire dal 2020 e prevede un piano d'azione per limitare il riscaldamento globale "ben al di sotto" dei 2°C.

La storia geologica più recente è stata caratterizzata da epoche glaciali. Le temperature sono state basse e le calotte glaciali hanno coperto gran parte del mondo. La storia più recente mostra temperature crescenti dopo la "piccola era glaciale" intorno al 1850. Con l'epoca industriale il livello di anidride carbonica nell'atmosfera è aumentato.

La concentrazione di anidride carbonica in atmosfera, che era attorno alle 280 parti per milione (ppm) per circa 10.000 anni fino all'inizio dell'era industriale e attualmente già oltre 400 ppm, potrebbe arrivare ad oltre 700 ppm per la fine del nostro secolo secondo certi scenari più pessimistici. Questo condurrebbe ad un aumento della temperatura dell'aria in Artico di quasi 8 gradi in media (**Figura 5**) e con picchi di oltre 12 gradi in certe zone.



## Arctic surface air-temperature change



**Figura 5.** Aumento medio della temperatura superficiale dell'aria in Artico, misurata dal 1900 ad oggi e possibile andamento fino all'anno 2010 (in arancione). Le barre colorate sulla destra rappresentano i vari scenari ipotizzabili per la fine del secolo.

Il previsto incremento delle temperature in Artico, implica diversi effetti, tra cui la diminuzione dell'area in condizioni di permafrost (ad esempio tundra), lo spostamento verso nord del limite delle foreste, la diminuzione del ghiaccio marino, l'apertura di nuove vie navali di comunicazione.

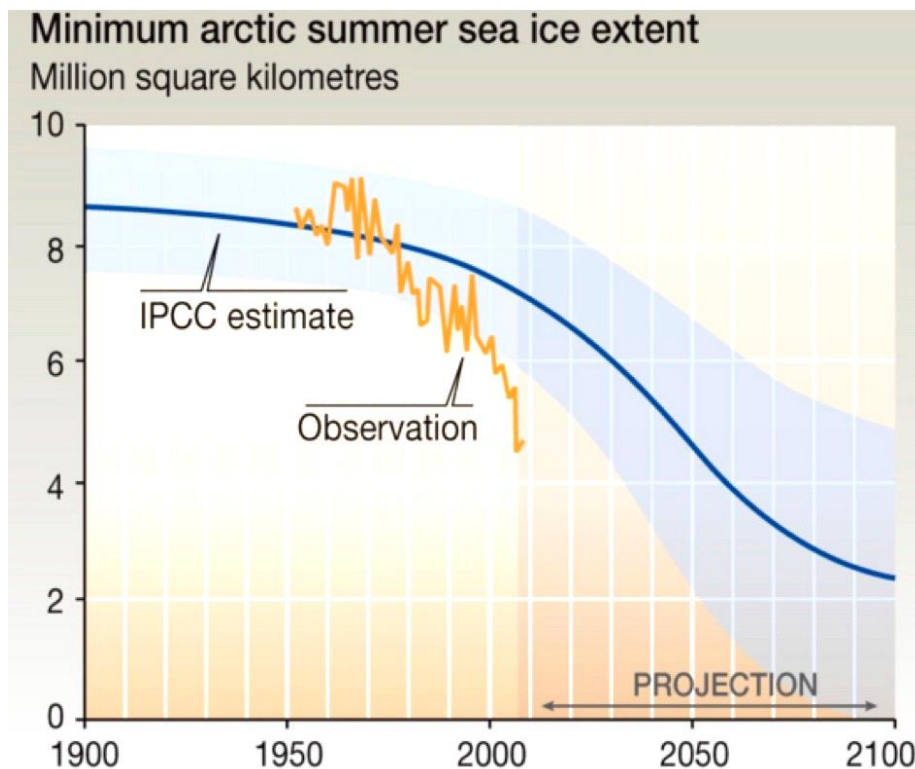
I dati relativi al monitoraggio satellitare dal 1966 al 2005 mostrano che l'estensione media delle coperture nevose nell'emisfero settentrionale diminuisce ad un tasso del 1,3% al decennio. Ad esempio, nell'anno 2006 l'estensione media della neve è stata di circa 25 milioni di km quadrati, pari a 0,6 milioni di km quadrati in meno rispetto alla media dei 37 anni precedenti. Nell'emisfero settentrionale, la primavera e l'estate mostrano forti diminuzioni della copertura della neve. L'estensione media della copertura nevosa durante i tre mesi estivi nell'area artica di Eurasia e Nord America è diminuita di 22.000 km quadrati all'anno durante il 1968-2008.

La neve rappresenta un aspetto importante per gli ecosistemi, la disponibilità di acqua dolce e le attività umane. Secondo i modelli, la diminuzione della copertura nevosa prevista entro la fine di questo secolo potrebbe arrivare al 60-80 per cento (in meno) alle medie latitudini (tra cui l'Europa), mentre è previsto un aumento nell'Artico canadese e in Siberia. Poiché il riscaldamento climatico favorisce l'aumento di umidità atmosferica a causa dell'evaporazione e quindi l'aumento delle nevicate, è previsto un ispessimento nella parte centrale della calotta della Groenlandia. E in effetti questo si è verificato dagli inizi degli anni '90 con un tasso che è aumentato fino a circa 4 cm all'anno dopo il 2000. Tuttavia, questo guadagno di massa è ben superato dalle perdite associate a grandi

scioglimenti della calotta nelle sue parti più periferiche vicino alla costa. La diminuzione media della calotta è più che raddoppiata, da poche decine di miliardi di tonnellate all'anno nei primi anni 1990, a circa 100 miliardi di tonnellate all'anno dopo il 2000. Questa diminuzione in rapido aumento deriva in parte da un maggiore scioglimento durante le estati, che sono più calde, e in parte dall'aumento del rilascio in mare di iceberg da parte dei ghiacciai.

Il ghiaccio marino in Artico costituisce l'habitat della fauna selvatica e un fattore importante nel sistema di circolazione oceanica globale. Il maggiore scioglimento del ghiaccio marino in Artico sta rendendo le acque di quei mari meno salate e quindi meno dense. Se l'attuale tendenza non si inverte, questa acqua meno densa non sarà in grado di affondare e circolare nelle parti più profonde dell'oceano come avviene attualmente. La fusione del ghiaccio marino Artico potrebbe quindi potenzialmente interrompere o rallentare la circolazione oceanica globale (Global Ocean Conveyor, in Inglese). Paradossalmente, questa interferenza nella circolazione oceanica causata dal riscaldamento globale potrebbe portare ad un raffreddamento nell'Europa occidentale. Attualmente le correnti oceaniche portano calore dai tropici fino alle alte latitudini. Quel caldo si perde nell'atmosfera mantenendo le temperature di luoghi come l'Inghilterra, la Norvegia e molti altri paesi dell'Europa settentrionale un po' più miti di altri posti alla stessa latitudine. Se il Global Ocean Conveyor si interrompesse completamente, la temperatura media dell'Europa settentrionale si raffredderebbe da 5 a 10 gradi, ma anche solo un rallentamento potrebbe portare ad un sensibile raffreddamento. Ma lo scioglimento del ghiaccio marino ha anche evidenti conseguenze per la fauna. Il ghiaccio marino, per esempio, è utilizzato dagli orsi polari per cacciare. Purtroppo, gli orsi devono così nuotare più a lungo, 60 miglia o più, attraverso il freddo oceano artico per arrivare da un pezzo di ghiaccio all'altro. Gli orsi polari sono la prima specie che è stata aggiunta all'elenco delle specie minacciate direttamente a causa del riscaldamento globale. Molte comunità marine dipendono dagli orsi polari, tra cui trichechi, foche, balene, uccelli e altri animali marini. I cambiamenti nella popolazione degli animali artici e dei loro territori possono influenzare notevolmente il modo di vivere delle comunità umane che sono insediate nei territori settentrionali.

Inoltre, lo scioglimento di ghiaccio marino è un indicatore del cambiamento climatico. Settembre è il mese con la minore estensione di ghiaccio marino in Artico. L'estensione media viene monitorata con le osservazioni satellitari dal 1979. L'andamento è di una progressiva diminuzione media del 13,3%/per decade. L'estensione del ghiaccio era 7,87 milioni di km quadrati nel 1996 (massimo dopo il 1979) e un minimo di soli 3,62 milioni di km quadrati nel 2012. Questa drammatica diminuzione va al di là delle proiezioni fatte da IPCC nel 2007 (**Figura 6**).



**Figura 6.** Grafico dell'andamento negli anni della estensione minima (a settembre) del ghiaccio marino in Artico confrontata con le stime dell'IPCC.

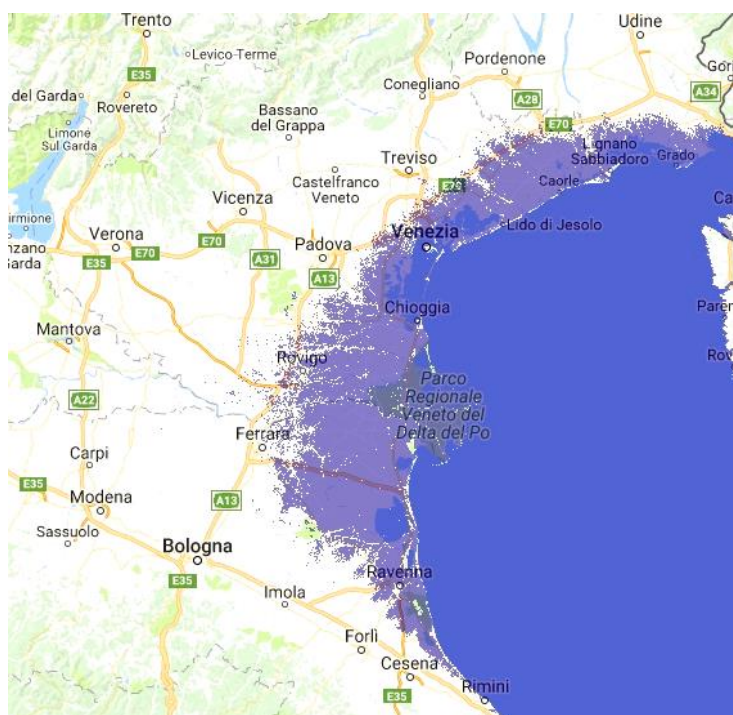
Non è solo l'estensione e la concentrazione del ghiaccio marino artico che sta cambiando, ma anche l'età. Gli studi dimostrano che negli ultimi anni c'è una percentuale più elevata di ghiaccio più giovane rispetto a quanto osservato alla fine degli anni '80. Anche lo spessore della parte del ghiaccio marino che è sommerso sotto il livello di galleggiamento sta diminuendo. I dati delle crociere sottomarine tra il 1993 e il 1997, confrontati con dati simili acquisiti tra il 1958 e il 1976, indicano che lo spessore medio alla fine della stagione estiva è diminuito di circa 1,3 m nella maggior parte dell'Oceano Artico (da 3,1 m nel 1958-1976 a 1,8 m negli anni '90). In sintesi, lo spessore del ghiaccio marino sommerso è sceso da oltre 3 metri negli anni 60 a meno di 2 metri negli anni 90 e il volume è diminuito di circa il 40%.

I cambiamenti previsti, come la riduzione di ghiaccio marino, sono drammatici per gli ecosistemi artici nel prossimo secolo. Comprendere come le risorse biologiche dell'Artico, comprese le sue specie di vertebrati, rispondono a questi cambiamenti è essenziale per sviluppare strategie efficaci di conservazione e adattamento. Ad esempio, il merluzzo polare (*Boreogadus saida*) è sensibile al riscaldamento e si prevede che in 30 anni si estinguerà nella maggior parte delle aree, anche secondo lo scenario di riscaldamento più mite (ritiro del ghiaccio marino a un tasso di 5 km all'anno). Il tasso di invasioni biologiche marine (specie che appartengono ad altri ecosistemi) è in aumento a causa dell'aumento delle comunicazioni navali. Il fatto che il cambiamento climatico favorisce l'espansione del traffico marino in Artico ha una rilevanza potenzialmente molto grande per i futuri rischi di invasione biologica nelle acque artiche. Infatti, due navi tedesche che trasportavano merci coreane da Vladivostok ai

Paesi Bassi lungo la rotta del Mare del Nord nell'agosto del 2009 sono state solo le prime navi commerciali che hanno attraversato l'Artico senza l'aiuto di rompighiaccio. L'invasione biologica è ampiamente riconosciuta come un importante fattore di rischio per l'estinzione delle specie native e può essere meno reversibile rispetto all'alterazione degli habitat.

Gli effetti combinati delle specie invasive e dei cambiamenti climatici sulla biodiversità e sulla funzione dell'ecosistema possono essere molto importanti. L'impatto delle specie invasive non è limitato al danno ecologico. Un sottoinsieme di appena 16 delle oltre 1400 specie invasive identificate dal Canada ha già avuto un impatto economico annuo di decine miliardi di Dollari Canadesi.

Il livello medio del mare continuerà drammaticamente a crescere. I modelli prevedono un aumento del livello medio del mare tra i 13 e i 94 cm per la fine del nostro secolo. Durante la prima metà del secolo, le emissioni di gas ad effetto serra hanno un effetto relativamente minore sull'aumento del livello del mare. Questo è dovuto all'elevata inerzia termica del sistema climatico oceano-ghiaccio-atmosfera. Ma ha effetti sempre più grandi nella seconda metà del secolo. Inoltre, a causa dell'inerzia termica degli oceani, il livello del mare continuerà a salire per molti secoli oltre il 2100, anche se a quel tempo avremo stabilizzato le concentrazioni di gas a effetto serra. Cosa può voler dire un innalzamento di 90 cm per gli attuali insediamenti costieri? Ci sono molti studi scientifici ed economici in tal senso. Ma per dare un'idea in maniera semplice possiamo guardare alla visualizzazione basata su Google Maps per vedere l'effetto di 1 metro di innalzamento del livello del mare nella Pianura Padana (**Figura 7**).



**Figura 7.** Immagine basata su Google Maps che mostra l'effetto di 1 metro di innalzamento del livello del mare nella Pianura Padana.

Con l'aumento della popolazione e la crescente quantità di infrastrutture, l'esposizione globale ai rischi naturali è inevitabilmente in aumento. Ci si domanda se l'aumento percepito è reale o semplicemente dovuto ad un significativo miglioramento dell'accesso alle informazioni. Quale parte gioca la crescita della popolazione e lo sviluppo delle infrastrutture? C'è il cambiamento climatico dietro la crescente frequenza dei rischi naturali? La risposta sembra essere "sì". Infatti, negli ultimi 30 anni il numero medio annuale dei rischi naturali apparentemente non correlati al cambio climatico (ad esempio terremoti) sono aumentati leggermente (molto probabilmente dovuto alla migliore capacità di monitorarli) mentre i rischi prevedibilmente associati al cambio climatico (ad esempio alluvioni e tempeste) sono aumentati drasticamente. Il riscaldamento globale significa temperature medie crescenti e una sua conseguenza è l'aumento del vapore acqueo nell'atmosfera. Questo è dovuto, sia all'aumento dell'evaporazione delle acque degli oceani sia al fatto che più l'aria è calda e più vapore acqueo può contenere. Alti livelli di vapore acqueo nell'atmosfera, a sua volta, creano condizioni più favorevoli per precipitazioni più intense sotto forma di piogge violente e tempeste di neve.

## Didascalie

**Figura 1:** Fonte: <http://www.testingworldviews.com/6globalwarming.html> sulla base di dati e immagini di Christopher Scotese alla Chicago University (<http://www.scotese.com/climate.htm>)

**Figura 2.** Fonte: figura adattata da P. Lionello, "Il sistema clima e il ruolo degli oceani", in *Kyoto e dintorni. I cambiamenti climatici come problema globale* (a cura di A. Pasini), Franco Angeli 2006, Milano)

**Figura 3.** Fonte: [https://www2.usgs.gov/climate\\_landuse/clu\\_rd/paleoclimate/](https://www2.usgs.gov/climate_landuse/clu_rd/paleoclimate/)

**Figura 4.** Fonte: Rebesco M., Urgeles R., Özmaral A., Coribar Scientific Party, 2016. Grounding Zone Wedges, Kveithola Trough (NW Barents Sea). In: Dowdeswell J.A., Canals M., Jakobsson M., Todd B.J., Dowdeswell E.K., Hogan K.A. (Eds.) *Atlas of Submarine Glacial Landforms*. Geological Society of London Memoir 46, 231-232, doi:10.1144/M46.32

**Figura 5.** Fonte: <https://www.grida.no/resources/6598>

**Figura 6.** Fonte: <https://www.grida.no/resources/6643>

**Figura 7.** Fonte: <http://flood.firetree.net/>

## **Lecture consigliate**

Diaz D., Moore F., 2017. Quantifying the economic risks of climate change, *Nature Climate Change* 7, 774–782.

Letcher T. (Ed.), 2015. *Climate Change, 2nd Edition, Observed Impacts on Planet Earth*. Elsevier. pp. 632.

Oreskes N., 2017. The Scientific Consensus on Climate Change. *Science* 306, Issue 5702, pp. 1686, DOI: 10.1126/science.1103618.

Rebesco M., Domack E., Zgur F., Lavoie C., Leventer A., Brachfeld S., Willmott V., Halverson G., Truffer M., Scambos T., Smith J., E. Pettit, 2014.

Boundary Condition of Grounding Lines Prior to Collapse, Larsen-B Ice Shelf, Antarctica. *Science*, 12 September 2014, Vol. 345, #6202, 1354-1358.

## **Sitografia**

Climate Change in the Arctic - A Hot Topic

(<http://www.amap.no/documents/18/popular/22>)

Comunicato stampa sulla precedente campagna in Antartide della nave OGS

Explora: <http://www.ogs.trieste.it/it/content/xi-campagna-antartide-della-nave-oceanografica-ogs-explora>

Il Quinto Rapporto di Valutazione sui Cambiamenti Climatici dell'IPCC spiegato dagli autori Italiani: <http://clima2014.it/>

Raccolta di grafici inerenti il cambio climatico disponibili presso la fondazione GRID-Arendal: <https://www.grida.no/resources?media=Graphic&tags=25>