



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE



Rapporti OM

N. 187

Alessandro Minigher
Stefano Cirilli
Renzo Mosetti

I cambiamenti climatici

Trieste settembre 2019

Anno accademico 2018/2019

Contenuti

1	Cambiamenti climatici osservati e relativi effetti	5
1.1	Cambiamenti climatici osservati	5
1.2	Uno sguardo al passato per contestualizzare il presente	7
1.2.1	Temperatura media della Terra nel lontano passato	9
1.2.2	Livello medio del mare nel lontano passato	9
1.3	Effetti climatici osservati su sistemi naturali	9
2	Cause dei cambiamenti climatici	11
2.1	Composizione chimica dell'atmosfera terrestre	11
2.2	Emissioni di gas serra longevi	12
2.3	Cambiamenti climatici: fattori scatenanti	12
2.3.1	Forzanti antropiche	13
2.3.2	Forzanti naturali, interne ed esterne	17
2.3.3	Forzanti naturali ed antropiche: effetto combinato	17
3	Impatti dei cambiamenti climatici	19
3.1	Scenari di emissione	19
3.1.1	Gli scenari SRES	20
3.1.2	Gli scenari RCP	20
3.2	Predizione di cambiamenti climatici futuri	21
3.2.1	Cambiamenti climatici globali durante il XXI secolo	21
3.2.2	Cambiamenti climatici globali durante i secoli successivi al XXI	24
3.3	Cambiamenti climatici futuri: impatti e rischi	24
3.3.1	Acidificazione dell'oceano	25
3.3.2	Eventi estremi	25
3.3.3	Rischio di cambiamenti improvvisi o irreversibili	26
4	Adattamento e mitigazione: opzioni e risposte	27
4.1	Rispondere ai cambiamenti climatici: cenni	27
4.1.1	Opzioni di adattamento	27
4.1.2	Opzioni di mitigazione	28
4.1.3	Relazione tra adattamento e mitigazione	28
4.2	Cooperazioni internazionali: cenni	28
4.2.1	La Convenzione UNFCCC	29
4.2.2	Il Protocollo di Kyoto	29
	Bibliografia	30

Capitolo 1

Cambiamenti climatici osservati e relativi effetti

1.1 Cambiamenti climatici osservati

Con il termine **cambiamento climatico** solitamente ci si riferisce alle variazioni nello stato del clima che possono essere identificate da cambiamenti rispetto alla media e/o dalla variabilità delle proprietà dello stato climatico stesso, che persistono per un periodo esteso, tipicamente dell'ordine delle decine - o anche centinaia - di anni. Il termine in analisi si riferisce a qualsiasi cambiamento del clima nel tempo, che sia dovuto a variabilità naturale o sia conseguenza di attività antropiche [1]. Questa definizione, tuttavia, non è universalmente adottata; talvolta, infatti, si preferisce distinguere tra *cambiamento climatico* - attribuito alle sole cause antropiche dirette o indirette - e *variabilità climatica*, attribuita alle sole cause naturali.

Il **riscaldamento del sistema climatico**¹ è inequivocabile; a testimoniarlo sono le seguenti osservazioni (figura 1.1) [3]:

- aumento della temperatura media dell'aria su scala globale;
- aumento della temperatura media degli oceani su scala globale;
- scioglimento diffuso di neve e ghiacci;
- aumento del livello medio del mare su scala globale.

L'**incremento di temperatura** è diffuso su tutto il globo, ma è maggiore alle alte latitudini dell'emisfero boreale [1]. Il periodo che va dal 1983 al 2012 è stato - entro un certo livello di confidenza - il trentennio più caldo degli ultimi 1'400 anni nell'emisfero settentrionale [3]. Negli ultimi cento anni circa, le temperature artiche medie hanno subito un incremento caratterizzato da un tasso di crescita doppio rispetto alla temperatura media globale. Inoltre, le regioni continentali si sono riscaldate più rapidamente rispetto agli oceani [1]. Osservazioni iniziate nel 1961 mostrano come la temperatura media globale dell'oceano è aumentata fino ad una profondità di almeno tre chilometri [1], con intensità maggiore in prossimità della superficie [3]. Per quanto riguarda l'atmosfera, invece, analisi effettuate grazie all'ausilio di palloni-sonda e misure satellitari mostrano che il tasso di crescita della temperatura della media- e bassa-troposfera è simile a quello osservato per la temperatura superficiale [1].

L'**incremento del livello medio del mare** è caratterizzato da un tasso - non omogeneo [2] (figura 1.2) e in crescita negli ultimi anni - dell'ordine dei millimetri all'anno [1], con un aumento complessivo medio di 0.19 m tra il 1901 ed il 2010 [3]. Tale andamento è consistente con l'aumento di temperatura (figura 1.1).

¹ Definizione moderna e multidisciplinare di *sistema climatico*: la Terra è dotata di un sistema climatico formato da più componenti che concorrono a mantenere l'equilibrio dell'intero sistema, influenzandosi a vicenda, sotto la forzante esterna dell'energia proveniente dal Sole [2].

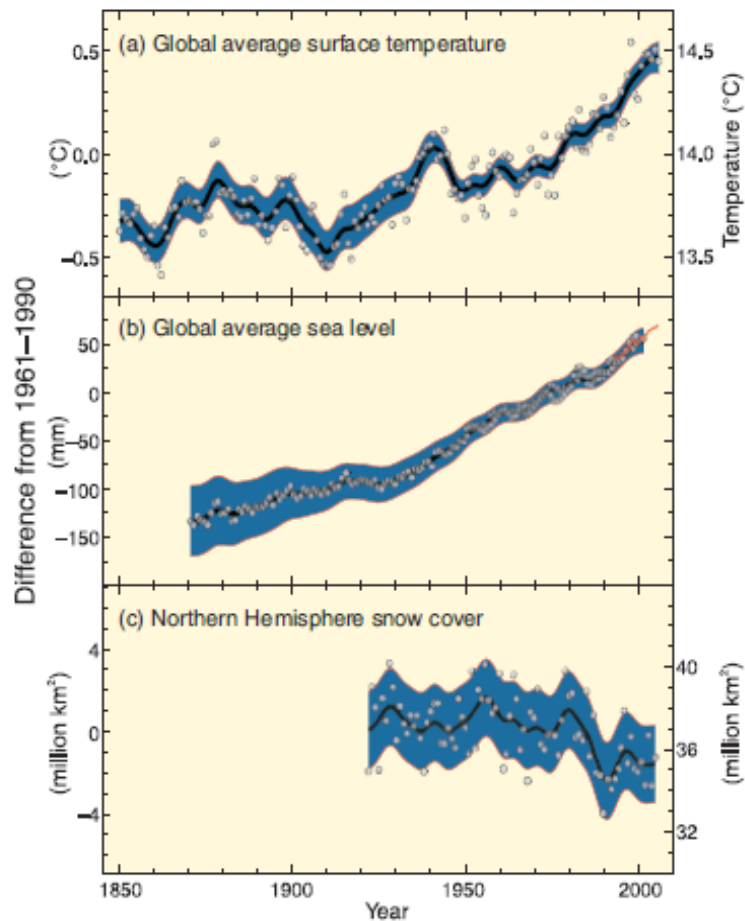


Figura 1.1. Variazioni osservate in (a) temperatura superficiale globale media; (b) livello del mare globale medio; (c) estensione del manto nevoso nell'emisfero boreale per il periodo marzo-aprile. Tutte le differenze sono relative alle corrispondenti medie per l'arco di tempo 1961-1990. Le curve più *smooth* rappresentano medie decennali, mentre i punti (cerchi) indicano valori annui. Le aree ombreggiate sono gli intervalli di incertezza stimati [1].

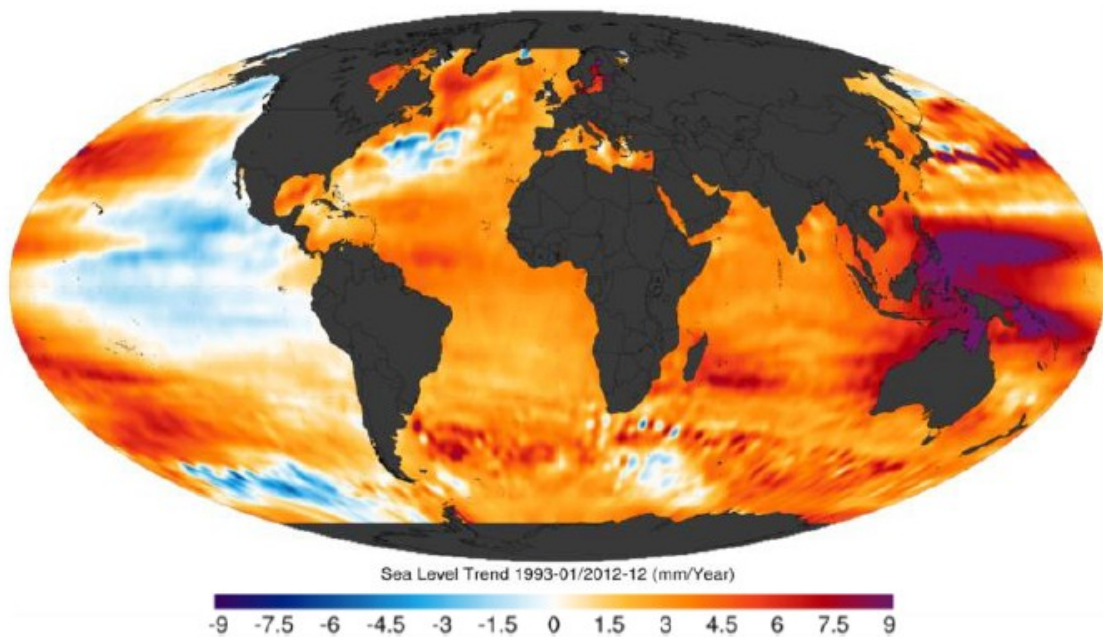


Figura 1.2. Tendenza del livello medio del mare - in mm/anno - da gennaio del 1993 a dicembre del 2012 [4].

A partire dal 1993, l'espansione termica degli oceani ha contribuito con una percentuale prossima a 57% all'innalzamento del livello medio del mare, mentre il restante 43% è dovuto sostanzialmente allo scioglimento dei ghiacci continentali e marini, anche se questi ultimi - essendo già immersi in mare - contribuiscono poco (2.5% [2]). Si stima che ad un completo scioglimento dei ghiacci di Groenlandia ed Antartide conseguirebbe un aumento del livello marino medio di circa 6 m e 60 m, rispettivamente [5].

Anche la **diminuzione di distese di ghiaccio e neve** in entrambi gli emisferi è consistente con il riscaldamento globale² (figura 1.1). Dati satellitari raccolti a partire dal 1978 mostrano che l'estensione dei ghiacci nel Mar Artico diminuisce - su media annuale - del 2.7% (7.4% durante il periodo estivo) ogni dieci anni [1]. A partire dagli anni '80 del '900, la temperatura superficiale dello strato di permafrost è generalmente aumentata fino ad un valore prossimo a 3°C [1], in risposta all'incremento della temperatura superficiale e ai cambiamenti nella copertura nevosa [3].

1.2 Uno sguardo al passato per contestualizzare il presente

Affinché sia possibile comprendere al meglio ciò che accade attualmente circa i cambiamenti climatici, è utile fornire una visione d'insieme. Pertanto, si è deciso di dedicare questo paragrafo alla contestualizzazione del presente mediante una breve panoramica su quella che era la situazione del lontano passato in termini di temperatura media del globo e di livello medio del mare.

Si hanno informazioni attendibili sul clima passato del pianeta Terra fino a circa 300 milioni di anni fa - dove tale limite proviene dall'età dei fondali oceanici - mentre stime per periodi più lontani derivano da analisi di rocce continentali [6].

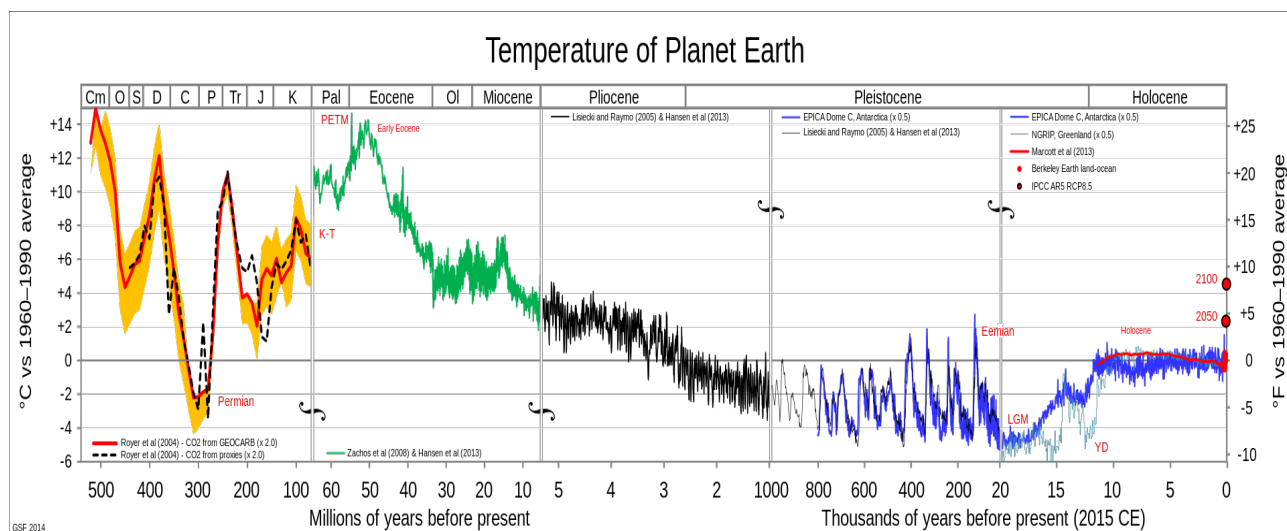


Figura 1.3. Anomalia di temperatura del pianeta Terra relativa al valore medio misurato per il periodo 1960-1990 [7]. In tempi dell'ordine di milioni di anni fa, il globo era caratterizzato da un clima generalmente più caldo rispetto a quello attuale, diversamente da quanto accadeva in tempi dell'ordine di migliaia di anni fa, in cui la temperatura media della Terra era tendenzialmente inferiore rispetto a quella attuale.

² Il concetto di *riscaldamento globale* non va confuso con quello di *effetto serra*. Quest'ultimo è un effetto naturale dovuto alla presenza - in atmosfera - di gas serra, i quali assorbono la radiazione a lunga lunghezza d'onda (infrarossa) proveniente dalla Terra che incide su di essi. Ciò sfocia nell'immagazzinamento di energia in atmosfera. Un incremento della concentrazione di gas serra in aria conduce ad un più intenso effetto serra, che sfocia nel riscaldamento globale.

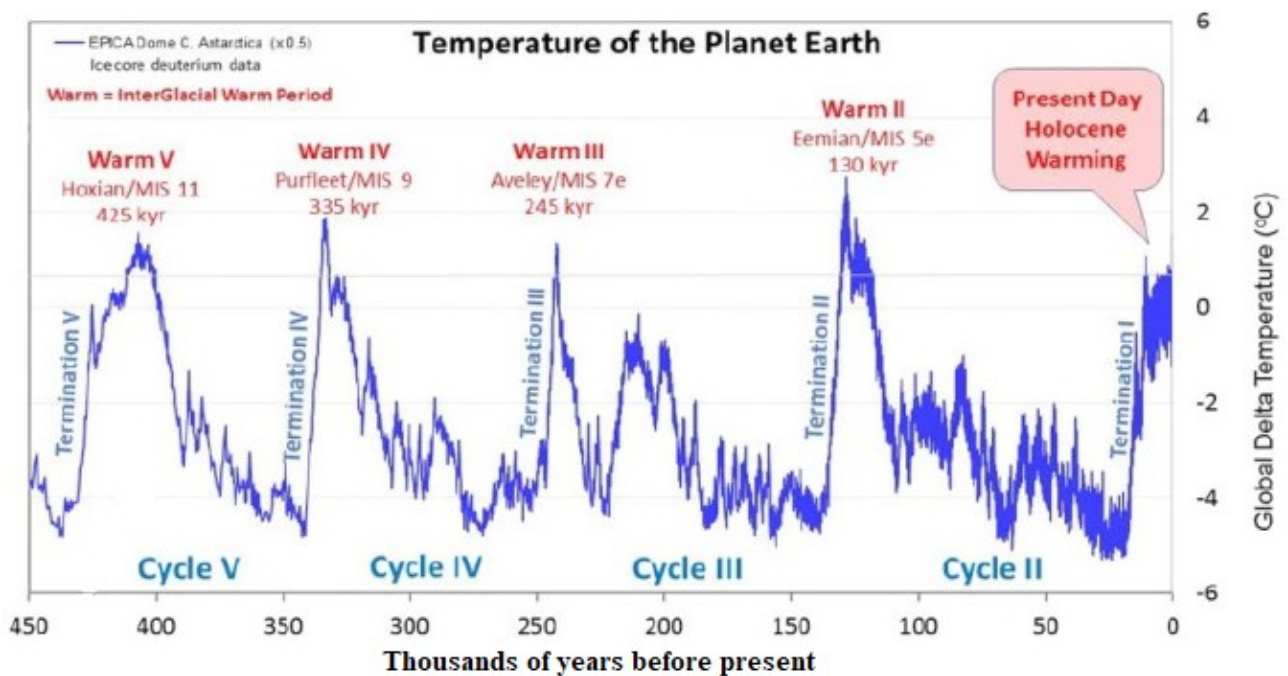


Figura 1.4. Anomalia di temperatura del pianeta Terra relativa al valore medio misurato per il periodo 1960-1990: dettaglio dei 450'000 anni più recenti [7]. Si manifesta un'alternanza tra periodi glaciali (freddi) ed interglaciali (caldi), con un tempo totale di permanenza medio pari a 80% e 20%, rispettivamente.

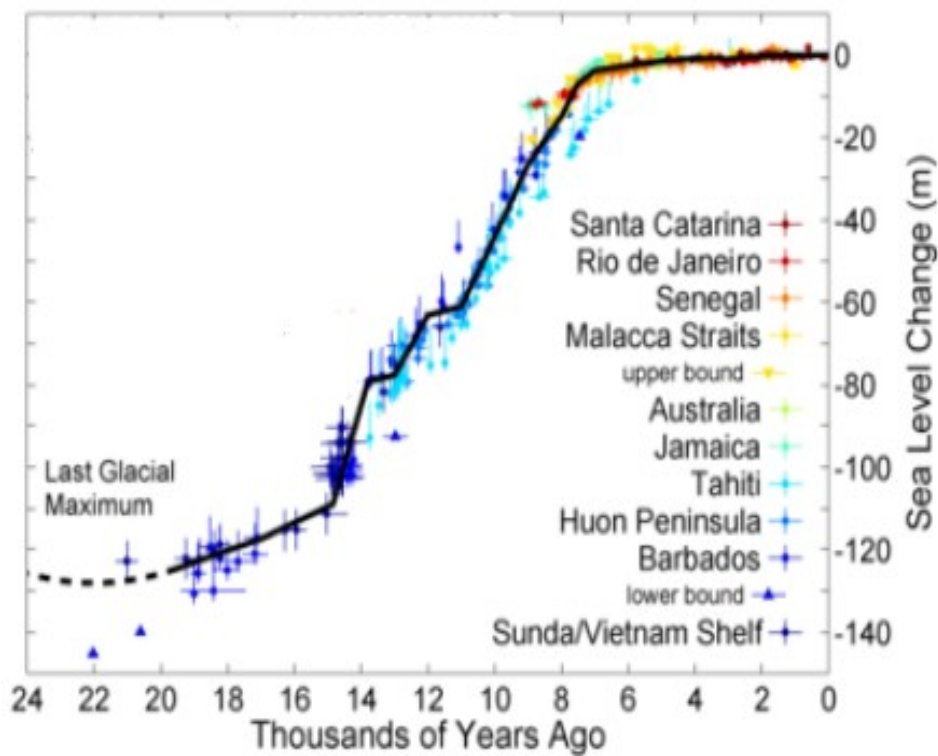


Figura 1.5. Anomalia del livello medio del mare - per i 24'000 anni più recenti - rispetto al valore medio attuale [8]. Colori diversi corrispondono ad osservazioni relative a località differenti. Ad ogni osservazione sono associate due barre d'errore, una orizzontale ed una verticale.

1.2.1 Temperatura media della Terra nel lontano passato

In tempi molto lontani - dell'ordine dei milioni di anni fa - la **temperatura media** del pianeta Terra era più elevata di quanto non lo sia al tempo presente, ma si sono verificate fluttuazioni significative che hanno condotto a glaciazioni estese [2]. In tempi dell'ordine delle migliaia di anni fa, invece, la temperatura media del globo era tendenzialmente inferiore rispetto a quella attuale.

Quanto appena affermato può essere apprezzato in figura 1.3, mentre in figura 1.4 si propone un dettaglio dei 450'000 anni più recenti, in cui si manifesta un'alternanza tra periodi glaciali (freddi) ed interglaciali (caldi), con un tempo totale di permanenza medio pari a 80% e 20%, rispettivamente.

1.2.2 Livello medio del mare nel lontano passato

Si stima che il **livello medio del mare** - rispetto a quello attuale - fosse [8]:

- 120 m inferiore, durante l'ultima era glaciale (12'000 ÷ 110'000 anni fa, circa);
- 5.5 m superiore, 125'000 anni fa;
- 50.3 m superiore, 3'000'000 di anni fa.

Pertanto, si osserva come - in tempi passati - il livello marino medio sia stato molto diverso da quello attuale (figura 1.5).

1.3 Effetti climatici osservati su sistemi naturali

Evidenze osservative raccolte in ogni continente³ e nella maggior parte degli oceani mostrano che molti **sistemi naturali** sono stati influenzati da cambiamenti climatici regionali, in particolare a causa dell'aumento di temperatura [1].

Con buona sicurezza si può affermare che sistemi naturali legati a **neve e ghiacci** (permafrost incluso) sono influenzati dai cambiamenti climatici, come ad esempio [1]:

- allargamento ed incremento del numero di laghi glaciali;
- incremento dell'instabilità del terreno nelle regioni ricoperte da permafrost e frane nelle regioni montuose;
- cambiamenti in alcuni ecosistemi artici ed antartici.

Con altrettanta buona sicurezza - basata su evidenze derivanti dallo studio di un ampio numero di specie animali e vegetali diverse - si può affermare che il recente riscaldamento globale influenza pesantemente i **sistemi biologici** terrestri, come ad esempio le migrazioni dei volatili e la deposizione delle uova, anticipandone l'avvenuta [1].

Inoltre, sembra che i cambiamenti osservati nei sistemi biologici di acqua dolce e salata siano associati all'aumento della temperatura dell'acqua, oltre che alle variazioni della superficie dei ghiacci, della salinità, del livello di ossigeno e della circolazione. Questi cambiamenti coinvolgono principalmente alghe, plancton e pesci, in termini di abbondanza, specie e luogo (migrazione) [1].

³ In merito ai cambiamenti climatici osservati esiste una evidente disomogeneità di dati raccolti e letteratura a seconda dell'area geografica in questione; in particolare, si riscontra una marcata scarsità di informazioni nei paesi in via di sviluppo [1].

Detto ciò, non è semplice stabilire in che percentuale cause naturali ed antropiche contribuiscano al riscaldamento globale e ai cambiamenti climatici in generale. Uno degli obiettivi degli esperti che operano in questo ambito della scienza è proprio quello di cercare di attribuire una causa alle variazioni osservate. A tal proposito esiste una moltitudine di modelli diversi, oltre che una molteplicità di scuole di pensiero diverse, che sfociano principalmente nelle due seguenti categorie:

- sostenitori delle **cause naturali** come principali responsabili dei cambiamenti climatici osservati a partire dall'era industriale;
- sostenitori delle **cause antropiche** come principali responsabili dei cambiamenti climatici osservati a partire dall'era industriale.

Tutto ciò è argomento di analisi e discussione in particolare dei prossimi due capitoli.

Capitolo 2

Cause dei cambiamenti climatici

2.1 Composizione chimica dell'atmosfera terrestre

Per comprendere le cause dei cambiamenti climatici è importante conoscere la **composizione chimica dell'atmosfera terrestre**, in particolare nei pressi della superficie del pianeta. In tabella 2.1 sono riportate le principali specie chimiche che costituiscono l'atmosfera nei pressi della superficie del pianeta Terra, oltre che il corrispondente peso molecolare e la proporzione (in termini di volume) con cui tali specie contribuiscono alla composizione dell'aria. Talvolta si preferisce fornire esclusivamente la composizione chimica dell'aria priva di vapore acqueo (la cosiddetta *aria secca*) in quanto quest'ultimo compare in atmosfera in proporzioni volumetriche fortemente variabili (sia nel tempo che a seconda della località in esame), che comunque si aggirano attorno alla mezza parte per milione.

In tabella 2.1 sono riportati valori numerici privi di errore: l'obiettivo è esclusivamente quello di fornire una descrizione generale delle caratteristiche chimiche dell'atmosfera in termini di costituenti fondamentali.

Tabella 2.1. Composizione chimica dell'atmosfera terrestre nei pressi della superficie del pianeta [9].

Specie chimica	Peso molecolare (g·mol ⁻¹)	Proporzione o frazione molare	Specie chimica	Peso molecolare (g·mol ⁻¹)	Proporzione o frazione molare
Azoto (N ₂)	28.01	78.08%	Metano (CH ₄)	16.04	1 - 2 ppm
Ossigeno (O ₂)	32.00	20.95%	Idrogeno (H ₂)	2.02	0.50 ppm
Argon (Ar)	39.95	0.934%	Ossido di diazoto (N ₂ O)	44.01	0.50 ppm
Vapore acqueo (H ₂ O)	18.02	~ 0.5 % *	Xeno (Xe)	131.29	0.087 ppm
Anidride carbonica (CO ₂)	44.01	412.04 ppm **	Diossido di azoto (NO ₂)	46.01	0.02 ppm
Neon (Ne)	20.18	18.18 ppm	Ozono (O ₃)	48.00	0 ÷ 0.01 ppm
Elio (He)	4.00	5.24 ppm	Radon (Rn)	222.00	6 · 10 ⁻¹⁴ ppm
Monossido di azoto (NO)	30.01	5.00 ppm	Altri (CO, NH ₃ , ecc.)	/	/
Kriptone (Kr)	83.80	1.14 ppm			

* Dato fortemente variabile.

** Dato risalente a marzo 2019.

Anche se in proporzioni minori rispetto ad altre, alcune specie chimiche costituenti l'atmosfera sono particolarmente importanti dal punto di vista del bilancio energetico globale del pianeta. Tra queste compaiono, ad esempio, i cosiddetti **gas serra**, oggetto di indagine dei prossimi due paragrafi.

2.2 Emissioni di gas serra longevi

La **forzante radiativa**⁴ del sistema climatico è dominata dai **gas serra longevi**, ossia dai gas serra che possiedono un alto tempo di residenza in atmosfera [1]. Tra questi spiccano il diossido di carbonio (CO₂), il metano (CH₄), l'ossido di diazoto (N₂O) e gli idrocarburi alogenati⁵, caratterizzati da un *tempo di residenza medio* pari a [11]:

- 500 anni per la CO₂;
- 7-10 anni per il CH₄;
- 140-190 anni per l'N₂O.

Anche il vapore acqueo (H₂O) è un gas serra, ma risiede in atmosfera esclusivamente per un breve periodo (circa 10 giorni [11]), pertanto non contribuisce significativamente alla forzante radiativa. Tuttavia, all'aumentare della temperatura dell'atmosfera aumenta anche la capacità di quest'ultima di contenere maggiori quantità di vapor d'acqua, le quali produrranno un ulteriore incremento dell'effetto serra instaurando quindi un *feedback* positivo di non trascurabile importanza [12].

Le **emissioni globali di gas serra** conseguenti ad attività umane sono cresciute a partire dall'era preindustriale con un incremento del 70% tra il 1970 ed il 2004. La maggiore crescita in termini di emissioni di gas serra tra gli anni poc'anzi menzionati proviene dalle seguenti cause [1]:

- rifornimento energetico;
- trasporti;
- industria;

Attività come l'utilizzo di edifici residenziali e commerciali, la silvicoltura (deforestazione inclusa) ed il settore agricolo, invece, sono sempre fonte di emissioni di gas serra, ma possiedono un impatto più moderato [1].

Le emissioni globali di gas serra longevi ricoprono un ruolo di assoluta importanza in termini di cambiamento climatico, pertanto si è deciso di anticiparne parzialmente la trattazione già in questo paragrafo, nonostante si riservi una trattazione più dettagliata al sotto-paragrafo 2.3.1, interamente dedicato all'analisi delle attività antropiche come forzante esterna dei cambiamenti climatici.

2.3 Cambiamenti climatici: fattori scatenanti

Variazioni nelle concentrazioni di gas serra in atmosfera e nell'irraggiamento solare alterano il bilancio energetico del sistema climatico e sono **fattori scatenanti** in termini di cambiamenti climatici, poiché influenzano assorbimento, scattering ed emissione della radiazione all'interno dell'atmosfera e nei pressi della superficie del pianeta Terra. Le risultanti variazioni nel bilancio

⁴ La *forzante radiativa* è una misura dell'influenza che un fattore ha nell'alterazione del bilancio tra energia entrante ed uscente dal sistema atmosferico terrestre, ed è un indice dell'importanza di tale fattore come potenziale meccanismo di cambiamento climatico [10]. Nel presente documento, i valori di forzante radiativa sono relativi ai valori preindustriali (il 1750 è l'anno di riferimento), e sono espressi in W·m⁻².

⁵ Gli *idrocarburi alogenati* sono un gruppo di gas contenenti fluoro, cloro e bromo.

energetico - positive o negative che siano - sono espresse in termini di forzante radiativa, la quale è generalmente utilizzata per confrontare le influenze che riscaldamento o raffreddamento globali hanno sul clima [1].

2.3.1 Forzanti antropiche

L'influenza antropica sul sistema climatico è chiara: le recenti **emissioni antropiche** di gas serra longevi sono le più elevate mai verificatesi nella storia del pianeta Terra ed i conseguenti effetti - assieme a quelli provocati da altre forzanti di natura antropica - sono stati la causa dominante del riscaldamento globale osservato a partire da metà del XX secolo, entro un livello di confidenza estremamente elevato [3].

Nel 2005, le concentrazioni di CO₂ e CH₄ in atmosfera hanno superato l'intervallo di valori entro i quali risiedevano negli ultimi 650'000 anni [1]. Inoltre, le concentrazioni globali di diossido di carbonio, metano e ossido di diazoto in atmosfera hanno subito un marcato aumento a partire dal 1750 a causa di attività umane (rivoluzione industriale, avvento dei motori a scoppio e crescita demografica su tutti), ed hanno raggiunto valori significativamente maggiori rispetto a quelli preindustriali (figura 2.1 - a, b e c).

Dal confronto dei grafici di figura 2.1 (a, b e c) si osserva come il valore della forzante radiativa - oltre che della concentrazione - negli anni possieda un andamento simile per i tre gas serra longevi in analisi, che prende il nome di *hockey's stick shape* (forma a bastone da hockey).

Sorge spontaneo chiedersi da dove provengano i dati risalenti a centinaia - o addirittura migliaia - di anni fa; si tratta di stime dedotte mediante l'ausilio di tecniche di carotaggio operate su ghiacci permanenti, dove si è certi che l'anidride carbonica si sia mantenuta e conservata nel tempo, senza che vi sia stata alcuna comunicazione con l'aria circostante. Si tratta di misure indirette che prendono il nome di *proxy*.

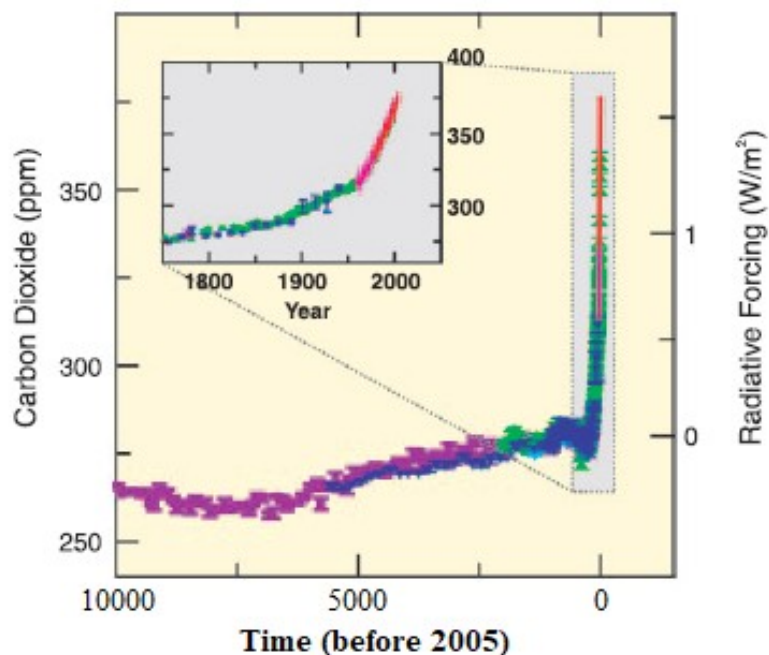


Figura 2.1a. Concentrazione di CO₂ (asse sinistro delle ordinate) in atmosfera negli ultimi 10'000 anni (grafico esterno) e a partire dal 1750 (grafico interno) [1]. Si tratta di misure eseguite direttamente su campioni atmosferici presso l'osservatorio di Mauna Loa (linea rossa) ed indirettamente su carote di ghiaccio (simboli colorati diversamente a seconda del differente studio). Sull'asse destro delle ordinate (grafico esterno) compaiono i valori della forzante radiativa, relativi a quello del 1750.

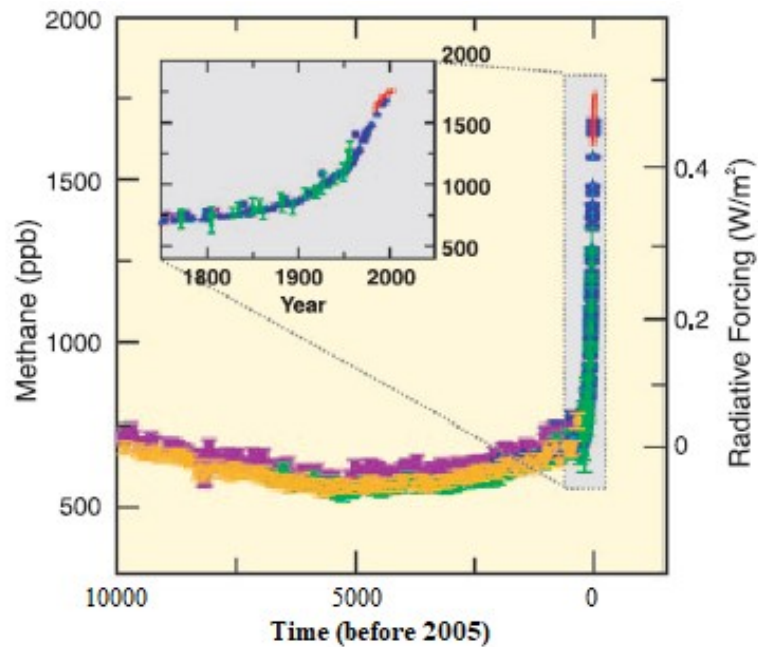


Figura 2.1b. Concentrazione di CH_4 (asse sinistro delle ordinate) in atmosfera negli ultimi 10'000 anni (grafico esterno) e a partire dal 1750 (grafico interno) [1]. Si tratta di misure eseguite direttamente su campioni atmosferici presso l'osservatorio di Mauna Loa (linea rossa) ed indirettamente su carote di ghiaccio (simboli colorati diversamente a seconda del differente studio). Sull'asse destro delle ordinate (grafico esterno) compaiono i valori della forzante radiativa, relativi a quello del 1750.

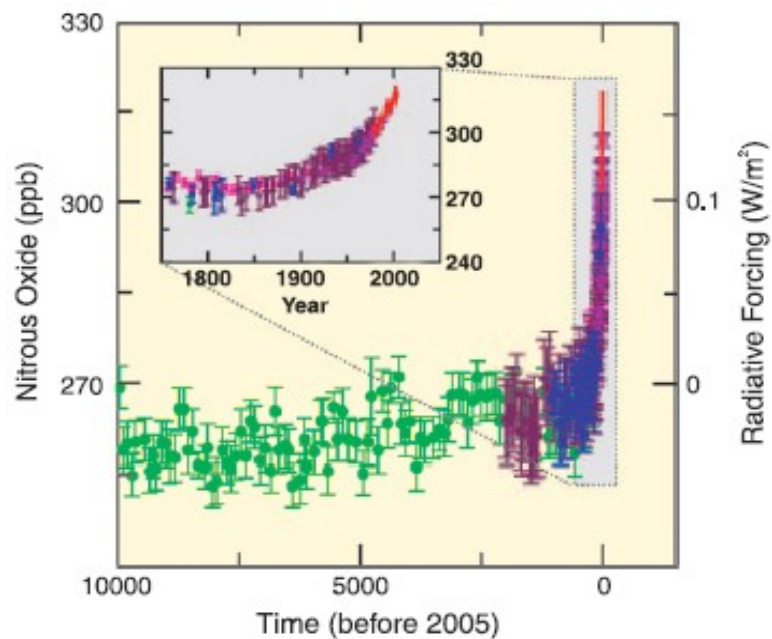


Figura 2.1c. Concentrazione di N_2O (asse sinistro delle ordinate) in atmosfera negli ultimi 10'000 anni (grafico esterno) e a partire dal 1750 (grafico interno) [1]. Si tratta di misure eseguite direttamente su campioni atmosferici presso l'osservatorio di Mauna Loa (linea rossa) ed indirettamente su carote di ghiaccio (simboli colorati diversamente a seconda del differente studio). Sull'asse destro delle ordinate (grafico esterno) compaiono i valori della forzante radiativa, relativi a quello del 1750.

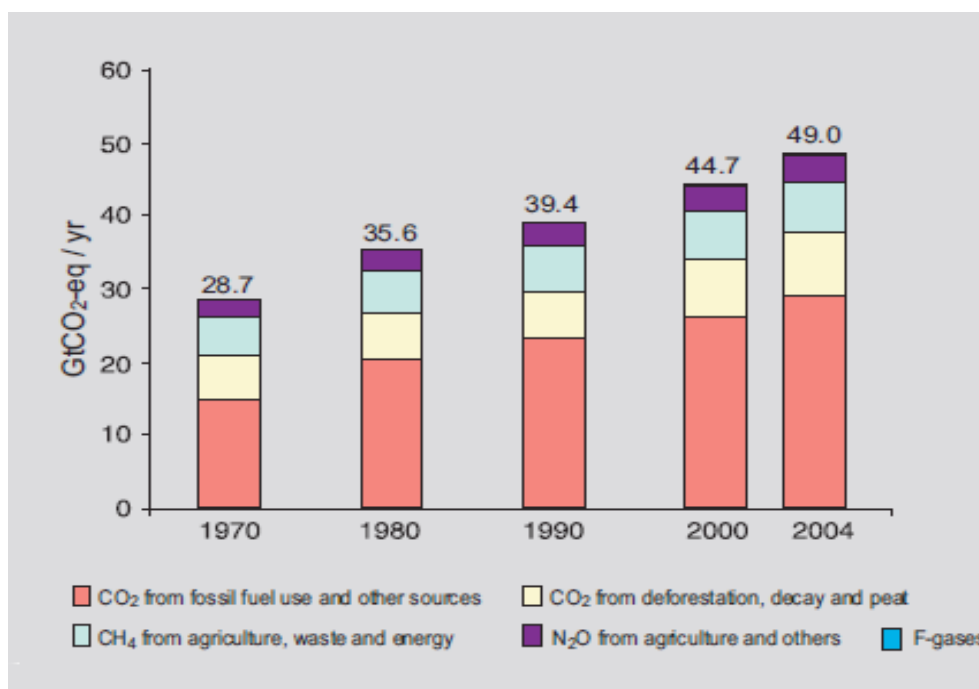


Figura 2.2. Emissioni annuali globali di gas serra di natura antropica tra gli anni 1970 e 2004 (compresi) [1]. In ascissa compare l'anno, mentre in ordinata le giga-tonnellate (Gt) di CO₂-equivalente, ossia la massa di diossido di carbonio che causerebbe lo stesso ammontare di forzante radiativa di un altro gas serra o di una miscela di gas serra (longevi).

Il **diossido di carbonio** è il gas serra di natura antropica più importante. Le sue emissioni annue sono cresciute dell'80% (da 21 a 38 Gt) tra il 1970 ed il 2004, e rappresentarono il 77% di tutte le emissioni di gas serra di natura antropica nel 2004 (figura 2.2) [1]. L'incremento globale della concentrazione di CO₂ (da 280 ppm [1] del 1750 a 412.04 ppm [9] di marzo del 2019) è principalmente dovuto all'utilizzo di combustibili fossili e, in seconda battuta, alla deforestazione. L'aumento della concentrazione di **metano** (da 715 ppb [1] del 1750 a 1-2 ppm [9] del 2019), invece, possiede come cause primarie - oltre all'utilizzo di combustibili fossili - anche l'agricoltura e l'allevamento.

L'incremento di **ossido di diazoto** (da 270 ppb [1] del 1750 a 0.50 ppm [9] del 2019), invece, è prevalentemente dovuto all'agricoltura (fertilizzanti) e all'industria.

Infine, per quanto riguarda gli **idrocarburi alogenati**, la loro concentrazione globale in atmosfera si è discostata da valori prossimi allo zero dell'era preindustriale prevalentemente a causa delle attività umane [1].

Molti degli incrementi di temperatura media globale osservati a partire dal 1950 paiono strettamente correlati con l'aumento della concentrazione di gas serra dovuto a **forzanti antropiche** [1].

Il riscaldamento globale diffuso di atmosfera ed oceano, assieme allo scioglimento dei ghiacci, supporta la conclusione secondo la quale esiste una bassissima probabilità che il cambiamento climatico degli ultimi cinquanta anni possa essere spiegato senza introdurre forzanti esterne, ed una buona probabilità che non sia dovuto alle sole cause naturali [1].

Il riscaldamento osservato per la troposfera ed il raffreddamento della stratosfera sembrano essere dovuti all'effetto combinato dell'aumento della concentrazione di gas serra e all'esaurimento dell'ozono stratosferico⁶ [1].

⁶ Generalmente si distingue tra *ozono troposferico* ed *ozono stratosferico*. Il primo è confinato attorno alla superficie terrestre, ed è trattato come un fattore inquinante, mentre il secondo è localizzato attorno ai 30 km di quota e costituisce un elemento fondamentale per consentire la vita sulla Terra (il *buco dell'ozono* costituisce un problema attuale di notevole importanza): duplice ruolo dell'O₃.

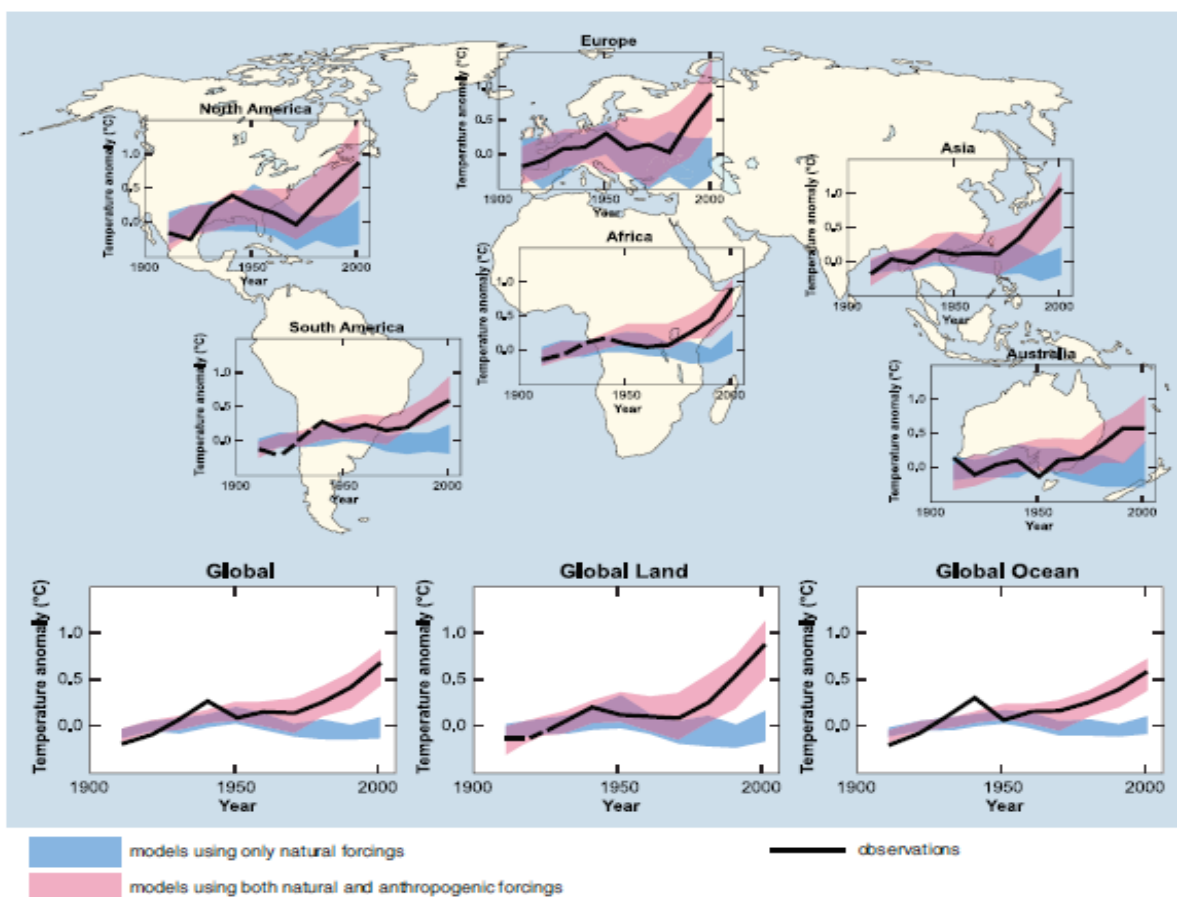


Figura 2.3. Confronto tra le anomalie di temperatura superficiale osservate (in nero) su scala continentale e globale con andamenti simulati a partire da modelli climatici che considerano o solo forzanti naturali (in blu) o sia forzanti naturali che antropiche (in rosso) [1].

In figura 2.3 si possono osservare diversi grafici che illustrano l'andamento dell'**anomalia annua di temperatura**⁷ a partire dal 1906, mediato sui vari continenti, oltre che su tutto il globo, su tutti gli oceani e su tutte le terre emerse. Si nota come il riscaldamento osservato per le varie regioni in analisi - mediato su un arco temporale pari a dieci anni - sia riprodotto, con una certa confidenza, da modelli che includono sia cause naturali che antropiche (fa eccezione l'Antartide), soprattutto a partire dal 1950 circa. Invece, i modelli che prevedono l'impiego esclusivamente di cause naturali si discostano dai dati osservati, in particolare negli ultimi cinquanta anni circa. Questo porta ad affermare con una certa confidenza che le cause antropiche sono le principali responsabili del riscaldamento globale a partire da circa la metà del XX secolo [1].

Inoltre, sempre con una certa confidenza, si può affermare che la forzante di tipo antropico è anche la principale responsabile dei seguenti fenomeni [1]:

- innalzamento del livello medio del mare a partire dalla seconda metà del '900;
- variazioni nel pattern di vento e precipitazioni;
- modifica di alcuni sistemi biologici e naturali.

⁷ L'*anomalia annua di temperatura* è definita come la differenza tra il valore medio annuo di temperatura in un punto e la relativa media calcolata su un periodo di riferimento.

2.3.2 Forzanti naturali, interne ed esterne

Alle cause dei cambiamenti climatici, o per essere più precisi dal punto di vista terminologico, della variabilità climatica, concorrono anche le seguenti **forzanti naturali** interne ed esterne al sistema climatico [6]:

- **posizione dei continenti e delle catene montuose.** La posizione delle terre emerse, rispetto agli oceani e all'asse di rotazione terrestre, e la presenza delle principali catene montuose condizionano la distribuzione dell'energia solare sul pianeta Terra. Si tratta di variazioni climatiche su scala di centinaia di milioni di anni;
- **variazioni dell'orbita terrestre e dell'asse di rotazione.** Sono effetti ciclici che cambiano le condizioni di esposizione della superficie terrestre al flusso solare, in particolare degli emisferi e delle terre emerse; prendono il nome di *cicli di Milanković*. Si tratta di variazioni climatiche su scala di centinaia e decine di migliaia di anni;
- **variazione del flusso della radiazione solare.** Il flusso di energia che proviene dal Sole cambia perché è soggetto a fluttuazioni nella produzione e nel trasporto di energia dall'interno verso la superficie del Sole stesso, che è una fucina termonucleare. Tali fluttuazioni possiedono una periodicità principale di circa 11 anni e un'entità pari a 0.1% del flusso medio di energia solare in entrata nell'atmosfera (ossia $1'360 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, circa);
- **effetto serra.** Si tratta di un fenomeno naturale dovuto alla presenza - in atmosfera - di gas serra, i quali assorbono la radiazione a lunga lunghezza d'onda (infrarossa) proveniente dalla Terra che incide su di essi. Ciò sfocia nell'immagazzinamento di energia in atmosfera;
- **albedo.** È la frazione di energia solare che viene riflessa nello spazio, senza essere assorbita dal pianeta. Quello della Terra è pari a circa 0.3 (30%) e buona parte della riflessione è imputabile alle nubi, la cui formazione è favorita dagli aerosol presenti in aria;
- **eventi eccezionali.** Si tratta di fenomeni che cambiano le proprietà dell'atmosfera terrestre su scala globale, poiché immettono in aria (troposfera e stratosfera) elevate quantità di polveri e gas che modificano l'assorbimento della radiazione solare nei pressi della superficie del pianeta o nell'atmosfera stessa. Tra questi si annoverano eruzioni vulcaniche ed impatti di corpi celesti con la Terra.

2.3.3 Forzanti naturali ed antropiche: effetto combinato

In figura 2.4 si possono apprezzare i singoli contributi al **cambiamento della temperatura superficiale** osservato nel periodo 1951-2010, che sono raggruppati secondo le seguenti cinque categorie:

- emissioni di gas serra;
- forzanti antropiche di altro tipo (incluso l'effetto di raffreddamento dovuto agli aerosol, che favoriscono la formazione delle nubi);
- forzanti antropiche combinate;
- forzanti naturali;
- variabilità naturale interna (come, ad esempio, l'effetto dell'albedo).

La distinzione dei contributi individuali alle variazioni di temperatura è stata fatta mediante l'utilizzo combinato di osservazioni e modelli simulati [3].

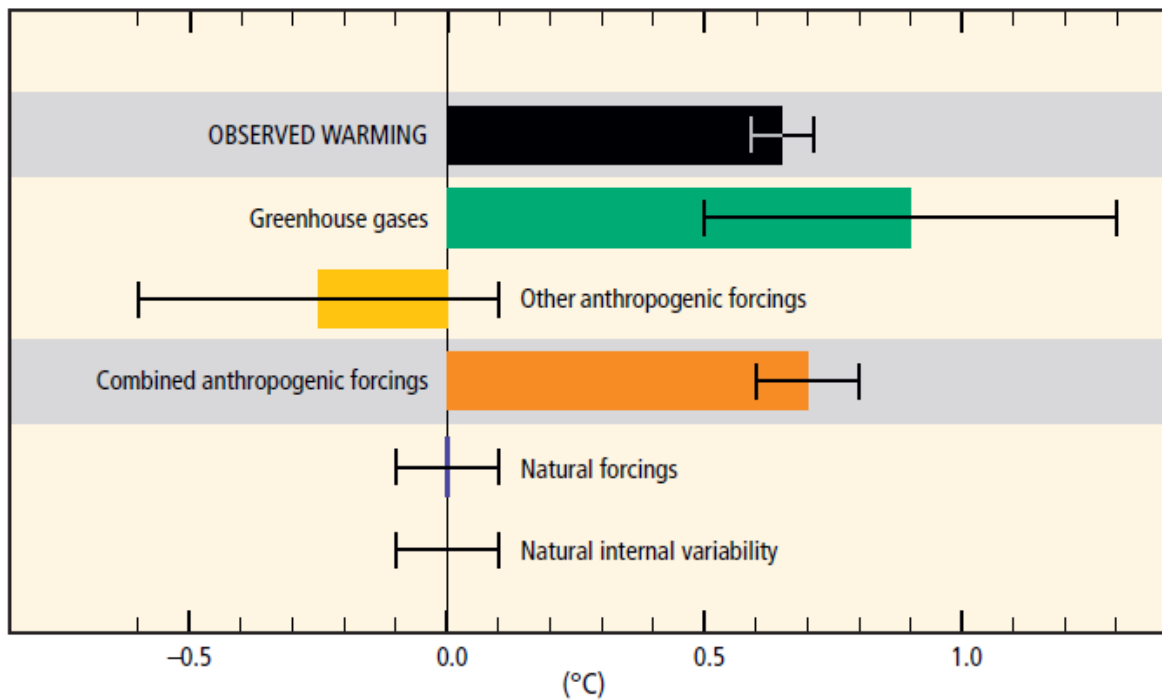


Figura 2.4. Contributi - valore medio (barre spesse colorate) e corrispondente range di confidenza del 95% (barre sottili nere) - al cambiamento della temperatura superficiale, osservato nel periodo 1951-2010, anch'esso fornito in termini di valore medio e corrispondente intervallo di confidenza. Si considerano emissioni di gas serra, forzanti antropiche di altro tipo (incluso l'effetto di raffreddamento dovuto agli aerosol), forzanti antropiche combinate, forzanti naturali e variabilità naturale interna (come, ad esempio, l'effetto dell'albedo). La distinzione dei contributi individuali alle variazioni di temperatura è stata fatta mediante l'utilizzo combinato di osservazioni e modelli simulati [3].

Capitolo 3

Impatti dei cambiamenti climatici

3.1 Scenari di emissione

Secondo gli **scenari di emissione** pubblicati successivamente al SRES (acronimo dell'inglese *Special Report on Emissions Scenarios*, 2000) dell'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) - che sono per altro comparabili, in range, con quelli presentati in SRES stesso - è particolarmente evidente che le politiche di mitigazione in merito ai cambiamenti climatici, e le relative pratiche di sviluppo adottate nei primi anni del XXI secolo, non siano sufficienti a limitare le emissioni di gas serra, le quali continueranno ad aumentare nel corso delle successive decadi (figura 3.1) [1].

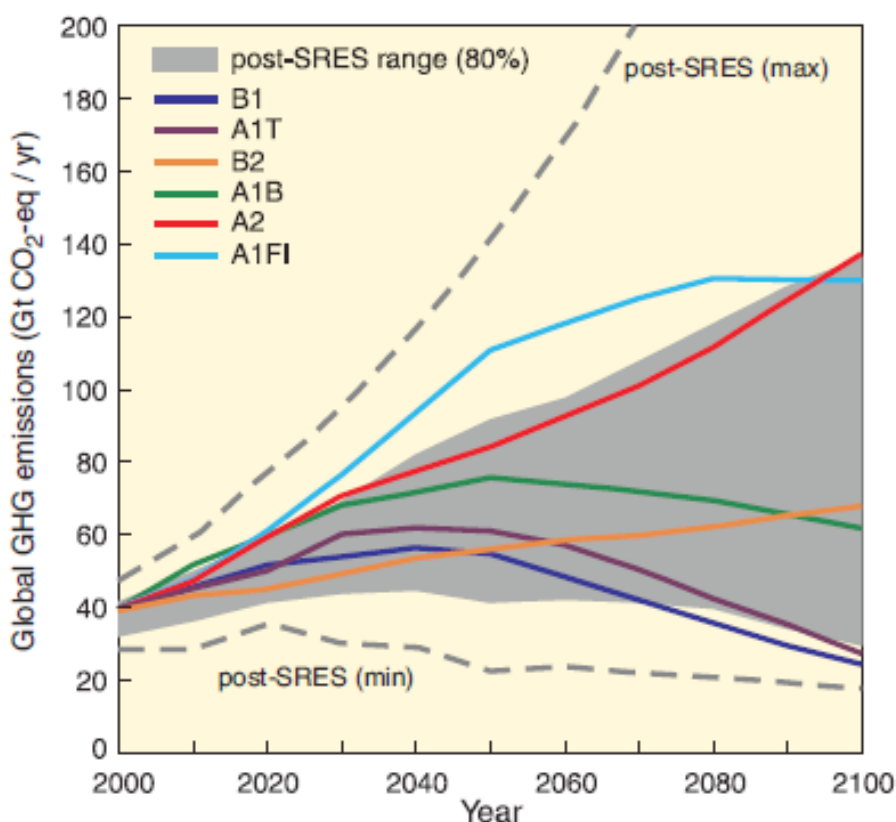


Figura 3.1. Scenari per le emissioni globali di gas serra (in Gt di CO₂ equivalente per anno) dal 2000 al 2100 in assenza di politiche climatiche aggiuntive rispetto a quelle in adozione nel corso dei primi anni del XXI secolo. Si osservano sei scenari illustrativi riferiti a SRES (linee colorate) e il range di confidenza entro il quale giacciono gli scenari post-SRES (linee tratteggiate). Le emissioni includono CO₂, CH₄, N₂O ed idrocarburi alogenati [1].

3.1.1 Gli scenari SRES

Gli **scenari SRES** prevedono un incremento delle emissioni globali di gas serra in un intervallo di valori compreso tra 9.7 Gt (25%) e 36.7 Gt (90%) di CO₂ equivalente tra gli anni 2000 e 2030. In tali scenari, i combustibili fossili mantengono la propria posizione dominante in termini di fonte energetica. Da ciò si deduce che le emissioni di anidride carbonica corrispondenti cresceranno tra il 40% ed il 110% nell'intervallo di tempo considerato (2000-2030) [1].

Gli scenari in analisi sono classificati secondo quattro categorie, denominate A1, A2, B1 e B2, che esplorano alternative vie di sviluppo, includendo forzanti di tipo demografico, economico e tecnologico, oltre alle emissioni di gas serra. Le categorie in analisi non includono politiche aggiuntive rispetto a quelle in corso nel 2000 [1].

Di seguito si analizzano brevemente le quattro categorie poc'anzi elencate [1]:

- lo scenario **A1** assume un mondo caratterizzato da una rapida crescita economica, una popolazione globale che raggiunge un valore massimo attorno a metà del XXI secolo ed una repentina introduzione di nuove e più efficienti tecnologie. A1 è suddiviso in tre sottogruppi che descrivono direzioni alternative in termini di cambiamento economico:
 - **A1FI**, intensivo di fossili;
 - **A1T**, risorse energetiche non fossili;
 - **A1B**, bilanciamento tra le fonti energetiche;
- lo scenario **B1** descrive un mondo convergente, con la stessa popolazione globale di A1, ma con variazioni più rapide in termini economici;
- lo scenario **B2** assume un mondo caratterizzato da una crescita economica e demografica intermedia, enfatizzando soluzioni locali all'economia, all'ambito sociale e alla sostenibilità ambientale;
- lo scenario **A2** descrive un mondo molto eterogeneo con un alto tasso di crescita demografica, un lento sviluppo economico ed un altrettanto lento cambiamento tecnologico.

3.1.2 Gli scenari RCP

Gli **scenari RCP** - acronimo dell'inglese *Representative Concentration Pathway* - sono dei modelli post-SRES che sostituiscono gli stessi scenari SRES. Questi sono stati adottati dall'IPCC all'interno dell'AR5 (*Fifth Assessment Report*, 2014) e constano di quattro diverse varianti in termini di modellazione climatica, che vengono elencate di seguito [3]:

- **RCP2.6**, scenario di mitigazione (elevata riduzione delle emissioni);
- **RCP4.5**, scenario di stabilizzazione (consistente riduzione delle emissioni);
- **RCP6.0**, scenario di stabilizzazione (moderata riduzione delle emissioni);
- **RCP8.5**, scenario ad alte emissioni.

Tali varianti, quindi, differiscono l'una dall'altra in base alla quantità di gas serra che potrebbero essere emessi negli anni a venire.

Gli scenari in analisi utilizzano valori minori - rispetto agli scenari SRES - per alcune forzanti legate alle emissioni, in particolare in termini di variazione demografica. Nonostante ciò, il tutto sfocia in un ridotto cambiamento - in difetto - nelle emissioni complessive rispetto agli scenari SRES [1]. Diversamente da questi ultimi, gli scenari RCP tengono in considerazione anche le recenti politiche climatiche [3].

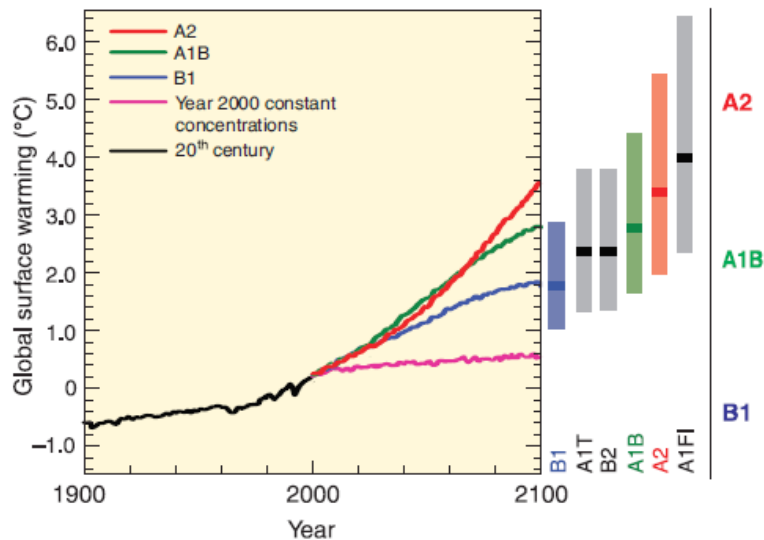


Figura 3.2. Anomalia annua di temperatura relativa al periodo 1980-1999 secondo i seguenti scenari SRES: A2, A1B e B1. È riportata anche la curva corrispondente all’esperimento in cui le concentrazioni di gas serra sono state mantenute costanti ai valori dell’anno 2000. Le barre sul lato destro indicano la miglior stima (trattino interno) e l’intervallo di confidenza (95%) dello scenario corrispondente (riferiti agli anni 2090-2099 e relativi agli anni 1980-1999) [1].

3.2 Predizione di cambiamenti climatici futuri

Il **clima futuro** dipenderà dal riscaldamento globale causato da emissioni antropiche passate di gas serra, nonché dalle emissioni future e dalla variabilità climatica naturale [3].

3.2.1 Cambiamenti climatici globali durante il XXI secolo

All’interno di un certo range di confidenza degli **scenari SRES**, questi ultimi prevedono - in termini di temperatura superficiale globale media e di livello medio del mare - quanto esposto in tabella 3.1.

Secondo gli **scenari RCP**, che come già affermato nel corso del sotto-paragrafo 3.1.2 sostituiscono gli scenari SRES, la variazione di **temperatura superficiale media** su scala globale nel periodo 2016-2035 (relativa al ventennio 1986-2005) sarà probabilmente compresa tra 0.3°C e 0.7°C, nell’ipotesi che non si verifichino importanti eruzioni vulcaniche oppure inattesi cambiamenti in alcune sorgenti naturali o nell’irradiazione solare totale [3].

Si osserva che le predizioni sull’andamento della temperatura negli anni dipendono fortemente dalla specifica proiezione considerata, sia per gli scenari SRES (figura 3.2) che per gli scenari RCP (figura 3.3).

In figura 3.4 si propone l’andamento dell’anomalia di temperatura media globale atmosferica a breve termine, relativa al periodo 1986-2005, secondo tutti i modelli numerici disponibili. In tale figura si può apprezzare come la sostanziale totalità delle proiezioni preveda una tendenza monotona crescente dell’anomalia di temperatura in analisi, negli anni. È importante osservare che anche queste simulazioni numeriche globali non assumono il verificarsi di eventi imponderabili [6], come ad esempio importanti eruzioni vulcaniche oppure cambiamenti inattesi in termini di forzanti naturali interne ed esterne al sistema climatico.

Già a partire dall’AR4 (*Fourth Assessment Report*, 2007) dell’IPCC c’è stato un significativo miglioramento in termini di comprensione e proiezione del cambiamento del **livello del mare**.

Tabella 3.1. Temperatura superficiale globale media e livello medio del mare predetti per la fine del XXI secolo [1], secondo gli scenari SRES.

Scenario	Variazione di temperatura in °C (riferita agli anni 2090-2099 e relativa agli anni 1980-1999)		Variazione del livello medio del mare in m (riferita agli anni 2090-2099 e relativa agli anni 1980-1999)
	Miglior stima	Intervallo di confidenza	
B1	1.8	1.1 – 2.9	0.1 – 0.38
A1T	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.45
B2	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.43
A1B	2.8	1.7 – 4.4	0.21 – 0.48
A2	3.4	2.0 – 5.4	0.23 – 0.51
A1FI	4.0	2.4 – 6.4	0.26 – 0.59

L'aumento del livello medio marino continuerà durante il XXI secolo, molto probabilmente con un tasso più elevato di quello osservato nel periodo 1971-2010. Per il ventennio 2081-2100, relativo al periodo 1986-2005, l'incremento sarà probabilmente compreso tra 0.26 m e 0.82 m, secondo gli scenari RCP. Inoltre, tale incremento non sarà uniforme tra le regioni [3].

In figura 3.5 si riporta l'andamento dell'anomalia del livello medio del mare su scala globale relativa al ventennio 1986-2005 secondo gli scenari RCP2.6 ed RCP8.5, stimata per il periodo 2006-2100. Per completezza, essendo i fenomeni strettamente correlati, si riporta in figura 3.6 la proiezione - secondo gli scenari RCP - dell'**estensione dei ghiacci artici** nel mese di settembre, arco di tempo in cui questa è minore.

È importante osservare che il mare - a causa della sua elevata capacità termica - ha **tempi di risposta** (plurisecolari) più lunghi rispetto a quelli dell'atmosfera (sub-secolari). A tal proposito, si propongono - in figura 3.7 - le risposte di mare ed atmosfera ad un particolare scenario (*Accordo di Parigi*) di riduzione delle emissioni di gas serra, rispettivamente in termini di temperatura media globale e di livello medio del mare. Anche nel caso di riduzione completa delle emissioni di tutti i gas serra entro la metà del XXI secolo, il livello medio del mare continuerà ad aumentare almeno fino agli inizi del XXIV secolo [2].

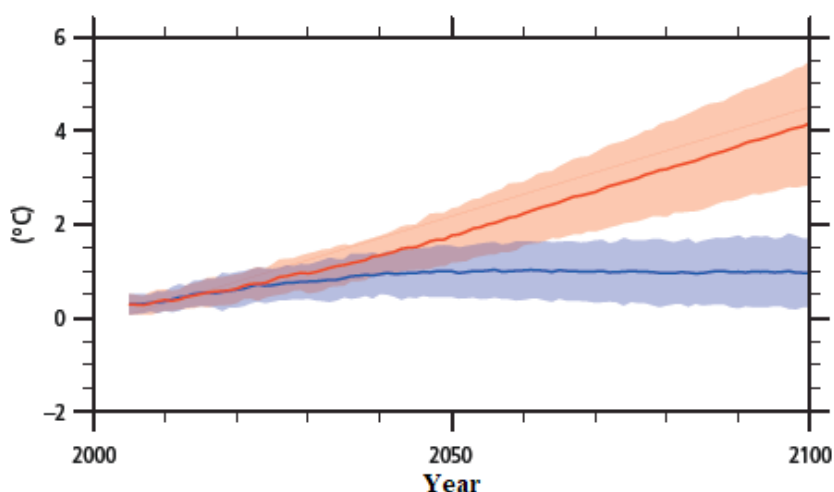


Figura 3.3. Anomalia di temperatura superficiale globale media relativa al ventennio 1986-2005 secondo gli scenari RCP2.6 (in blu) ed RCP8.5 (in rosso), stimata per il periodo 2006-2100. All'andamento medio (linee continue colorate) è associata anche la relativa incertezza (area ombreggiata) [3].

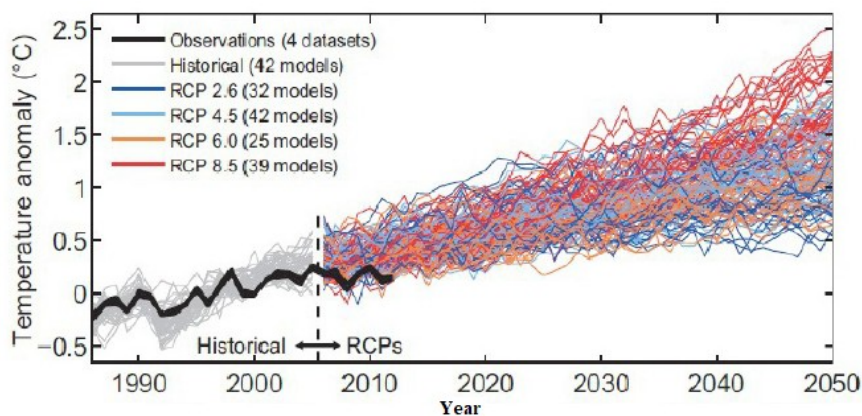


Figura 3.4. Anomalia della temperatura media globale atmosferica a breve termine, relativa al periodo 1986-2005, secondo tutti i modelli numerici disponibili [3]. La sostanziale totalità delle proiezioni prevede una tendenza monotona crescente. Queste simulazioni numeriche globali non assumono il verificarsi di eventi imponderabili [6], come ad esempio importanti eruzioni vulcaniche oppure cambiamenti inattesi in termini di forzanti naturali interne ed esterne al sistema climatico.

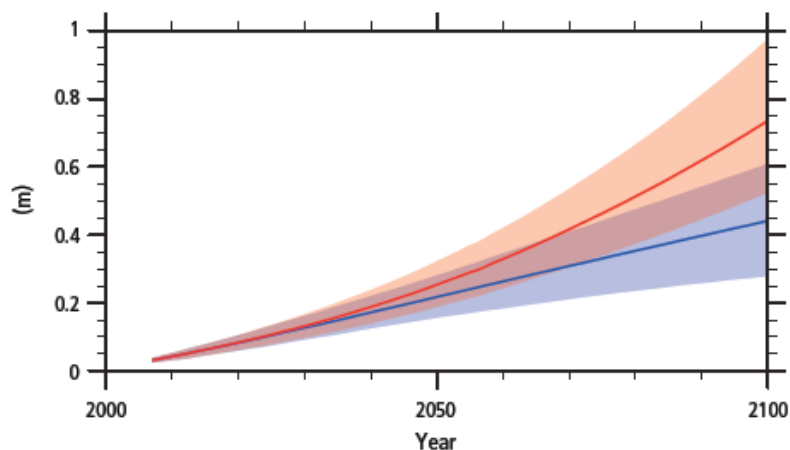


Figura 3.5. Anomalia del livello medio del mare su scala globale relativa al ventennio 1986-2005 secondo gli scenari RCP2.6 (in blu) ed RCP8.5 (in rosso), stimata per il periodo 2006-2100. All'andamento medio (linee continue colorate) è associata anche la relativa incertezza (area ombreggiata) [3].

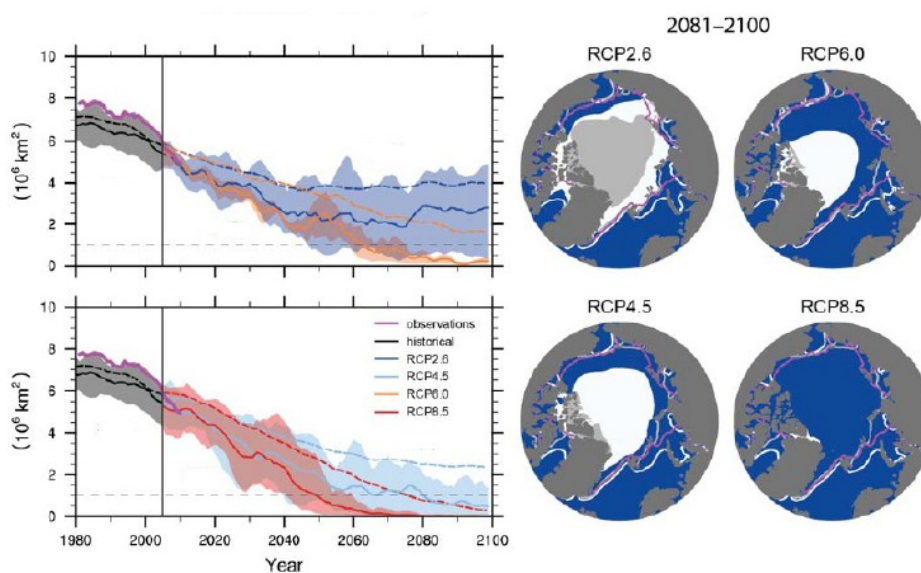


Figura 3.6. Proiezione - secondo gli scenari RCP - dell'estensione dei ghiacci artici nel mese di settembre [3].

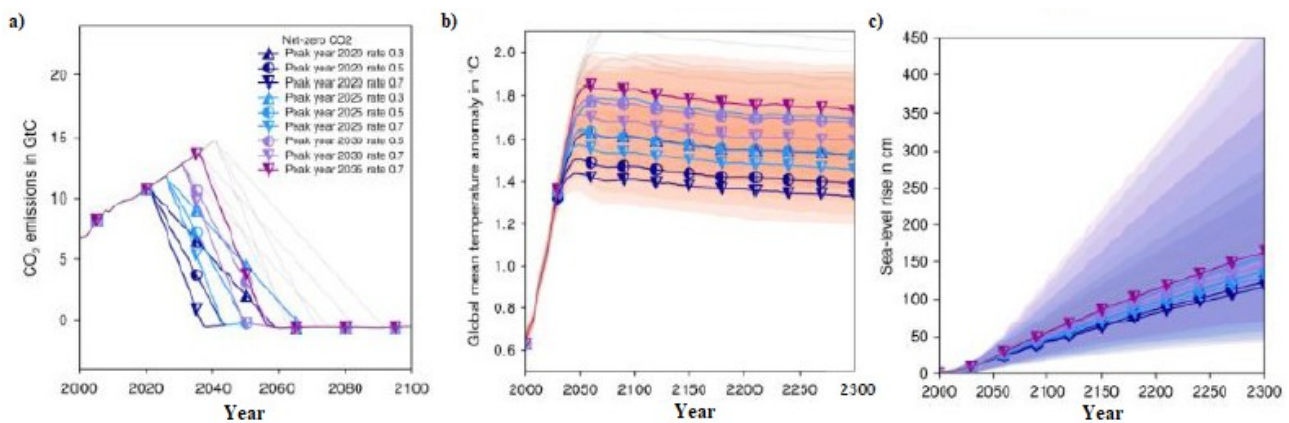


Figura 3.7. a) Proiezione delle emissioni di gas serra e conseguente risposta da parte di atmosfera - b) - ed oceano - c) - rispettivamente in termini di temperatura media globale e di livello medio del mare (valori relativi a quelli del 2000) [2]. Atmosfera ed oceano sono rispettivamente caratterizzati da tempi di risposta sub-secolari e plurisecolari.

3.2.2 Cambiamenti climatici globali durante i secoli successivi al XXI

Anche se si riuscisse a stabilizzare le concentrazioni di gas serra in atmosfera limitandone le emissioni, riscaldamento di natura antropica ed aumento del livello medio del mare continuerebbero a verificarsi per secoli a causa delle scale temporali associate ai processi climatici ed ai relativi *feedback* [1], come peraltro già evidenziato alla fine del sotto-paragrafo precedente.

Se si riuscisse a stabilizzare la forzante radiativa mantenendo costanti tutti gli agenti forzanti previsti dagli scenari B1 e A1B nell'anno 2100, si prevede che si verificherebbe un ulteriore aumento della temperatura media globale di circa 0.5 °C nei successivi cento anni. Inoltre, il processo di espansione termica dell'acqua conseguente a questo incremento di temperatura porterebbe ad un innalzamento del livello medio del mare - rispetto al periodo 1980-1999 - compreso tra 0.3 m e 0.8 m entro il 2300. Tale processo di espansione termica persisterebbe per diversi secoli a causa del tempo necessario per trasportare il calore nel profondo oceano. All'incremento del livello medio del mare contribuirebbe anche lo scioglimento dei ghiacci continentali in Groenlandia, sempre secondo gli scenari in analisi [1].

Infine, si sottolinea ciò che è già stato anticipato all'inizio del presente sotto-paragrafo: anche stabilizzando le concentrazioni di gas serra in atmosfera, emissioni passate e future di questi ultimi continuerebbero a contribuire al riscaldamento globale e all'innalzamento del livello medio del mare per più di un millennio [1]. Questo possiede come causa l'elevato tempo di residenza medio in atmosfera dei gas serra longevi, che quindi necessitano di tempi altrettanto elevati per essere rimossi dall'atmosfera stessa.

3.3 Cambiamenti climatici futuri: impatti e rischi

In questo paragrafo si analizzano brevemente alcuni degli **impatti** e dei **rischi** che i cambiamenti climatici futuri potrebbero avere su sistemi e settori, nell'intervallo di variazione previsto dai vari modelli (scenari) per il XXI secolo.

Si elencano di seguito i sistemi ed i settori che ci si aspetta essere maggiormente perturbati dai cambiamenti climatici futuri previsti [3]:

- ecosistemi (rischio di estinzione di alcune specie animali e vegetali);
- cibo ed alimentazione;

- coste;
- industria, insediamenti e società;
- salute;
- acqua.

Questo elenco potrebbe anche essere esteso alle varie regioni che si prevede essere maggiormente influenzate dai futuri cambiamenti climatici, ma ciò esula dallo scopo di questo documento.

3.3.1 Acidificazione dell'oceano

L'assorbimento di carbone di natura antropica da parte dell'oceano a partire dal 1750 ha condotto ad un processo di **acidificazione dell'oceano** stesso, con una riduzione del pH pari a 0.1 per le acque superficiali, corrispondente ad un incremento di acidità del 26% , misurato in termini di concentrazione di ioni idrogeno [3]. L'incremento della concentrazione di CO₂ in atmosfera porta ad ulteriore acidificazione, in quanto aumenta anche il passaggio di tale gas nelle acque dei mari. Secondo gli scenari SRES, è prevista una riduzione globale media - compresa tra 0.14 e 0.35 - del pH della superficie oceanica nel corso del XXI secolo [1]. Si tratta di una proiezione che - come si può osservare in figura 3.8 - è in accordo con quanto previsto dagli scenari RCP. L'effetto che l'acidificazione dell'oceano ha sulla biosfera marina non è ben nota, anche se ci si aspetta che una progressiva acidificazione possa condurre ad effetti negativi soprattutto su organismi caratterizzati da un guscio - come ad esempio i coralli - e sulle specie da essi dipendenti [1].

3.3.2 Eventi estremi

A partire dal 1950 si sono osservati cambiamenti in molti **eventi estremi** - meteorologici e climatici - alcuni dei quali sono stati associati all'influenza antropica, in particolare [3]:

- diminuzione delle temperature minime;
- aumento delle temperature massime;
- incremento del livello massimo dei mari;
- crescita del numero di eventi di precipitazioni pesanti in alcune regioni.

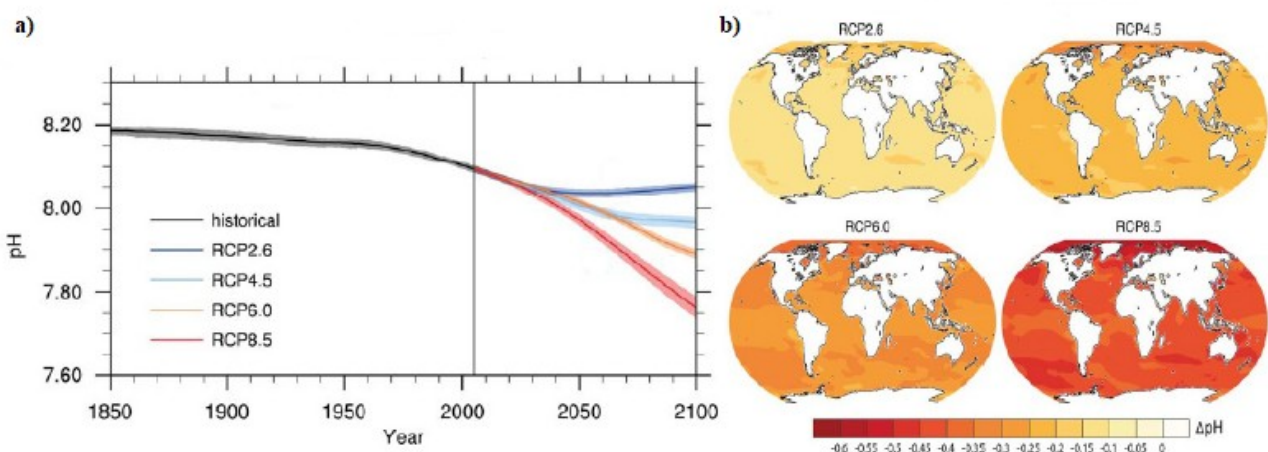


Figura 3.8. a) pH superficiale globale dell'oceano per il periodo 1850-2100. La linea nera verticale stabilisce l'anno a partire dal quale si ha a che fare con delle previsioni, stimate secondo gli scenari RCP. b) Proiezione dell'anomalia del pH superficiale globale dell'oceano per il periodo 2081-2100, secondo gli scenari RCP e relativa al ventennio 1986-2005 [3].

Gli impatti dovuti agli eventi estremi legati ai recenti cambiamenti climatici - come ondate di calore, siccità, inondazioni, cicloni ed incendi spontanei - rivelano (con un livello di confidenza molto elevato) una vulnerabilità significativa ed un'esposizione di alcuni ecosistemi e molti sistemi umani all'attuale variabilità climatica [3].

3.3.3 Rischio di cambiamenti improvvisi o irreversibili

Il riscaldamento di natura antropica può condurre ad impatti improvvisi, o addirittura irreversibili, i quali dipendono dal tasso di variazione e dall'entità dei cambiamenti climatici.

Ad esempio, si stima che il 20/30% circa delle specie animali e vegetali note siano ad un maggior **rischio** di estinzione in caso di aumento di temperatura media globale - rispetto ai valori medi relativi al periodo 1980-1999 - compreso tra 1.5 °C e 2.5 °C. Se si dovessero raggiungere incrementi superiori a circa 3.5 °C, i modelli analizzati prevedono il verificarsi di estinzioni che coinvolgerebbero le specie di tutto il globo (tra il 40% ed il 70% di quelle note).

Capitolo 4

Adattamento e mitigazione: opzioni e risposte

4.1 Rispondere ai cambiamenti climatici: cenni

Il miglior modo di rispondere ai cambiamenti climatici consiste nel ridurre il tasso e l'intensità di tali cambiamenti [1]. Esistono due principali tipologie di risposte:

- **adattamento** agli impatti dei cambiamenti climatici;
- **mitigazione**, ossia riduzione delle emissioni di gas serra.

4.1.1 Opzioni di adattamento

L'**adattamento** ai cambiamenti climatici - che storicamente ha ricevuto minore attenzione rispetto alla mitigazione in termini di politica climatica internazionale [3] - può ridurre la vulnerabilità, sia a breve che a lungo termine. Oltre alle strategie di adattamento attualmente in vigore in merito ad eventi climatici e meteorologici - come ad esempio inondazioni, siccità e tempeste - sono necessarie ulteriori misure di adattamento su scala regionale e locale per ridurre gli impatti dei cambiamenti climatici previsti. Tuttavia, non ci si aspetta che l'adattamento da solo faccia fronte a tutti gli effetti dei cambiamenti climatici previsti, in particolare a lungo termine, poiché la maggior parte degli impatti aumenta di intensità [1].

La capacità di adattarsi dipende da circostanze socio-economiche ed ambientali, oltre che dalla disponibilità di informazioni. Si tratta di una capacità dinamica influenzata dalla base produttiva di una società, che è limitata nella sua realizzazione e nella sua efficacia dai seguenti molteplici vincoli [1]:

- finanziari;
- tecnologici;
- cognitivi;
- comportamentali;
- politici;
- sociali;
- istituzionali;
- culturali.

Anche società con un'alta capacità di adattamento rimangono vulnerabili ai cambiamenti climatici, alla variabilità climatica ed agli eventi estremi [1]. Ad esempio, l'uragano *Katrina* (2005, New Orleans) causò ingenti costi - sia umani che economici - negli Stati Uniti.

4.1.2 Opzioni di mitigazione

Opzioni di **mitigazione** sono disponibili in ogni settore principale. Queste possono essere più costose - ma allo stesso tempo anche più efficaci - nel caso in cui si adotti un approccio volto alla riduzione dell'utilizzo di energia, oltre che alla diminuzione dell'intensità delle emissioni di gas serra, da parte dei settori di uso finale [3]. Lo scopo è quello di ridurre le emissioni nette di gas serra e di favorire risorse energetiche diverse da quelle rappresentate dai combustibili fossili, per minimizzare l'utilizzo di questi ultimi. Alla realizzazione di tale obiettivo si può giungere mediante le due seguenti categorie di opzioni [1]:

- **indirette**, come ad esempio il miglioramento dell'intensità dell'energia mediante l'accrescimento dell'efficienza di risorse, produzione, comportamento e tecnologia;
- **dirette**, come ad esempio la riduzione della deforestazione, della degradazione e degli incendi delle foreste, o l'immagazzinamento di CO₂ in sistemi naturali (riforestazione) ed artificiali (pozzi di raccolta).

4.1.3 Relazione tra adattamento e mitigazione

Le politiche in merito ai cambiamenti climatici legate all'efficienza energetica e alle risorse rinnovabili portano spesso benefici economici, migliorano la sicurezza energetica e riducono le emissioni locali di inquinanti. Queste possono essere implementate in maniera socialmente ed economicamente sostenibile, purché ciò sia fatto adeguatamente, senza entrare in conflitto con settori e sistemi, quali ad esempio la biodiversità [1].

Esistono **sinergie** tra opzioni di adattamento e mitigazione che includono, ad esempio, le seguenti attività [1]:

- produzione di biomasse;
- creazione di aree protette;
- gestione del territorio;
- utilizzo di energia negli edifici;
- silvicoltura.

Tuttavia, le sinergie che si instaurano tra adattamento e mitigazione sono generalmente limitate in altri settori [1].

Inoltre, esistono anche dei potenziali **compromessi** che includono l'incremento delle emissioni di gas serra a causa dell'aumento del consumo di energia dovuto alle risposte di adattamento ai cambiamenti climatici [1].

4.2 Cooperazioni internazionali: cenni

Siccome il cambiamento climatico ha la peculiarità di essere un **processo collettivo** su scala globale, affinché un meccanismo di mitigazione sia efficace, non può trarre vantaggio da singole opzioni indipendenti, nonostante ciò possa comunque condurre a benefici locali secondari. Pertanto, al fine di mitigare con efficacia le emissioni di gas serra, sono necessarie risposte cooperative che includano **cooperazioni internazionali** [1].

Mentre l'adattamento ai cambiamenti climatici si focalizza principalmente su scale comprese tra quelle locali e quelle nazionali, la sua efficacia può essere migliorata attraverso un meccanismo di coordinamento che coinvolga scale di governance e che includa una cooperazione internazionale, come per il processo di mitigazione. Infatti, la cooperazione internazionale ha contribuito a facilitare la creazione di strategie, piani e azioni di adattamento a livello nazionale, sub-nazionale e locale. Una varietà di strumenti per la politica climatica è stata impiegata, a livello internazionale e regionale, per affrontare la mitigazione, oltre che per sostenere e promuovere l'adattamento su scale nazionali e sub-nazionali [1].

4.2.1 La Convenzione UNFCCC

La Convenzione **UNFCCC** (acronimo dell'inglese *United Nations Framework Convention on Climate Change*, in italiano *Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici*) è il principale forum multilaterale adibito ad affrontare i cambiamenti climatici. Essa vanta una partecipazione quasi universale [1].

A partire dal 2007, le attività dell'UNFCCC hanno cercato di migliorare le azioni nell'ambito della Convenzione e hanno portato ad un numero crescente di istituzioni e altri arrangiamenti per la cooperazione internazionale circa i cambiamenti climatici. Tra le realizzazioni della presente Convenzione compaiono anche le seguenti attività [1]:

- *Cancún Agreements* (2010);
- *Durban Platform for Enhanced Action* (2011);

4.2.2 Il Protocollo di Kyoto

Il **Protocollo di Kyoto** (11 dicembre 1997) è un trattato internazionale in materia ambientale riguardante il riscaldamento globale. È stato il primo passo obbligato verso l'attuazione dei principi e degli obiettivi forniti dalla Convenzione UNFCCC, ed offre conferenze volte alla realizzazione del fine ultimo di quest'ultima [1].

Il Protocollo prevede l'obbligo di operare una riduzione delle emissioni di inquinanti - quali diossido di carbonio, metano, ossido di diazoto ed idrocarburi alogenati - in una misura non inferiore all'8.65% rispetto alle emissioni registrate nel 1985. In attuazione di ciò, l'Unione Europea (UE) e gli altri Paesi firmatari (tra cui non figurano gli Stati Uniti) hanno istituito un sistema finanziario basato sui cosiddetti *crediti di emissione* [1]. I Paesi che riducono le emissioni acquisiscono un numero di crediti - certificati da apposite agenzie - corrispondente alle tonnellate di CO₂ (o di un qualsiasi altro gas che provoca un effetto serra equivalente) sottratte all'atmosfera. Tali crediti sono rivendibili a Paesi che, invece, ne emettono oltre la soglia consentita. In questo modo - dal momento che è prevista una tassa per chi non ha intrapreso una strategia di riduzione dell'impatto negativo delle emissioni di gas serra sul clima - si impone ad industrie e governi inquinanti l'acquisto di crediti da Paesi che ne sono possidenti. I crediti di emissione, quindi, sono uno strumento istituito per consentire a governi ed aziende di raggiungere i propri obiettivi di riduzione delle emissioni di gas serra nel modo più flessibile ed economicamente efficace, massimizzando le riduzioni ottenibili a parità di investimento.

Bibliografia

- [1] IPCC, *Fourth Assessment Report (AR4)*, 2007
- [2] L. Marchesi, D. Giaiotti, *Cambiamenti climatici e variazioni del livello del mare*, ARPA FVG 2018
- [3] IPCC, *Fifth Assessment Report (AR5)*, 2014
- [4] NOAA, https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_global.shtml
- [5] National & Snow Data Center, <https://nsidc.org/cryosphere/quickfacts/icesheets.html>
- [6] D. Giaiotti, *Cenni di climatologia e cambiamenti climatici*, Lezioni di Fisica dell'Atmosfera (Università degli Studi di Trieste, anno accademico 2018/2019)
- [7] Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Geologic_temperature_record
- [8] U.S. Geological Survey, <https://water.usgs.gov/edu/watercycleice.html>
- [9] Wikipedia, <https://it.wikipedia.org/wiki/Aria>
- [10] Wikipedia, https://it.wikipedia.org/wiki/Forzante_radiativo
- [11] R. Mosetti, *L'effetto serra e il riscaldamento globale*, Lezioni di Oceanografia (Università degli Studi di Trieste, anno accademico 2018/2019)
- [12] OASI, <http://oasi.rse-web.it/index.php/vapore-acqueo/>