

ALMA MATER STUDIORUM • UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di laurea in Scienze Ambientali

**Il "Global Warming Hiatus": una sintesi del fenomeno
e delle possibili cause**

Tesi di laurea in Climatologia

Relatore:

Chiar.mo Prof.

Marco Zavatarelli

Presentata da:

India Ronchi

II sessione

Anno Accademico 2017-2018

Indice

Indice delle figure	6
Introduzione	11
Capitolo 1 Il meccanismo che regola la temperatura terrestre	13
1.1 L'effetto serra.....	13
1.2 Gas serra presenti in atmosfera.....	15
1.3 Emissioni dei gas serra.....	18
Capitolo 2 La temperatura nel corso della storia ed il Global Warming	22
2.1 Ricostruzione della temperatura globale nel tempo.....	22
2.2 Il riscaldamento globale	24
Capitolo 3 Il “Global Warming Hiatus”	27
3.1 Cosa si intende per Global warming hiatus e le sue caratteristiche.....	27
3.2 Ipotesi e analisi.....	29
3.3 Discussione.....	38
Capitolo 4 Il clima oggi	42

4.1 Il clima degli ultimi anni.....	42
4.2 Conclusioni.....	46
Bibliografia	49
Sitografia	51

Indice delle figure

1.1 lo spettro elettromagnetico.....	13
1.2 Spettro elettromagnetico di emissione del Sole e della Terra. Lo spettro di emissione del Sole è ridotto di un fattore 10^6	14
1.3 Lo schema in figura mostra, in modo semplificato la quantità di energia che deriva dal sole, la quantità che viene riflessa direttamente da nubi e aerosol e quella assorbita dalla terra (in giallo); mostra anche la quantità di energia che la superficie riemette, quella che riesce ad uscire dall'atmosfera e raggiungere lo spazio e quella che rimane in atmosfera a causa dei gas serra (in rosso).....	14
1.4 La percentuale dei gas responsabili dell'effetto serra (IPCC 2007).....	16
1.5 Variazione temporale dal 1650 al 2010 delle concentrazioni medie globali di CO ₂ , CH ₄ e N ₂ O (IPCC, 2013).....	18
1.6 Le Emissioni di CO ₂ di vari paesi del mondo (UNFCCC).....	19
1.7 La Concentrazione atmosferica di CO ₂ misurata dagli osservatori Manua Loa, (Hawaii) in rosso e Polo Sud (in blu). I valori "Mauna Loa" sono destagionalizzati (IPCC, Ar5).....	20
1.8 La media globale di N ₂ O da AGAGE (in rosso) e NOAA/ESRL/GMD (in blu) con risoluzione mensile (IPCC, Ar5).....	20
2.1 Variazione della concentrazione atmosferica di anidride carbonica nel tempo a partire da 65.000.000 di anni fa. La figura evidenzia anche l'alternarsi di periodi glaciali e interglaciali (fonte da Law Dome: 1006 A.D.-1978 A.D, Vostok ice core: 417,160 - 2,342 years BP, Dome C ice core: 650,000 - 415,000 BP combinati).....	23
2.2 Anomalia media della temperatura atmosferica ricostruita dall'IPCC negli ultimi 150 anni.....	24
2.3 L'estensione media mensile del ghiaccio artico dal 1979 al 2012, dal National Snow and Ice Database Center.....	25
3.1 Temperatura globale superficiale dal 1975 al 2012, in blu il periodo dal 1998 al 2012, (NASA GISS).....	27

3.2	Temperatura superficiale globale raccolta da diversi data-set dal 1980 al 2015, in evidenza il periodo dal 1999 al 2012 (linee tratteggiate) mostra una diminuzione dell'aumento della temperatura (IPCC Ar).....	28
3.3	Variazioni stimate delle temperature medie superficiali globali e delle concentrazioni di CO2 dal 1880. Le variazioni sono mostrate come anomalie dei valori medi raccolti tra il 1901 e il 2000. La scala per la CO2 è espressa in parti per milione (ppm) in volume rispetto a una media di 320 ppm mentre le anomalie di temperatura sono relative a una media di 13.9°C; dati da NOAA, (IPCC Ar.5).....	30
3.4	Il grafico mostra la correlazione tra la GMST e El Niño per i periodi 1950 – 1978, 1979 – 1998, and 1950 – 1998, da “Evolution of El Niño–Southern Oscillation and global atmospheric surface temperatures”, Trenberth et al. 2001.....	31
3.5	Nel grafico la somma del forzante vulcanico, antropico e solare, da “How natural and anthropogenic influences alter global and regional surface temperatures: 1889 to 2006”, Lean e Rind 2008.....	31
3.6	Nel grafico in alto, le anomalie di temperatura dal 1980 al 2010 considerando tutti i forzanti, quali quello solare, vulcanico, antropico e ENSO, dati osservati da GISS, NCDC, HadCRUT, RSS e UAH; nel grafico in basso, le anomalie di temperatura nello stesso periodo nel quale sono stati rimossi i forzanti solare, vulcanico e ENSO, dando importanza al fattore antropico, Global temperature evolution 1979–2010, Foster e Rahmsorf, 2011.....	32
3.7	I grafici mostrano il contributo dei gas serra (a), aerosol antropico (b), gas serra e aerosol antropico (c), variabilità solare (d), aerosol vulcanico (e) e AMO (f) nella variabilità della temperatura media globale (in rosso) e sui modelli di simulazione (linee colorate), da “The Atlantic Multidecadal Oscillation as a dominant factor of oceanic influence on climate”, Chylek et al 2014.....	33
3.8	Nel grafico il diagramma dell'intero indice di temperatura media terra-oceano, dal 1998 al 2013, con la linea di regressione ordinaria dei minimi quadrati sovrapposta, da “debunking the climate hiatus” di Rajaratnam et al, 2015.....	34
3.9	Diagramma di serie temporali di tendenze osservate in periodi di 16 anni, da “debunking the climate hiatus” di Rajaratnam et al, 2015.....	34
3.10	Mostra le anomalie della GMST da GISS nel 2015; l'istogramma in basso rappresenta la distribuzione dei presunti anni di inizio dello hiatus (tra il 1993 e il 2001); il riquadro in alto mostra le anomalie della temperatura dal 1880 ad oggi. da “On the definition and identifiability of the alleged “hiatus” in global warming” di Lewandowsky et al, 2015.....	35

3.11	L'immagine mostra la PDO e l'AMO nel periodo da giugno ad agosto 2018, dati raccolti da NMME.....	36
3.12	Il grafico mostra le inversioni della PDO, in rosso positiva e in blu negativa, dal 1900 al 2010, da "Seasonal aspect of the recent pause in surface warming", Trenberth et al, 2014.....	37
3.13	I valori di El Niño e PDO osservati e simulati; nel grafico (a), i valori osservati grezzi e smussati; nel grafico (b), i valori simulati grezzi e smussati Da "the hiatus in Global Warming and interactions between the El Niño and the Pacific Decadal Oscillation: comparing observations and modeling results, Seip e Wang 2018.....	38
3.14	Il grafico che accentua i periodi di pausa avvenuti in periodi passati derivati da dati di diversi modelli climatici. Da "Global temperature evolution: recent trends and some pitfalls" di Stefan Rahmstorf Grant Foster e Niamh Cahill, 2017.....	38
3.15	Dati di NOAA. In alto, la temperatura media globale superficiale (in arancione) è aumentata di 0.07°C (0.13°F) ogni decade dal 1880 (in rosso) che corrisponde al tasso di riscaldamento durante il periodo di 15 anni definito come hiatus (in grigio). In basso, il tasso di riscaldamento dal 1998 al 2012 mostra un aumento più lento rispetto ai due periodi di 15 anni precedenti ma maggiore rispetto ai periodi ancora prima (1942-1956 e 1956-1970).....	39
3.16	Grafico che mostra gli eventi El Niño e La Niña, dopo l'evento El Niño del 1997-98, eventi La Niña (in blu) si sono verificati in maggiore numero rispetto a eventi El Niño (in rosso) contribuendo al rallentamento nel riscaldamento della superficie nel periodo 1998-2012. Dati presi da NOAA Climate.gov, basati su dati dal NOAA Prediction Center.....	40
3.17	Variazioni naturali del vento e delle correnti permettono l'immagazzinamento di calore in profondità nell'oceano. Nel periodo dello Hiatus l'immagazzinamento di calore a profondità di 2000 metri è aumentato. NOAA climate.gov, dati da Cheng et al, 2017.....	41
4.1	La distribuzione di anomalie nel contenuto di calore nell'oceano nel 2017; Cheng e Zhu (2018) usando dati da IAP-CAS.....	42
4.2	Anomalie nel volume del ghiaccio artico dal 1979 al 2017; da PIOMAS.....	43
4.3	Il grafico in figura mostra l'andamento della concentrazione di CO2 dal 2000 al 2018, raggiungendo i 409 ppm. Dati da NOAA, 2018.....	43
4.4	Il grafico mostra l'indice di temperatura superficiale che mostra un continuo aumento di temperatura dal 1950 in poi, sempre maggiore, con il 2017 che raggiunge un aumento di 0.9°C; NASA.....	44

- 4.5 Il grafico mostra i dati riguardanti la superficie dei ghiacciai dell'Artico con un minimo raggiunto nel 2012 di 3.40 milioni di km², mentre nel 2017 la superficie è stata di 4.80 milioni di km²; NASA.....44
- 4.6 Il grafico mostra la perdita di massa del ghiaccio dell'Antartide e della Groenlandia; in alto, l'Antartico ha un tasso di cambiamento di 127.0±39 Gt all'anno, a giugno 2017 ha perso 1870±175 Gt; la Groenlandia invece ha un tasso di cambiamento di 286.0±21 Gt per anno, a giugno 2017 ha perso circa 3771±98 Gt; in basso, l'aumento del livello del mare dal 1993 ad oggi, mostra un tasso di cambiamento di 3.2 mm per anno; NASA.....45
- 4.7 Il grafico mostra l'aumento nel livello del mare dal 1993 ad oggi, il tasso di cambiamento è di 3.2 mm per anno; a giugno 2018 si raggiungono gli 86.3±4 mm; dati da NASA.....45

Introduzione

Da sempre, la temperatura nel sistema terra è cambiata, sia per cause naturali che, per cause derivanti dall'attività umana. Già da quando ancora la vita sulla terra si doveva sviluppare, la terra è andata incontro a eventi climatici che hanno cambiato la temperatura a livello globale, come ad esempio glaciazioni o eruzioni vulcaniche.

Da quando però, si è sviluppata la vita sulla terra ed in particolare dopo la rivoluzione industriale, la temperatura ha iniziato ad aumentare in maniera molto più veloce. Questo perché a causa delle attività umane come l'utilizzo dei combustibili fossili o il cambiamento nell'uso del suolo, sono cambiate le concentrazioni di gas nell'atmosfera che hanno causato un aumento della temperatura globale. Recentemente, in un periodo di all'incirca quindici anni, dal 1998 al 2013, in molti hanno notato che l'aumento della temperatura superficiale globale sembra essere rallentato.

In questo testo, verrà spiegato in generale in cosa consiste l'effetto serra e quali sono i gas che lo causano per poi parlare delle concentrazioni di questi gas e, di come sono aumentati con lo scorrere degli anni.

Nel capitolo seguente, si sposterà l'attenzione sulla storia della temperatura nel corso della storia della terra e dei vari cambiamenti avvenuti prima e dopo la rivoluzione industriale.

Ci concentreremo poi, nel terzo capitolo, sul periodo in cui si è verificato un rallentamento nell'aumento della temperatura, definire le caratteristiche di questi quindici anni e cercare di capire se è avvenuta o no una vera e propria pausa nel riscaldamento globale citando diversi studi svolti da scienziati nei vari anni discutendo in seguito, se è avvenuto uno "Hiatus" o no.

Parleremo infine, del clima e delle temperature negli ultimi anni, il 2017 e il 2018, e vedremo come, l'aumento della temperatura sta influenzando diversi aspetti del sistema Terra.

Capitolo 1

Il meccanismo che regola la temperatura terrestre

1.1 L'effetto serra

L'effetto serra è un processo di regolazione della temperatura superficiale della Terra per cui, l'atmosfera terrestre è in grado di trattenere la radiazione ad onda lunga emessa dalla superficie del pianeta (superfici oceaniche e continentali), mantenendo la temperatura superficiale media del pianeta intorno ai 15°C; senza questo processo, la temperatura terrestre sarebbe assai più bassa.

Questo fenomeno dipende dalla presenza, nella composizione chimica dell'atmosfera di gas, detti appunto gas serra, che assorbono in maniera efficace la radiazione ad onda lunga infrarossa emessa dalla superficie terrestre.

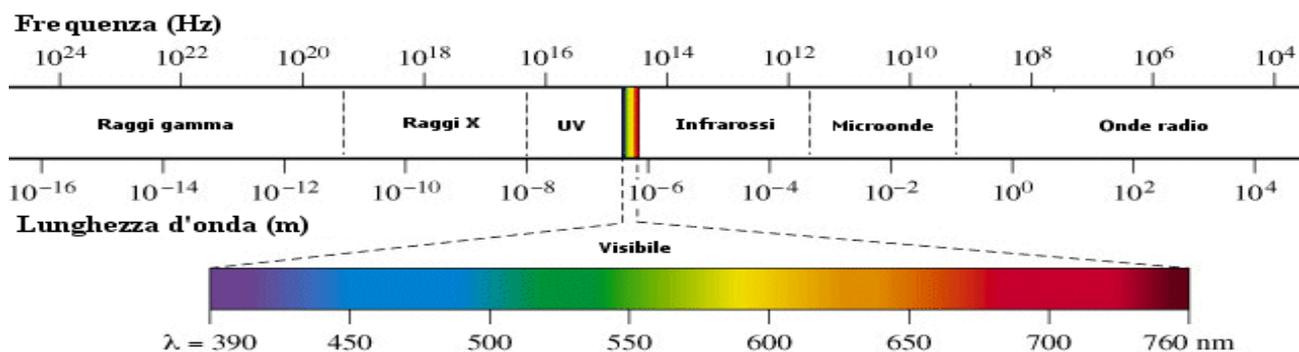


Figura 1.1, lo spettro elettromagnetico.

Il sole, irradia energia a lunghezze d'onda corta (Fig. 1.1), prevalentemente nello spettro del visibile o vicino al visibile.

Circa un terzo dell'energia solare raggiunge l'atmosfera terrestre e viene riflessa direttamente nello spazio. I restanti due terzi vengono assorbiti dalla superficie terrestre.

Per bilanciare l'energia assorbita, la terra irradia la stessa quantità nello spazio ma tramite energia a lunghezza d'onda lunga, soprattutto raggi infrarossi (Fig 1.2).

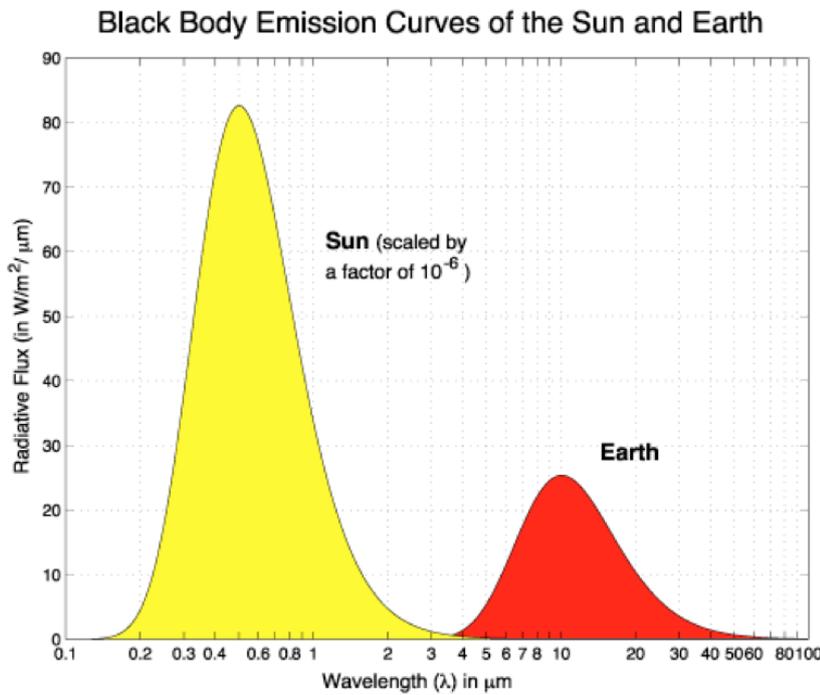
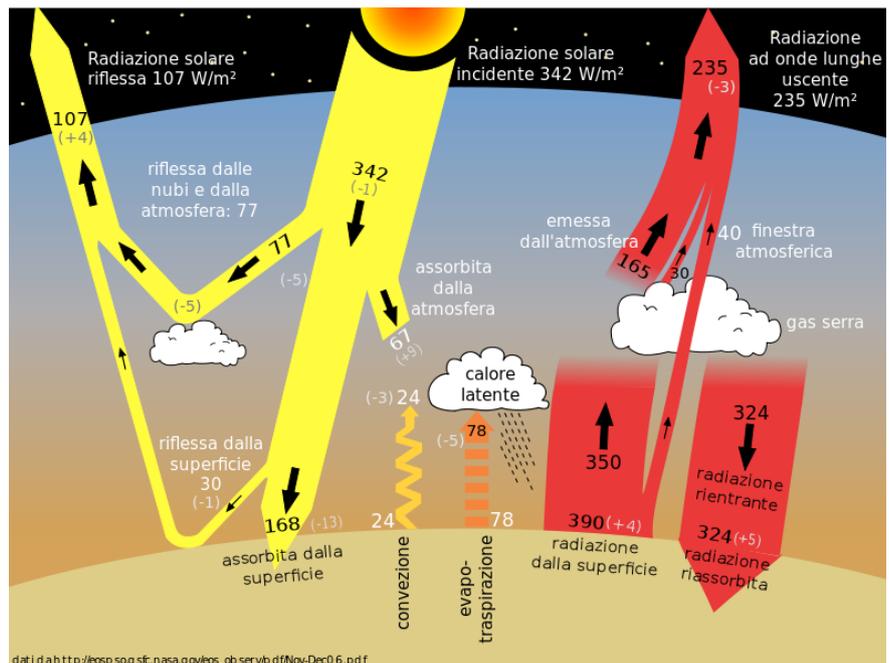


Fig. 1.2, Spettro elettromagnetico di emissione del Sole e della Terra. Lo spettro di emissione del Sole è ridotto di un fattore 10^6

In generale, la radiazione solare (principalmente a lunghezza d'onda "corta") penetra l'atmosfera e raggiunge la superficie terrestre. A sua volta la superficie terrestre emette, in funzione della sua temperatura, verso l'atmosfera radiazione a lunghezza d'onda maggiore.

Qui entrano in gioco i gas serra, che sono in grado di assorbire efficacemente parte della radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre, facendo aumentare la temperatura atmosferica sino al raggiungimento di una temperatura in equilibrio tra la radiazione solare arrivata sulla terra e la radiazione infrarossa emessa.

Fig. 1.3, Lo schema in figura mostra, in modo semplificato la quantità di energia che deriva dal sole, la quantità che viene riflessa direttamente da nubi e aerosol e quella assorbita dalla terra (in giallo); mostra anche la quantità di energia che la superficie riemette, quella che riesce ad uscire dallo spazio e quella che rimane in atmosfera a causa dei gas serra (in rosso).



Più in specifico, come si può vedere dalla figura 1.3, parte

dell'energia proveniente dal sole, circa il 30% (107 W m^{-1}), viene immediatamente riflessa dalle nubi, dall'aerosol atmosferico e dalla superficie terrestre, il 20% (circa) viene direttamente assorbito dalla atmosfera, mentre, il restante 50% (168 W m^{-1}) viene assorbito dalla superficie terrestre, la quale emette energia in funzione della sua temperatura come radiazione infrarossa che viene in buona parte assorbita dalla atmosfera, riscaldandola.

Distinguiamo due tipi di effetto serra: quello naturale e quello antropico.

L'effetto serra naturale, è dovuto alla presenza naturale di gas serra nell'atmosfera mentre l'effetto serra antropico, è causato dall'emissione dovuta alle attività umane, ad esempio l'utilizzo dei combustibili fossili.

1.2 Gas serra presenti in atmosfera

I gas che compongono l'atmosfera non contribuiscono tutti all'effetto serra allo stesso modo, infatti, le molecole che compongono il 98% dell'atmosfera, quali ossigeno e azoto (N_2 e O_2), non sono in grado di assorbire efficacemente la radiazione ad onda lunga.

L'effetto dei gas serra dipende soprattutto dal loro tempo di residenza in atmosfera, ovvero il tempo medio di permanenza nell'aria delle molecole di gas prima di essere rimosse.

Maggiore è il tempo di residenza di un gas maggiore è il suo effetto serra.

I gas che hanno un tempo di residenza più lungo sono l'anidride carbonica e il protossido di azoto, il quale è superiore al secolo.

I gas che causano maggiore effetto serra sono quelli che hanno un "potenziale serra" maggiore e possiedono una struttura asimmetrica come il metano e il vapore acqueo.

Un caso particolare, tra i gas serra, è l'anidride carbonica (CO_2) che non ha un elevato potenziale serra ma, essendo il gas più abbondante nell'atmosfera, è considerato il gas serra maggiormente responsabile dell'effetto serra (Fig 1.4).

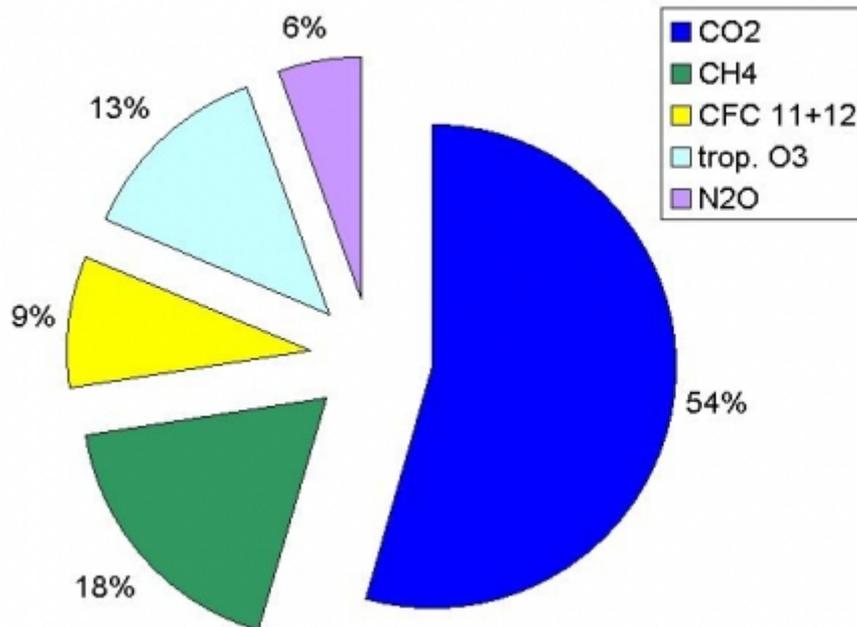


Fig. 1.4. la percentuale dei gas responsabili dell'effetto serra (IPCC 2007).

I gas serra più importanti sono:

- Il vapore acqueo (H₂O): è il responsabile di circa due terzi dell'effetto serra naturale, le molecole d'acqua sono in grado di catturare il calore irradiato dalla terra e di riscaldarla;
- L'anidride carbonica (CO₂): questo gas è sia naturale che antropico. I serbatoi naturali di CO₂ sono gli oceani, i sedimenti fossili, la biosfera e l'atmosfera, mentre la CO₂ antropica è legata alle attività umane che comportano l'uso dei combustibili fossili, la deforestazione o, più in generale ai cambiamenti di uso del suolo;
- Il metano (CH₄): è prodotto dalla degradazione del materiale organico in ambiente anaerobico. Anche in questo caso l'origine del metano atmosferico dipende da fattori sia naturali che antropici;
- Gli alocarburanti: principalmente CFC, HCFC e HFC. Sono di origine antropica. La loro concentrazione nell'atmosfera è bassa ma hanno un potenziale di riscaldamento molto più elevato della CO₂;
- Il protossido di azoto (N₂O): è presente in pochissima concentrazione in atmosfera, anche se negli ultimi anni è aumentato, ma è molto più potente della CO₂ nel trattenere calore.
- L'ozono (O₃): presente in minima parte in atmosfera; quello stratosferico filtra le radiazioni provenienti dal sole ma nella troposfera, si comporta come gas serra. L'ozono si forma dall'interazione dell'ossigeno con le radiazioni ultraviolette ma, si forma anche da processi di inquinamento ambientale.

Ci sono diversi fattori che influenzano l'effetto serra tra cui:

- Evaporazione: Determina l'aumento della concentrazione atmosferica di vapore acqueo.;
- Precipitazioni: se queste aumentano, l'atmosfera diventa meno umida e di conseguenza trattiene meno calore;
- Nuvole: queste hanno un doppio effetto. Raffreddano l'atmosfera perché riflettendo la radiazione solare, ma, possono anche assorbire la radiazione ad onda lunga emessa dalla superficie terrestre.
- Pressione: influenza direttamente e rapidamente la capacità dell'atmosfera di trattenere calore.

L'effetto serra non solo perché regola la temperatura sulla terra ma, è importante anche perché regola i rapporti tra ciclicità e variabilità climatica così che il sistema clima possa essere definito retroattivo: cambiando un parametro climatico, come ad esempio l'umidità, l'effetto serra agisce in modo tale da riportare alla normalità la capacità dell'atmosfera di trattenere o meno l'energia che arriva dal sole.

Ci sono diversi meccanismi di feedback da cui dipende l'effetto serra e l'aumento del suo effetto a causa della crescita della concentrazione dei gas serra in atmosfera.

Per esempio, con il riscaldamento dell'atmosfera a causa dell'aumento della concentrazione dei gas serra, la concentrazione di vapore acqueo aumenta, incrementando l'effetto serra.

Altri meccanismi di feedback riguardano le nuvole, le quali assorbono radiazione infrarossa e quindi aumentano l'effetto serra, riscaldando la terra.

Le nuvole riflettono anche la radiazione derivante dal sole e, facendo questo, raffreddano la terra.

Inoltre, l'effetto serra, nonostante abbia una certa regolarità per periodi lunghi, non ha valori fissi e continui nel tempo ma varia durante le stagioni dell'anno: durante l'estate l'effetto serra diminuisce mentre aumenta in inverno poiché essendo più freddo, l'atmosfera riesce a trattenere di più il calore. Può variare anche giornalmente modificando le temperature durante il giorno e la notte.

La composizione dell'atmosfera tuttavia è cambiata nel corso della storia della terra a causa di fattori geologici come eruzioni vulcaniche e l'assorbimento ed emissione di calore da parte degli oceani, fattori biologici come l'attività batterica e la respirazione di piante e animali e l'attività dell'uomo. Con questa cambia anche la capacità dell'atmosfera di trattenere più o meno calore e l'effetto serra.

1.3 Le missioni di gas serra

Un fattore importante nel definire il forzante radiativo, ovvero la misura dell'influenza di un fattore nell'alterare il bilancio tra energia entrante ed uscente dal sistema terra, in periodi recenti è l'aumento della concentrazione dei vari gas serra nell'atmosfera. Questo in natura, avviene normalmente ma negli ultimi 250 anni il grande aumento deriva dalle attività umane.

Distinguiamo i gas serra in:

- Gas a lungo tempo di residenza, come il metano e l'anidride carbonica. Questi sono chimicamente stabili e persistono nell'atmosfera per decenni o secoli; di conseguenza la loro emissione ha un'influenza a lungo termine sul clima;
- Gas a breve vita di residenza, come il monossido di carbonio. Sono reattivi chimicamente e generalmente rimossi da un processo di ossidazione naturale nell'atmosfera.

Dall'inizio della rivoluzione industriale, la concentrazione di CO₂ in atmosfera è aumentata di circa il 30%, la concentrazione di CH₄ è più che raddoppiata e la concentrazione di N₂O è cresciuta del

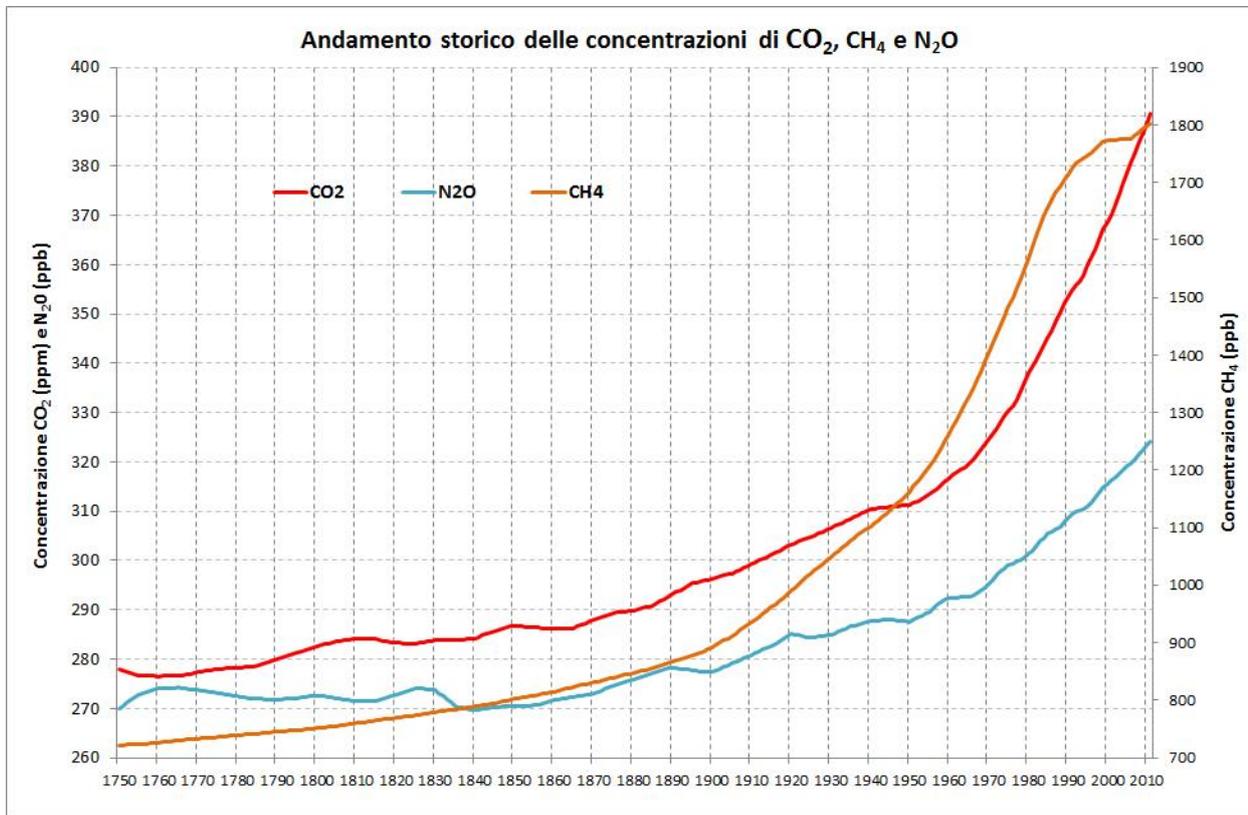


Fig. 1.5 Variazione temporale dal 1650 al 2010 delle concentrazioni medie globali di CO₂, CH₄ e N₂O (IPCC, 2013)

15% (fig. 1.5).

I fattori che possono aumentare la concentrazione dei gas serra in atmosfera, secondo i rapporti dell'IPCC, sono l'incremento della popolazione, la crescita economica, il sistema di produzione energetica basato principalmente su combustibili fossili e il maggiore disboscamento con conseguente utilizzo del suolo per agricoltura e allevamento.

Le emissioni di CO₂ variano da paese a paese (fig. 1.6). Le proiezioni dell'IPCC per quanto riguarda la concentrazione di questa nel 2100, variano, a seconda degli scenari di emissione da poco meno di 6 a più di 40 miliardi tonnellate di carbonio elementare.

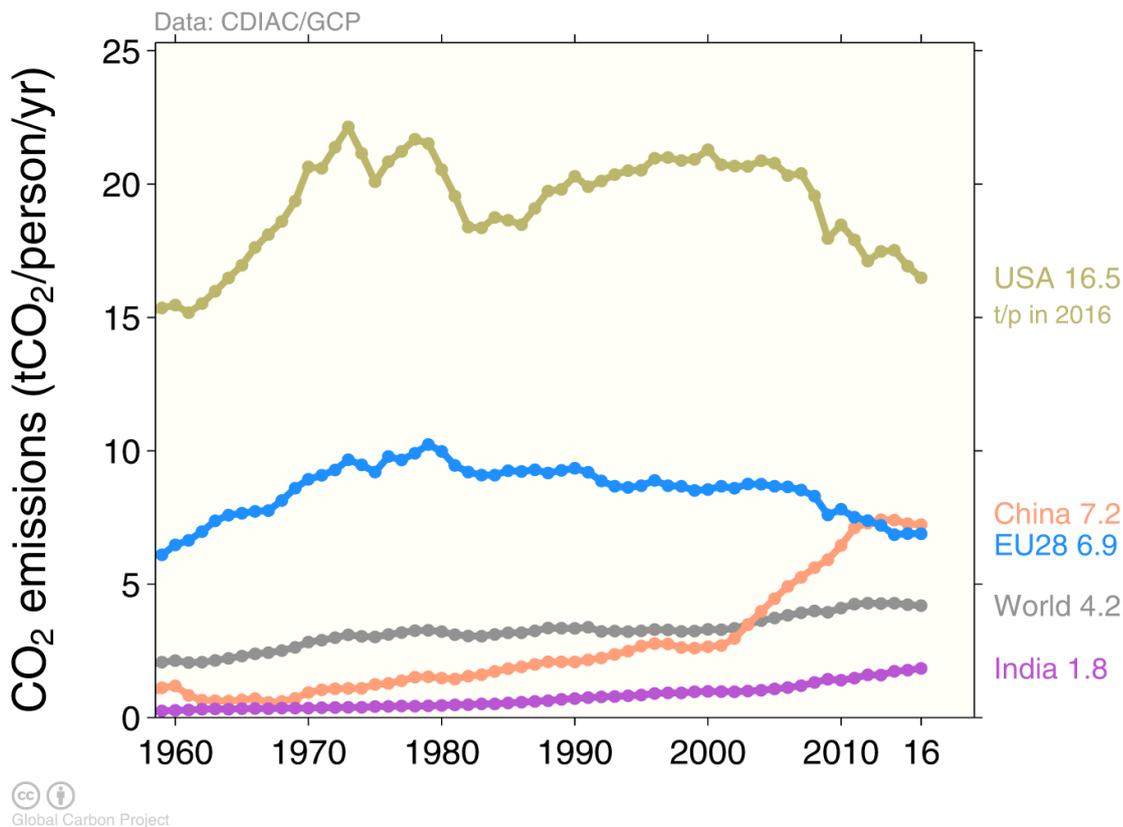


Fig. 1.6. Le Emissioni di CO₂ di vari paesi del mondo (UNFCCC).

Il metano (CH₄), deriva da diverse fonti naturali e antropiche.

Il suo “potenziale serra” è maggiore rispetto a quello dell’anidride carbonica ma, le sue emissioni sono minori. Dalla rivoluzione industriale ad oggi la concentrazione di CH₄ in atmosfera ha raggiunto le 1700 ppb (parti per miliardo),

Per il protossido di azoto (N₂O), la principale sorgente naturale deriva dagli oceani e dai suoli mentre un terzo delle sue emissioni è di tipo antropico.

La sua concentrazione in atmosfera è aumentata di 46 ppb dal 1750.

Dall’ultimo rapporto di valutazione dell’IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) del 2013, l’abbondanza in atmosfera di molti gas “well-mixed” è aumentata rispetto al rapporto precedente del 2007.

Basandosi su osservazioni in situ, questo rapporto conclude che fra il 2005 e il 2011 il forzante radiativo dipendente dai gas serra di origine antropica è aumentato del 7.5%.

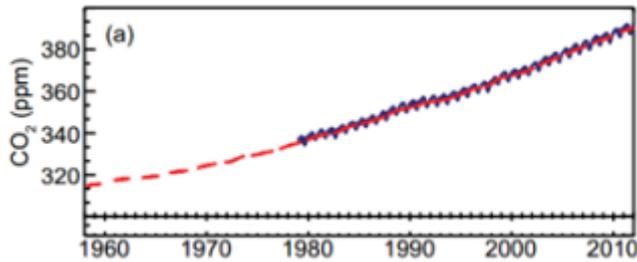


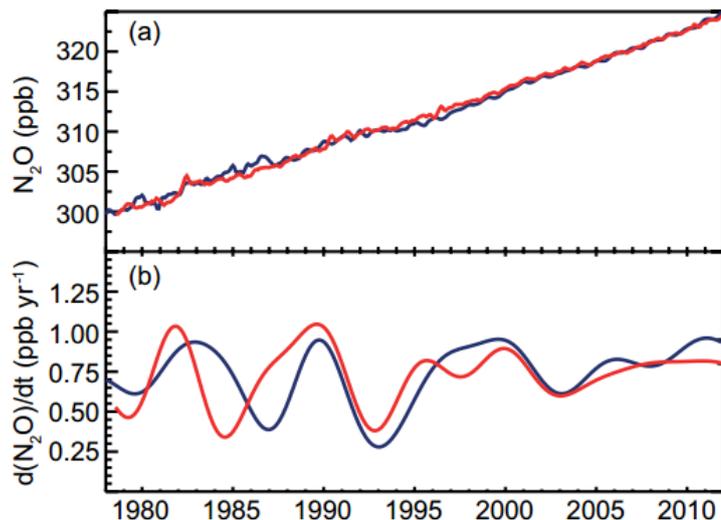
Fig 1.7. la Concentrazione atmosferica di CO_2 misurata dagli osservatori Manua Loa, (Hawaii) in rosso e Polo Sud (in blu). I valori "Mauna Loa" sono destagionalizzati (IPCC, Ar5).

- L'aumento della concentrazione di CO_2 atmosferica è dovuto principalmente all'uso dei combustibili fossili e al cambiamento nell'uso del suolo. La fig. 1.7 riporta la variazione della concentrazione atmosferica di anidride carbonica misurata alle isole Hawaii e al polo sud a partire dal 1960 (Hawaii) e dal 1980 (Polo Sud);

globale annuale era di 1803 ± 2 ppb. C'è stato una decrescita nel tasso di crescita dagli inizi del 1980 fino al 1998, si è stabilizzato dal 1999 al 2006 ed ha iniziato ad aumentare dal 2007 al 2011;

- Per quanto riguarda il protossido di azoto, la media globale nel 2011 era di 324.2 ppb, come si osserva nel grafico in figura 1.8, con un aumento di 5.0ppb dall'ultimo rapporto del 2007.

Figura 1.8, la media globale di N_2O da AGAGE (in rosso) e NOAA/ESRL/GMD (in blu) con risoluzione mensile (IPCC, Ar5).



- La concentrazione atmosferica di HFCn, composti

organici formati da fluoro e idrogeno che non danneggiano lo strato di ozono ma contribuiscono al riscaldamento globale, è bassa e il loro contributo al forzante radiativo è basso in confronto a quello di CFC e HCFC, di cui hanno preso il posto;

- Nel 2011, l'abbondanza atmosferica di CF_4 , un gas costituito da fluoro e carbonio che ha un elevato potenziale serra e non danneggia lo strato di ozono, era di 79.0 ppt (aumentata di 4.0 ppt dal 2005) e quella di C_2F_6 era di 4.16 ppt (aumentata di 0.50 ppt dal 2005);
- La media annuale di SF_6 , composto inorganico molto più pericoloso dell'anidride carbonica, nel 2011 era di 7.29 ppt con un aumento di 1.65 ppt dal 2005.

Capitolo 2

La temperatura nel corso della storia e il Global Warming

2.1 Ricostruzione della temperatura globale nel tempo

La terra, da sempre ha subito cambiamenti climatici di varia ampiezza. Infatti, il clima, è soggetto a variazioni naturali che dipendono da:

- eventi astronomici, i quali modificano la quantità di radiazione solare che viene assorbita dalla terra;
- eventi tettonici, la deriva dei continenti produce variazioni climatiche su scala planetaria.

In Generale, la variazione della temperatura media del pianeta, sembra dipendere fortemente dalla variazione della concentrazione atmosferica di gas serra, in particolare la anidride carbonica, come indicato dalla fig. 2.1, che riporta la variazione temporale della concentrazione atmosferica di CO₂, evidenziando la variazione in rapporto ai periodi glaciali e interglaciali.

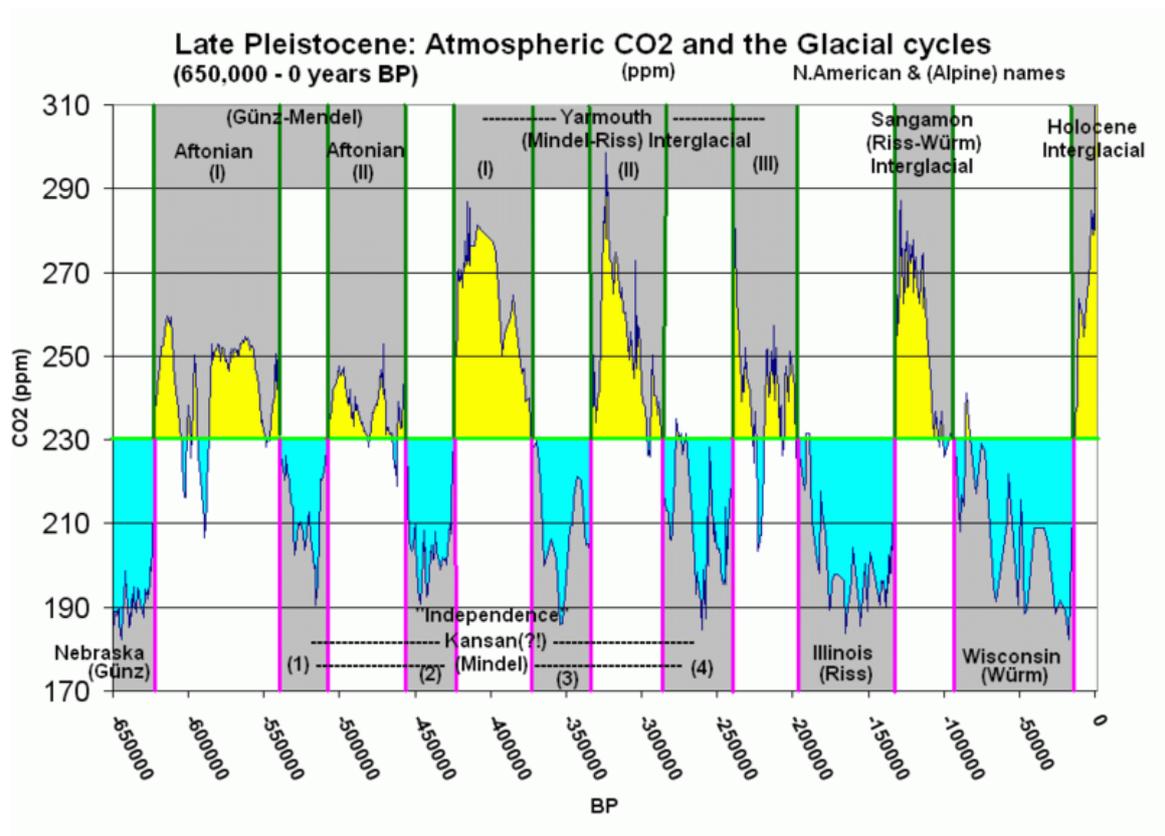


Fig.2.1, Variazione della concentrazione atmosferica di anidride carbonica nel tempo a partire da 65.000.000 di anni fa. La figura evidenzia anche l'alternarsi di periodi glaciali e interglaciali (fonte da Law Dome: 1006 A.D.-1978 A.D, Vostok ice core: 417,160 - 2,342 years BP, Dome C ice core: 650,000 - 415,000 BP combinati).

In generale, circa 65 milioni di anni fa, alla fine del Cretaceo, la temperatura cominciò a crescere.

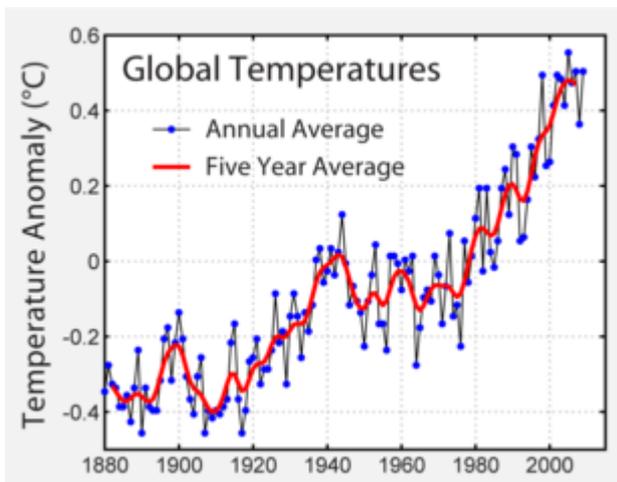
Nel corso del Pleistocene, 2.58 milioni di anni fa, il clima va incontro ad ampie oscillazioni in cui si alternano periodi di freddo intenso e periodi in cui il clima è più mite.

Circa 1 milione di anni fa, a intervalli regolari, si verificarono periodi di glaciazione che duravano per più di un millennio alternati a periodi con climi più temperati: le cinque glaciazioni e i quattro periodi interglaciali più caldi.

Circa 12.000 anni fa ebbe fine l'ultima glaciazione, che durò 60.000 anni dove la temperatura media planetaria diminuì di 5-6°C con differenze nelle varie fasce climatiche.

A seguire dell'ultima glaciazione, variazioni tra periodi caldi e freddi non furono così eccessive ma si tratta di variazioni pressoché regionali. Dopo il 2000 a.C. la temperatura diminuì nuovamente fino al 1400-1200 quando la temperatura iniziò nuovamente a crescere.

In definitiva, le variazioni climatiche avvenute nel passato non hanno avuto l'uomo e le sue attività come causa ma al contrario, sono stati gli organismi viventi e a adattarsi a questi cambiamenti.



Il recente cambiamento climatico appare molto più rapido (Fig. 2.2) a causa della continua emissioni di gas serra nell'atmosfera da parte delle attività dell'uomo. In questo modo l'effetto serra aumenta e l'atmosfera conserva parte del calore che in realtà dovrebbe rilasciare nello spazio.

Fig 2.2 Anomalia media della temperatura atmosferica ricostruita dall'IPCC negli ultimi 150 anni.

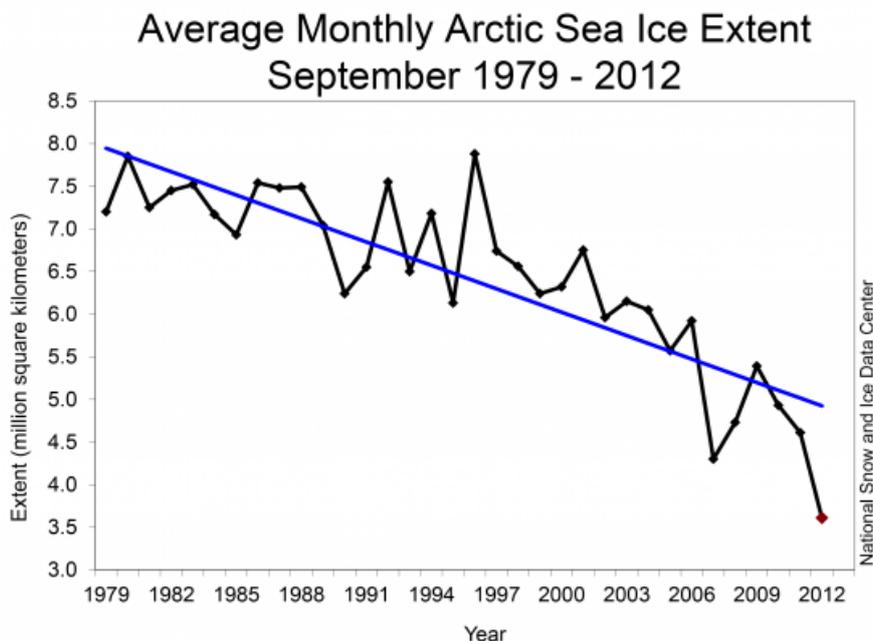
Le condizioni

climatiche in cui viviamo oggi sono già state presenti in altri periodi in passato ma, si sono instaurate e sono variate nel corso di migliaia o centinaia di anni; al contrario ora variano nel corso di poche decine di anni. Ciò deriva soprattutto dall'uomo, dalle sue attività e dal mondo che lui stesso si è costruito.

2.2 Il riscaldamento globale

Dal ventesimo secolo, si inizia a fare riferimento all'aumento di temperatura come riscaldamento globale: inteso come aumento della temperatura media planetaria non riconducibile a cause naturali ma a cause antropiche.

Questo aumento della temperatura è, come detto in precedenza, riconducibile all'aumento della concentrazione dei gas serra in atmosfera, in particolare dell'anidride carbonica che genera un aumento dell'effetto serra.



I report dell'IPCC suggeriscono che durante il

Fig 2.3, l'estensione media mensile del ghiaccio artico dal 1979 al 2012, dal National Snow and Ice Database Center.

corso del ventunesimo secolo, la temperatura della terra continuerà ad aumentare.

Questo riscaldamento globale ha diversi effetti sul pianeta:

- A causa dell'aumento della temperatura, il ghiaccio artico ha perso all'incirca il 40% della sua estensione (fig. 2.3) e la copertura della Groenlandia si è assottigliata. Se si continua così, il ghiaccio si scioglierà del tutto entro il 2040. Anche l'Antartide si sta lentamente sciogliendo;
- Dalla metà degli anni '50 la temperatura degli oceani è aumentata sia a profondità elevate che in superficie. Inoltre, gli oceani aumenteranno la loro espansione di circa 7-13 metri nei prossimi 500 anni;
- Con l'aumento della temperatura, una maggiore quantità di acqua evaporerà causando un aumento di pioggia e neve;
- Si verificheranno più ondate di caldo e siccità e di conseguenza più incendi;

- Diversi ecosistemi, come la barriera corallina, stanno gradualmente morendo a causa della temperatura dell'oceano. Il WWF ha stimato che circa un terzo degli habitat del mondo potrebbero scomparire entro il 2100;
- Malattie tropicali, come la malaria, si diffonderanno in paesi in cui non si è abituati a questo tipo di malattie;

Oltre a questi cambiamenti che stanno avvenendo e continueranno ad avvenire, possibili eventi più gravi potrebbero verificarsi in futuro. Tra questi il disgelo della tundra: il suo permafrost immagazzina miliardi di tonnellate di CO₂ e CH₄, con il riscaldamento i due gas entreranno in atmosfera. Fino ad ora la temperatura dell'artico è aumentata di circa 2.2-3.9°C; questo processo quindi è già iniziato.

Negli ultimi 125.000 anni, i tre quarti della calotta glaciale della Groenlandia si sono sciolti causando un aumento del livello del mare.

Con il recente riscaldamento globale, c'è la possibilità che la calotta glaciale si possa sciogliere del tutto, aumentando così il livello del mare di 5-6 metri e aumentandone la temperatura. L'aumento del livello del mare porta ad inondazioni che andranno a rovinare coltivazioni e aree di vegetazione che andranno in decomposizione anaerobica rilasciando in atmosfera grandi quantità di metano.

Sotto il suolo degli oceani, sono presenti quantità di metano, si stima che siano presenti 3000 miliardi di tonnellate di metano. Con il riscaldamento degli oceani, questi depositi possono cominciare a liberarsi, rilasciando in atmosfera metano e aumentando l'effetto serra.

Con l'aumento della temperatura delle acque, inoltre, queste circoleranno in modo meno efficiente privando il fondale oceanico di nutrienti. Il fitoplancton che vive nei fondali avrà meno cibo e di conseguenza riduce la capacità degli oceani di assorbire CO₂.

Con il riscaldamento, le foreste e la vegetazione smetteranno di essere pozzi di assorbimento di carbonio e cominceranno a diventare fonti di carbonio. Se continuiamo con l'attuale tendenza l'intera foresta pluviale amazzonica comincerà ad inaridirsi intorno al 2040 e se questa muore, la vegetazione rilascerà due miliardi di tonnellate di carbonio l'anno invece che assorbitarne 2-3 miliardi di tonnellate.

L'aumento della temperatura però, sembra avere avuto una pausa a partire dal 1998 sino al 2013. Questo periodo viene ora definito “global warming hiatus”. Ci sono state diverse opinioni sul fatto che in questo periodo si sia veramente verificata una pausa nell'incremento della temperatura o se, in realtà questa non abbia mai smesso di crescere.

Capitolo 3

Il “Global Warming Hiatus”

3.1 Che cosa si intende per Global Warming Hiatus e le sue caratteristiche

Come sappiamo, è solo di recente, a partire dal ventunesimo secolo, che la temperatura ha iniziato ad aumentare molto più velocemente. Dai vari rapporti dell'IPCC, si nota come ogni decade è più calda di quella precedente.

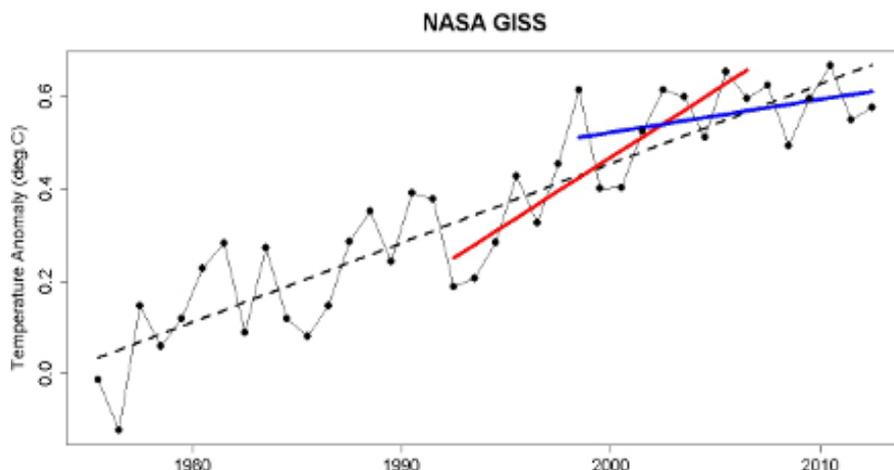


Fig. 3.1. Temperatura globale superficiale dal 1975 al 2012, in blu il periodo dal 1998 al 2012, da NASA GISS.

In realtà, varie osservazioni hanno mostrato come, nel

periodo che va dal 1998 al 2013 si sia verificato un rallentamento, in questo incremento (Fig 3.1, linea blu). Questo periodo sarà poi definito “global warming Hiatus” o pausa del riscaldamento globale.

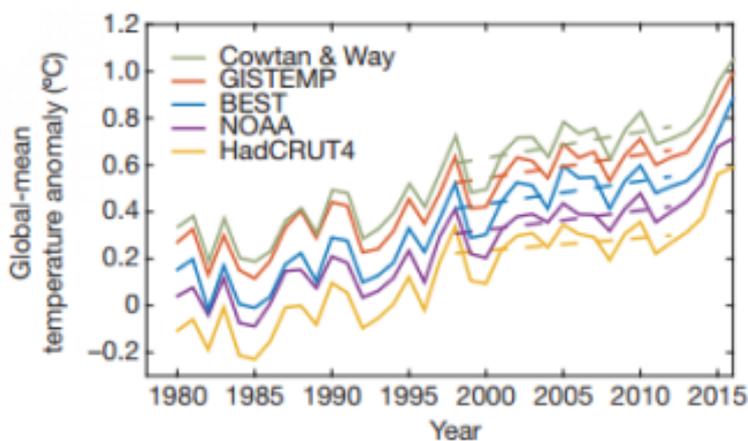


Fig 3.2, Temperatura superficiale globale raccolta da diversi data-set dal 1980 al 2015, in evidenza il periodo dal 1999 al 2012 (linee tratteggiate) mostra una diminuzione dell'aumento della temperatura da IPCC Ar5

Dal 1980 il trend dell'incremento della temperatura globale, è pressoché sempre stato in crescita con l'anno più caldo corrispondente al 1998, anno in cui si verifica un evento El Niño straordinariamente forte, come si nota dal picco intorno al 1998 nel grafico in figura 3.2, evento che per molti coincide con l'inizio dello hiatus.

Da questo anno, infatti, inizia un periodo in cui si sono verificate piccolissime variazioni di temperatura media in tutto il globo.

Durante gli anni, si sono sviluppate tre diverse definizioni per questo periodo:

- L'andamento della GMST (Global Mean Surface Temperature, temperatura media globale di superficie) è zero, negativo o positivo in modo non significativo;

- Il trend stimato dalle osservazioni è inferiore rispetto al trend di riscaldamento a lungo termine precedente;
- Il trend è inferiore di quello messo in luce dai modelli di simulazione.

Anche se un periodo di soli 15 anni risulta essere troppo breve per poter parlare di pausa, nel quinto rapporto dell'IPCC, pubblicato nel 2013, viene introdotta una sezione relativa allo Hiatus, definito come “una piccola variazione di temperatura nei quindici anni compresi tra il 1998 e il 2013”.

Trenberth *et al.* (2014) affermano che questo hiatus, è soprattutto evidente nel Pacifico centrale e orientale dove, si manifesta con forti anomalie negli Alisei, distinti patterns di pressione nel livello del mare e anomalie nelle precipitazioni sul Pacifico. Queste caratteristiche sono accompagnate da pattern di teleconnessioni sulla superficie della troposfera che si estendono per tutto il Pacifico, raggiungendo le regioni polari e arrivando all'atlantico. Oltre alle anomalie nel Pacifico, anche nell'oceano Atlantico settentrionale e oceani Meridionali, il calore è stato immagazzinato al di sotto di 700 metri di profondità, alterando i venti superficiali e la distribuzione del ghiaccio dell'Antartico

3.2 Ipotesi e analisi

Già a partire dal 2006 molti climatologi hanno iniziato a chiedersi se il riscaldamento globale si fosse effettivamente fermato; per questo motivo ci sono stati numerosi studi su questo fenomeno, per accertarsi che lo “hiatus” si sia realmente verificato o no e, nel caso sia avvenuto, sulle cause che possono averlo originato.

Sono state proposte molte ipotesi negli anni per interpretare questo fenomeno, le quali si possono raggruppare in alcune categorie:

- La prima, spiega questa pausa tramite la riduzione della quantità netta di energia che entra nel sistema clima, che potrebbe essere causata da un ridotto input di radiazione solare

dovuto a una debole attività solare (Lean e Rind, 2009, Stauning 2014) o, da un forzante radiativo negativo dovuto dalla diminuzione della concentrazione di vapore acqueo in atmosfera (Solomon et al. 2010);

- La seconda, vede come causa un incremento nella concentrazione di aerosol nella stratosfera e nella troposfera prodotta da eruzioni vulcaniche e attività umane (Neely et al. 2013, Kaufmann et al. 2011);
- La terza, vede come causa la redistribuzione di energia nel sistema climatico, principalmente come energia trasferita dalla superficie dell'oceano nelle sue profondità associato a variazioni naturali come ENSO, la PDO o altre dinamiche dell'oceano (Trenberth e Fasullo 2010, Balmaseda et al. 2013).

Come si sa, l'incremento della temperatura superficiale è causato principalmente dall'aumento dei gas serra in atmosfera, in particolare della CO₂ e come si può notare dalla fig. 3.3, la concentrazione di questa in atmosfera è sempre continuata ad aumentare quindi, è da escludere, come causa dello hiatus, una diminuzione della concentrazione dei gas serra nell'atmosfera terrestre.

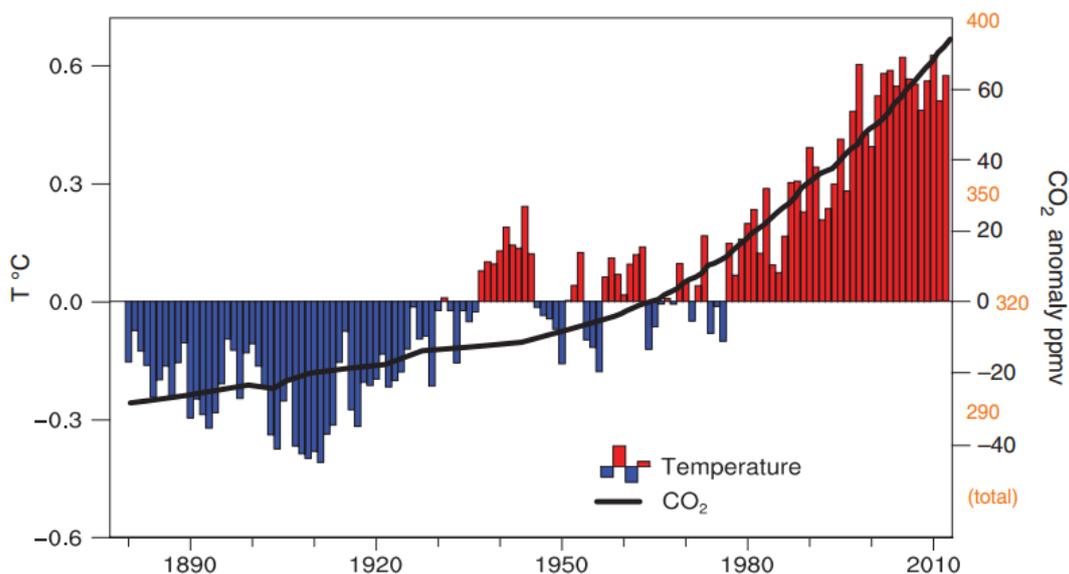


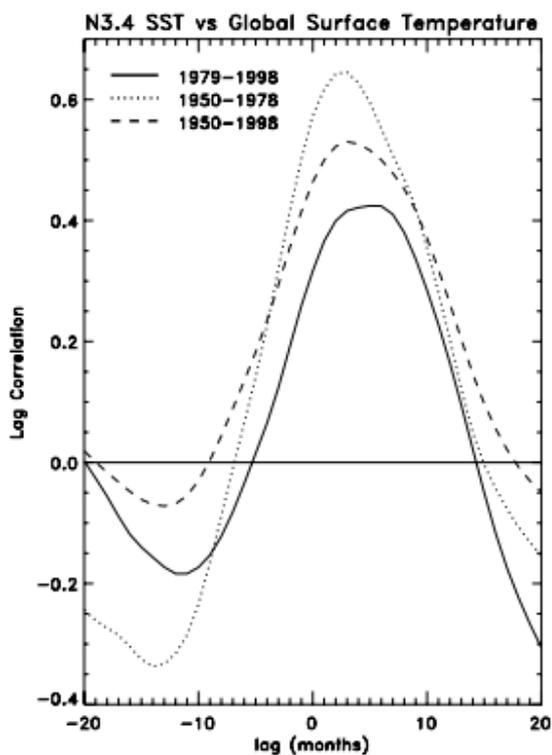
Fig. 3.3, Variazioni stimate delle temperature medie superficiali globali e delle concentrazioni di CO₂ dal 1880. Le variazioni sono mostrate come anomalie dei valori medi raccolti tra il 1901 e il 2000. La scala per la CO₂ è espressa in parti per milione (ppm) in volume rispetto a una media di 320 ppm mentre le anomalie di temperatura sono relative a una media di 13.9°C; dati da NOAA, IPCC Ar.5

Diversi scienziati hanno quindi iniziato a eseguire analisi basati sui dati relativi alle osservazioni dirette del sistema climatico e modelli di simulazione per verificare se le ipotesi citate sono valide e causa dello hiatus o no.

Trenberth *et al.* (2001) stabilirono la relazione tra ENSO e la GMST. ENSO, (El Niño southern oscillation) è una variazione del regime dei venti e della temperatura superficiale dell'oceano Pacifico tropicale che influenza il clima nei tropici e nei subtropici e determina contribuisce a fluttuazioni interannuali nelle caratteristiche climatiche globali.

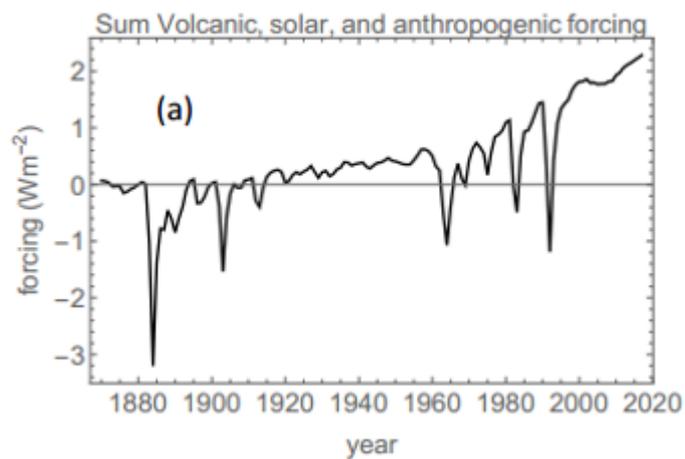
Il contributo di ENSO nel cambiare la temperatura media superficiale è complesso e coinvolge la quantità di calore contenuto nell'oceano Pacifico tropicale che a causa di eventi El Niño rilascia calore in atmosfera facendo aumentare la temperatura (l'aumento di circa 0.06°C nella temperatura tra il 1950 e il 1998 è dovuto a eventi El Niño). Durante l'evento El Niño del 1997-98, la GMST, come mostra la figura 3.4, è aumentata di 0.24°C .

Fig. 3.4, Il grafico mostra la correlazione tra la GMST e El Niño per i periodi 1950 – 1978, 1979 – 1998, and 1950 – 1998, da Trenberth *et al.* 2001



Lean e Rind (2008) utilizzano la relazione stabilita da Trenberth *et al.*, svolgendo diversi studi per rimuovere l'effetto di ENSO tramite una regressione calcolando il contributo di tutti gli altri forzanti (vulcanico, solare e antropico) come mostrato in figura 3.5. Questi studi dimostrano che, una volta rimosso ENSO, la GMST dal 1970 è lineare, con nessuna evidenza di hiatus, concludendo quindi che la variazione della GMST è dovuta principalmente da variabilità interna del sistema climatico.

Fig 3.5, Nel grafico la somma del forzante vulcanico, antropico e solare, da Lean e Rind 2008.



Foster e Rahmsorf (2011) utilizzarono le stesse regressioni lineari per esprimere i valori della GMST ottenuti dal 1979 al 2011 eliminando però, le eruzioni vulcaniche avvenute in questo periodo, il forzante solare e l'effetto di ENSO per recuperare soltanto il trend antropico (Fig 3.6).

Visto che l'effetto delle eruzioni vulcaniche e ENSO sono di breve durata, e che la variabilità solare è molto piccola, nessuno di questi fattori può avere avuto grande influenza nel riscaldamento globale; rendendo il forzante antropico la principale causa del riscaldamento globale

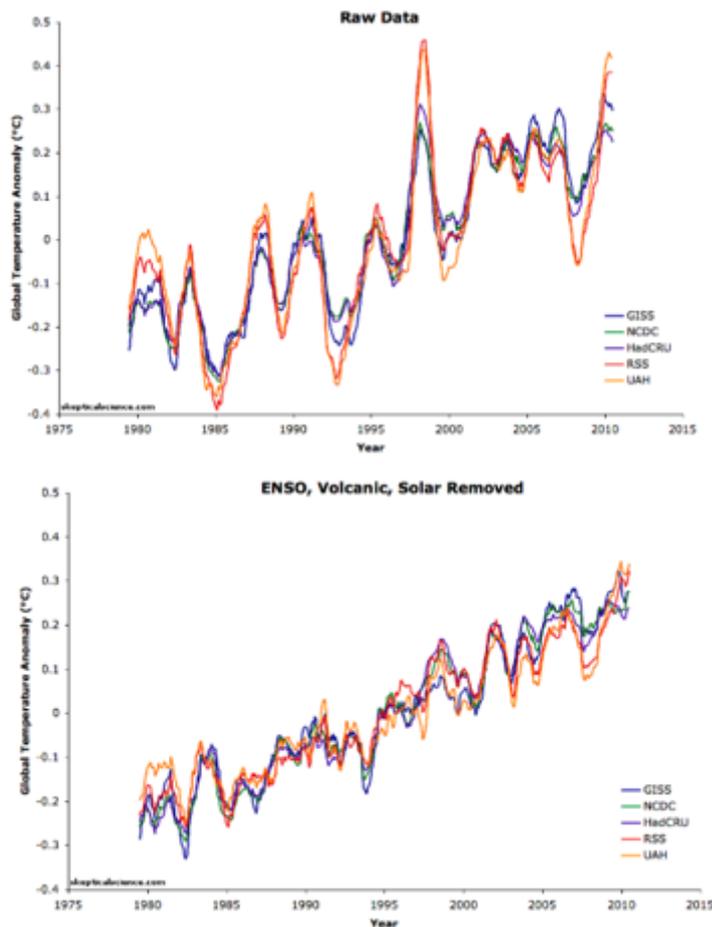


Fig 3.6, Nel grafico in alto, le anomalie di temperatura dal 1980 al 2010 considerando tutti i forzanti, quali quello solare, vulcanico, antropico e ENSO, dati osservati da GISS, NCDC, HadCRUT, RSS e UAH; nel grafico in basso, le anomalie di temperatura nello stesso periodo nel quale sono stati rimossi i forzanti solare, vulcanico e ENSO, dando importanza al fattore antropico Foster e Rahmsorf, (2011).

Chylek *et al*, (2014) adottano un approccio, che è in grado di spiegare il 93% della varianza utilizzando solo gas serra e l'AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation, indica la temperatura superficiale del tratto di oceano compreso tra l'equatore e la Groenlandia) a risoluzione annuale.

In realtà, iniziano con l'analizzare tutte le possibili cause di questo effetto, come si può vedere in figura 3.7 per poi rimuovere, mano a mano tutte quelle cause che possono essere spiegate, lasciando soltanto i gas serra e la AMO.

Con la loro indagine, viene dimostrato come, il riscaldamento globale sia dovuto in parte a influenze antropiche e in parte all'AMO.

Il problema di questa analisi è che, la risoluzione annuale dell'indice AMO, è correlata ad ENSO e il forzante vulcanico (ad esempio, l'evento El Niño del 1998 ha un picco prominente nella risoluzione annuale AMO).

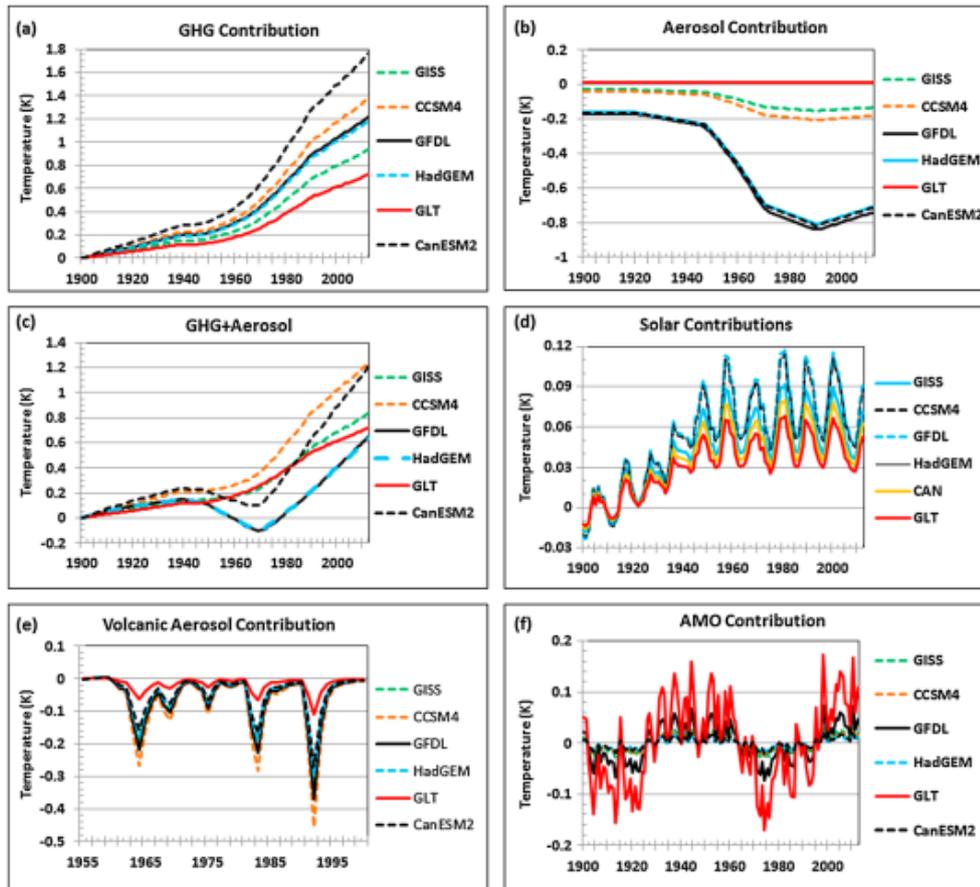
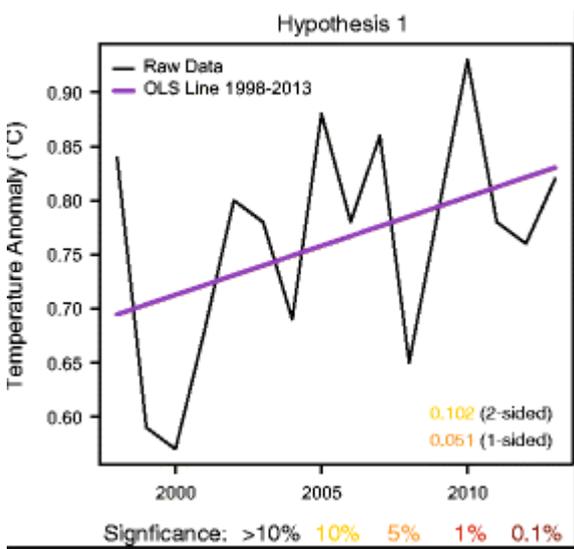


Fig 3.7, I grafici mostrano il contributo dei gas serra (a), aerosol antropico (b), gas serra e aerosol antropico (c), variabilità solare (d), aerosol vulcanico (e) e AMO (f) nella variabilità della temperatura media globale (in rosso) e sui modelli di simulazione (linee colorate), da Chylek et al 2014

È sbagliato quindi, analizzare l'AMO con una risoluzione annuale perché attribuirà le fluttuazioni della GMST ad ENSO e il forzante vulcanico quando, questi due non sono usati come indici.

Rypdal (2015), utilizza un filtro di risposte a lunga memoria per i tre forzanti, solare, vulcanico e antropico e applica l'indice AMO come

indice in aggiunta all'indice Niño3.4. Questo approccio spiega l'89% delle variazioni della temperatura avvenute tra il 1580 e il 2015; con il suo studio, Rypdal afferma la maggiore importanza di AMO ed ENSO nel riscaldamento climatico rispetto al forzante vulcanico.



Rajaratnam et al (2015) usano quattro data set di GMST per svolgere analisi su quattro ipotesi basate sul fatto che il recente periodo ha mostrato:

- Uno hiatus nel trend delle temperature globali; usando tre metodi diversi, trovano evidenze nel rifiutare il trend secondo il quale non c'è stato un aumento del riscaldamento globale in questo periodo al livello di significatività del 5% (fig. 3.8);

Fig. 3.8, nel grafico il diagramma dell'intero indice di temperatura media terra-oceano, dal 1998 al 2013, con la linea di regressione ordinaria dei minimi quadrati sovrapposta, da "debunking the climate hiatus" di Rajaratnam et al, 2015.

- Un trend di temperature che è distinto statisticamente da trend precedenti al periodo di hiatus; anche qui utilizzano tre metodi diversi, con il primo, dimostrano che non c'è un'evidente evidenza di una tendenza al riscaldamento anche a un livello

di significatività del 10%; con la seconda, l'evidenza nella tendenza viene indebolito ancora quando viene considerata la dipendenza al tempo e il terzo approccio, compara il periodo 1998-2013 ai periodi precedenti di quindici anni compresi tra il 1950 e il 1998 riducendo maggiormente le evidenze dello hiatus; la figura 3.9 mostra come nel periodo 1950-1998 ci sono stati diversi periodi di quindici anni con trend maggiori o minori, quindi il trend del periodo di hiatus non appare anomalo nel corso degli anni;

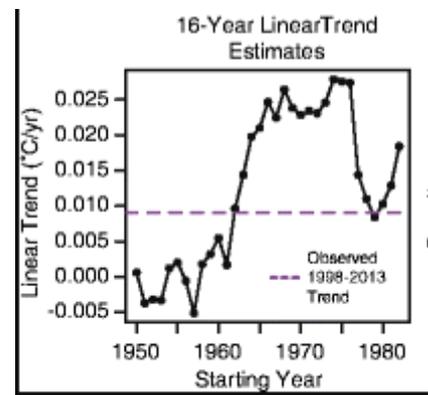


Fig. 3.9, diagramma di serie temporali di tendenze osservate in periodi di 16 anni, da

- Una pausa nella GMST; utilizzando diversi metodi matematici viene dimostrato che, dichiarare che la GMST non sia cambiata nel corso di questo periodo non è sostenuto dai risultati delle analisi svolte;
- Un cambio nella distribuzione della temperatura globale annuale; anche qui, utilizzando diversi metodi si dimostra che la distribuzione della temperatura globale in questo periodo, non è differente dalle decadi precedenti.

Concludono quindi che, il tasso di riscaldamento in questo periodo non è apprezzabilmente differente dal tasso di riscaldamento precedente.

Cahill et al (2015) allo stesso modo, analizzano quattro data set di GMST usando change points analysis per identificare cambiamenti nei vari trend. Anche loro non trovano evidenze per un cambiamento rilevabile nel trend del riscaldamento globale dal 1970.

Lewandowsky *et al* (2016) si chiedono se la recente fluttuazione di questi quindici anni è inusuale considerando tutti i possibili trend di 15 anni di GMST per il periodo 1970-2014, trovando almeno cinque esempi di fluttuazioni simili o maggiori in questi trend; Questo fu riscontrato anche da Rahmstorf *et al* (2007), che propose come ragione, una variabile intrinseca nel sistema climatico.

Lewandowsky *et al* concludono che questo periodo di pausa non è inusualmente straordinario comparandolo ad altre fluttuazioni, come si può notare dalla figura 3.10 si può notare come, le fluttuazioni avvenute nel periodo dello hiatus non sono così diverse da fluttuazioni avvenute in passato.

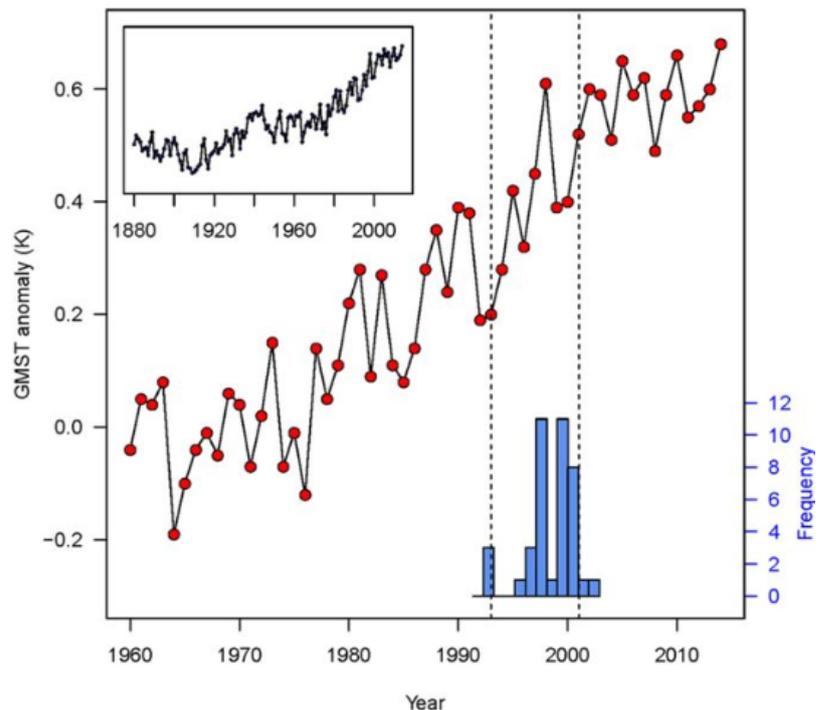


Fig. 3.10, mostra le anomalie della GMST da GISS nel 2015; l'istogramma in basso rappresenta la distribuzione dei presunti anni di inizio dello hiatus (tra il 1993 e il 2001); il riquadro in alto mostra le anomalie della temperatura dal 1880 ad oggi. da Lewandowsky *et al*, 2015.

Folland *et al* (2018) utilizzano un notevole numero di indici e regressioni contro diversi set di dati di GMST con una risoluzione mensile e un numero di ricostruzioni di forzanti e indici per i vari modelli. Utilizzando un così alto numero di indici però, si va incontro a dei problemi quali un overfitting, o eccessivo adattamento, producendo una varianza elevata anche quando non ci sono connessioni tra i differenti indici.

I modelli climatici usati come indici sono collegati a meccanismi interannuali, decadali o multi-decadali e, proprio per questo motivo, una variabilità mensile negli indici di questo modello deve essere vista come “rumore”.

Folland quindi dimostra che, le risposte della GMST su scale temporali che vanno da anni a secoli, agiscono da filtro per rimuovere variabilità forzate su scale temporali mensili; questo significa che

la struttura temporale in scale più corte di quelle annuali non può essere attribuita alla variabilità del forzante radiativo.

La maggior parte degli scienziati è dell'idea che questa pausa nel riscaldamento globale non sia effettivamente avvenuta o meglio, è sì avvenuta una pausa nell'aumento di temperatura superficiale ma non è stata causata da nessun fattore esterno ma semplicemente da variabili interne del sistema climatico, (in particolare dovuto alle variazioni delle correnti oceaniche).

Mentre ENSO è ben conosciuto, le altre variazioni decadali lo sono meno. Variabilità decadali sono presenti sia nell'oceano Pacifico (PDO, Pacific Decadal Oscillation) che nell'oceano Atlantico (AMO, Atlantic Multidecadal Oscillation). Nella figura 3.11 sono mostrate PDO e AMO durante l'estate 2018.

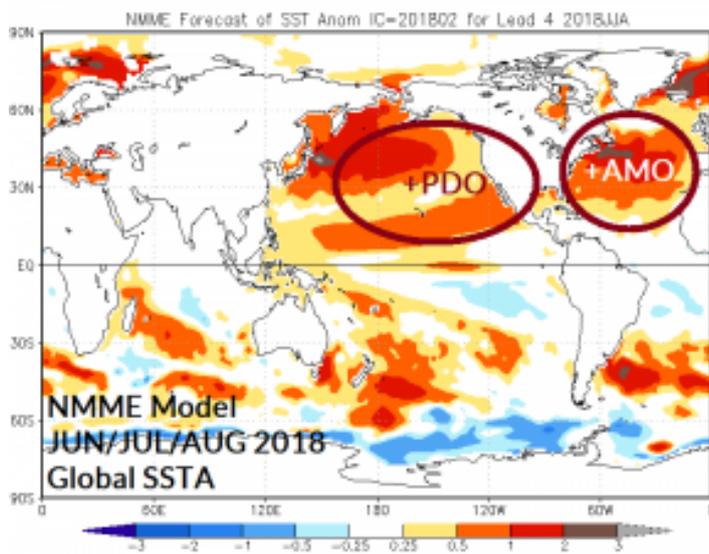


Fig. 3.11, l'immagine mostra la PDO e l'AMO nel periodo da giugno ad agosto 2018, dati raccolti da NMME.

La variazione decadale a cui è data più importanza come causa dello hiatus è la PDO; questa oscilla tra due fasi, una positiva e una negativa. Durante la fase positiva, la quantità di calore immagazzinata nell'oceano diminuisce e il riscaldamento superficiale della terra aumenta mentre, durante la sua fase negativa avviene il contrario: gran parte del calore che penetra nell'atmosfera viene immagazzinato nell'oceano e la temperatura superficiale diminuisce.

Tramite vari studi, Kosaka e Xie (2013) mettono in luce l'importanza della PDO durante lo hiatus riproducendo molti aspetti dei cambiamenti osservati tra il 1970 e il 2012. Viene dimostrato che,

l'evento El Niño del 97-98 ha causato un'inversione della fase della PDO da positiva a negativa (vedi grafico in figura 3.12).

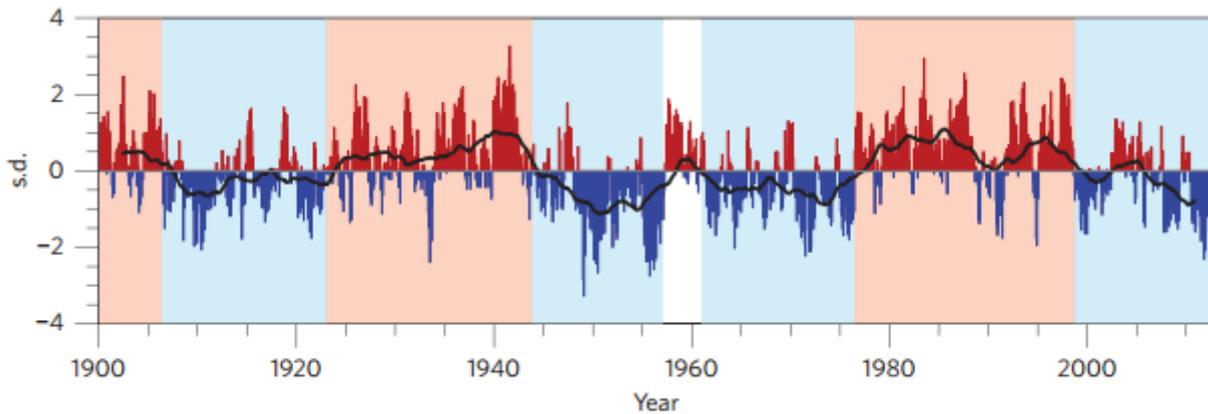


Fig. 3.12, il grafico mostra le inversioni della PDO, in rosso positiva e in blu negativa, dal 1900 al 2010, da Trenberth et al, 2014.

Knut Seip e Hui Wang (2018) utilizzano i periodi di hiatus verificatisi negli anni (1907-1930, 1936-1949, 1964-1982) come punti di legame per le analisi di ENSO e PDO in coppia. Nel loro studio, le due variabili, El Niño e PDO vengono accoppiate e comparati i valori osservati e quelli simulati considerando sia i valori grezzi (raw values) che quelli smussati, in cui vengono ridotte le irregolarità dei dati, come si nota in Fig. 3.13. In questo studio, i valori vengono smussati per determinare i pattern ciclici multidecadali a lungo termine.

Da questo studio, si dimostra come, El Niño e PDO interagiscono tra di loro; inoltre, solitamente El Niño ha più forza nel dominare la PDO ma, in alcuni periodi rallenta in confronto alla PDO la quale prende il sopravvento.

Questi periodi coincidono con l'inversione di fase della PDO da positiva a negativa. Come detto in precedenza, una fase negativa della PDO porta ad un aumento dell'immagazzinamento del calore nell'oceano che causa un rallentamento nel riscaldamento della superficie causando quindi periodi

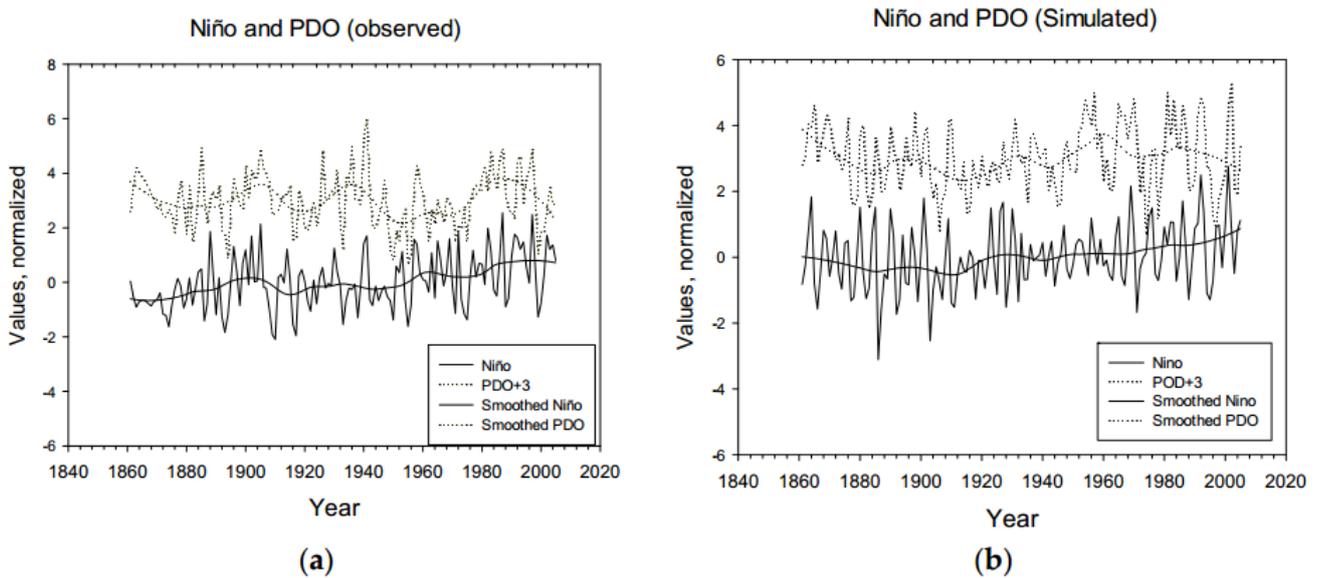
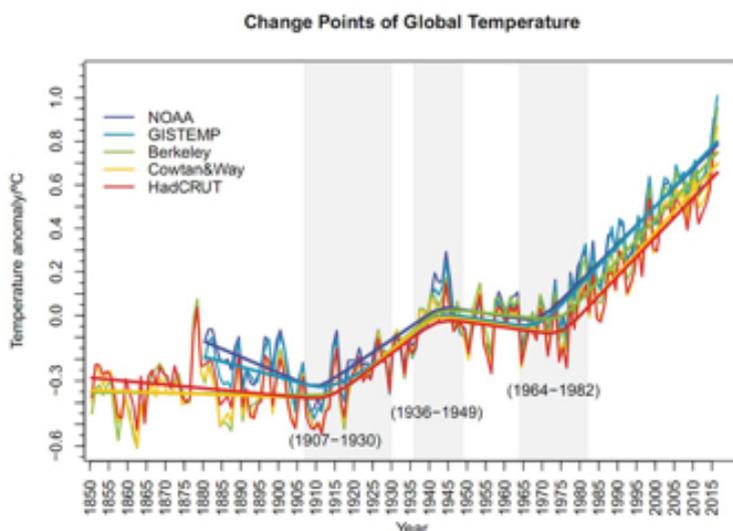


Fig. 3.13, i valori di El Niño e PDO osservati e simulati; nel grafico (a), i valori osservati grezzi e smussati; nel grafico (b), i valori simulati grezzi e smussati Da Seip e Wang 2018.

di Hiatus.

3.3 Discussione



Nella storia della terra periodi di hiatus si sono verificati spesso, tra cui, come si vede nella figura 3.14:

- Dal 1907 al 1930;
- Dal 1936 al 1949;
- Dal 1964 al 1982.

Fig. 3.14, il grafico che accentua i periodi di pausa avvenuti in periodi passati derivati da dati di diversi modelli climatici. Da Rahmstorf et al. 2017.

In realtà, i vari studi appena citati, sono stati eseguiti nella prima decade del ventunesimo secolo o prendendo in analisi periodi che non vanno oltre al 2012.

Recenti analisi dimostrano invece, come la temperatura non abbia mai smesso di crescere e che lo hiatus è solo un artefatto derivato da studi che non prendevano in considerazione periodi relativamente lunghi.

Long-term (1880-2017) global warming compared to short-term temperature trends

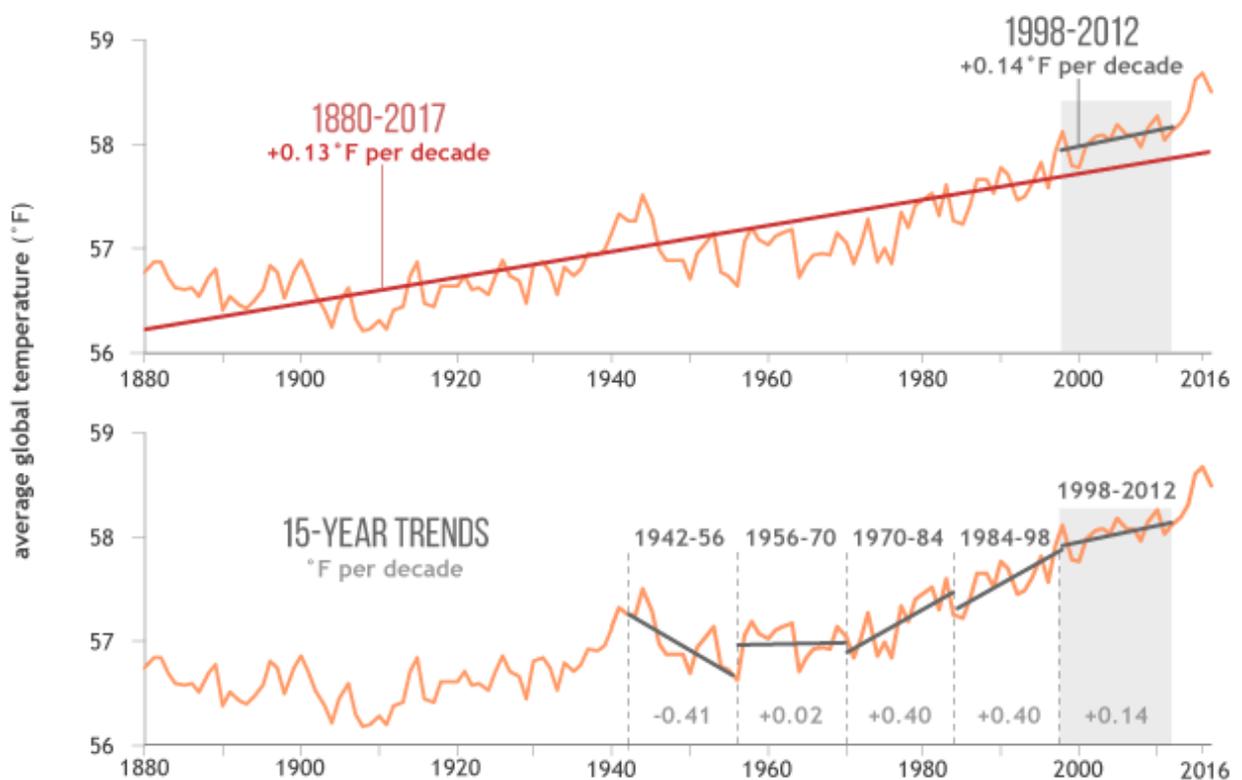


Fig. 3.15, dati di NOAA. In alto, la temperatura media globale superficiale (in arancione) è aumentata di 0.07°C (0.13°F) ogni decade dal 1880 (in rosso) che corrisponde al tasso di riscaldamento durante il periodo di 15 anni definito come hiatus (in grigio). In basso, il tasso di riscaldamento dal 1998 al 2012 mostra un aumento più lento rispetto ai due periodi di 15 anni precedenti ma maggiore rispetto ai periodi ancora prima (1942-1956 e 1956-1970).

Da come si vede nella figura 3.15 infatti, il periodo 1998-2012 è stato il periodo di 15 anni più caldo nei record e la concentrazione dei gas serra ha continuato ad aumentare raggiungendo livelli record.

Oltre a questo, la superficie dell'oceano ha continuato a riscaldarsi, il livello del mare ha continuato ad aumentare come è continuato anche lo scioglimento dei ghiacciai.

Il rallentamento nel tasso di riscaldamento superficiale, avvenuto all'inizio del ventunesimo secolo, è stato temporaneo. La temperatura globale media nel 2014, ha raggiunto infatti, un nuovo record; cosa avvenuta anche nel 2015 e nel 2016 e continuerà ad avvenire.

Il rallentamento del 1998-2012 quindi, è stato solamente un altro esempio delle influenze di raffreddamento a breve termine che si sono sovrapposte con il trend di riscaldamento globale a lungo termine.

Come accennato in precedenza, il periodo di hiatus è iniziato con un evento El Niño particolarmente intenso. El Niño si verifica irregolarmente alternandosi con La Niña, che ha effetto opposto. Questo evento ha luogo nei tropici ma, ha un impatto climatico globale. Di solito gli anni più caldi corrispondono ad anni in cui è presente un evento El Niño al contrario, gli anni più freddi corrispondono ad anni in cui si verifica un evento La Niña.

Negli anni successivi all'evento El Niño del 1997-98, eventi La Niña si sono verificati in maggioranza nel corso del periodo di quindici anni dello hiatus (Fig. 3.16).

El Niño and La Niña months in the tropical Pacific from 1997-2017 (ONI index)

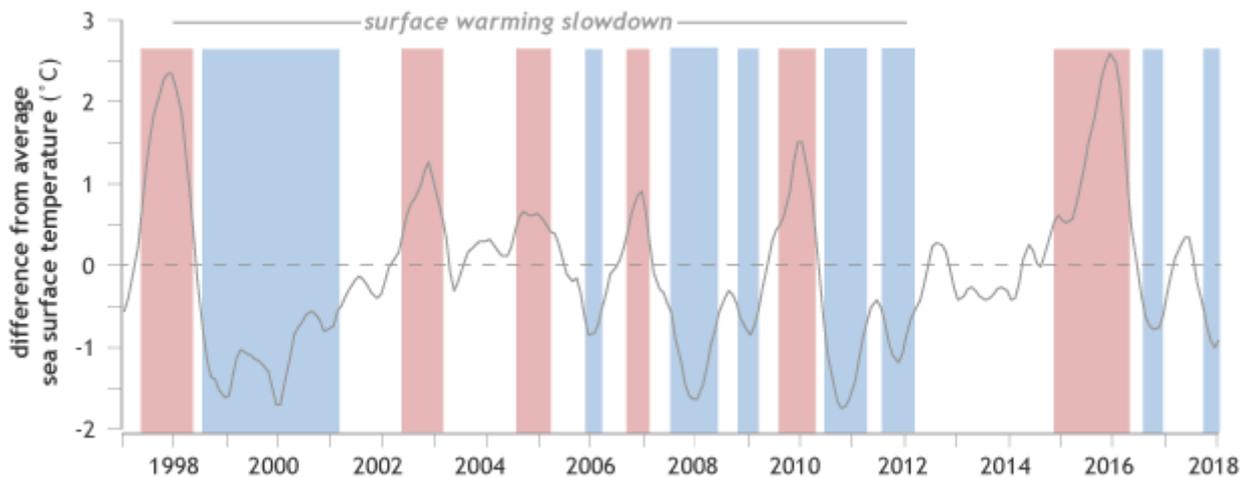


Fig. 3.16, dopo l'evento El Niño del 1997-98, eventi La Niña (in blu) si sono verificati in maggiore numero rispetto a eventi El Niño (in rosso) contribuendo al rallentamento nel riscaldamento della superficie nel periodo 1998-2012. Dati presi da NOAA Climate.gov, basati su dati dal NOAA Prediction Center.

Spesso gli eventi El Niño e La Niña sono compresi in fasi calde e fredde di un pattern climatico più grande, la oscillazione decadale del Pacifico (PDO) che influenza la temperatura superficiale lungo il pacifico del nord e l'equatore.

Intorno al 2000 la fase fredda è diventata la principale, la quale, ha fatto sì che il calore superficiale sia stato "segregato" nelle profondità dell'oceano (Fig. 3.17).

Heat energy in top 2,000 meters of the ocean from 1958 to 2017

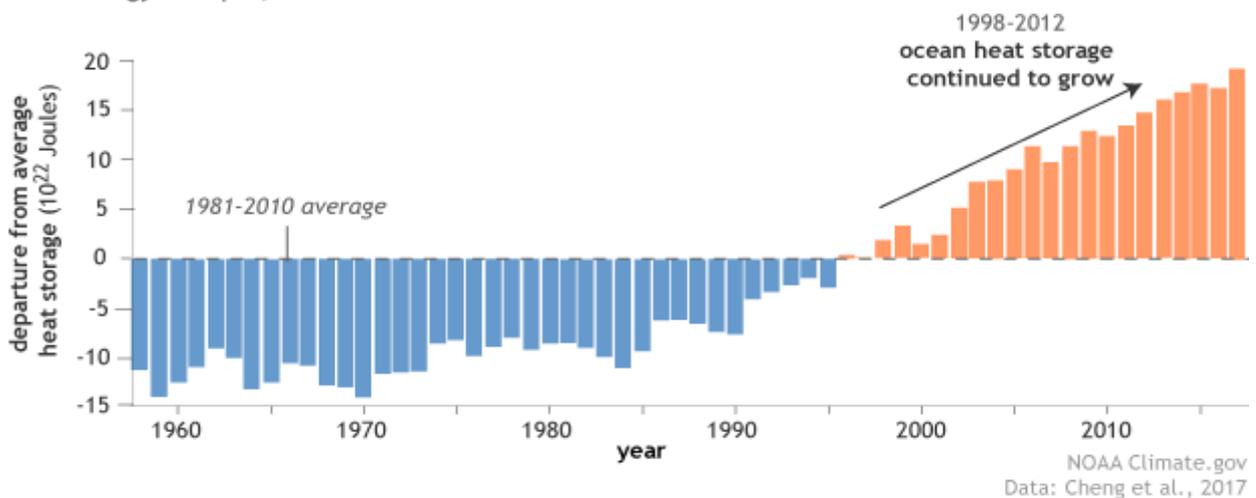


Fig. 3.17, variazioni naturali del vento e delle correnti permettono l'immagazzinamento di calore in profondità nell'oceano. Nel periodo dello Hiatus l'immagazzinamento di calore a profondità di 2000 metri è aumentato.

NOAA climate.gov, dati da Cheng et al, 2017

Oltre a eventi El Niño, La Niña e inversioni di fasi della PDO, il ciclo solare che coincide con il periodo 1998-2012 è stato più basso della media. Questa attività solare più debole ha contribuito, sebbene in minima parte, a rallentare il tasso di riscaldamento della superficie in questo periodo.

Infine, anche le eruzioni vulcaniche giocano un ruolo nel rallentamento del riscaldamento globale; infatti l'aerosol derivante dalle eruzioni vulcaniche riflette una parte della radiazione solare che arriva in atmosfera.

Molte eruzioni non sono così potenti da influenzare il clima a scala globale ma eruzioni abbastanza forti da raggiungere la stratosfera possono raffreddare il clima per diversi anni. Tra il 1998 e il 2012 non ci sono state eruzioni vulcaniche tanto potenti ma, ci sono state un notevole numero di eruzioni, soprattutto nel 2006 che insieme, hanno aumentato la quantità di aerosol nella stratosfera facendo diminuire quindi la quantità di raggi solari che raggiungono la superficie terrestre.

Capitolo 4 Il clima oggi

4.1 Il clima negli anni recenti

Dal 2014, la temperatura ha ripreso ad aumentare velocemente, e nel 2017 ci sono stati diversi record per il clima della terra quali:

- È stato il più caldo dei record per quanto riguarda contenuto di calore nell'oceano; il calore intrappolato nell'oceano nel 2017 è stato maggiore rispetto al 2015, il secondo anno più caldo, il 2016 infatti è stato più caldo per quanto riguarda la temperatura superficiale ma il terzo anno più caldo per calore dell'oceano (Fig. 4.1);

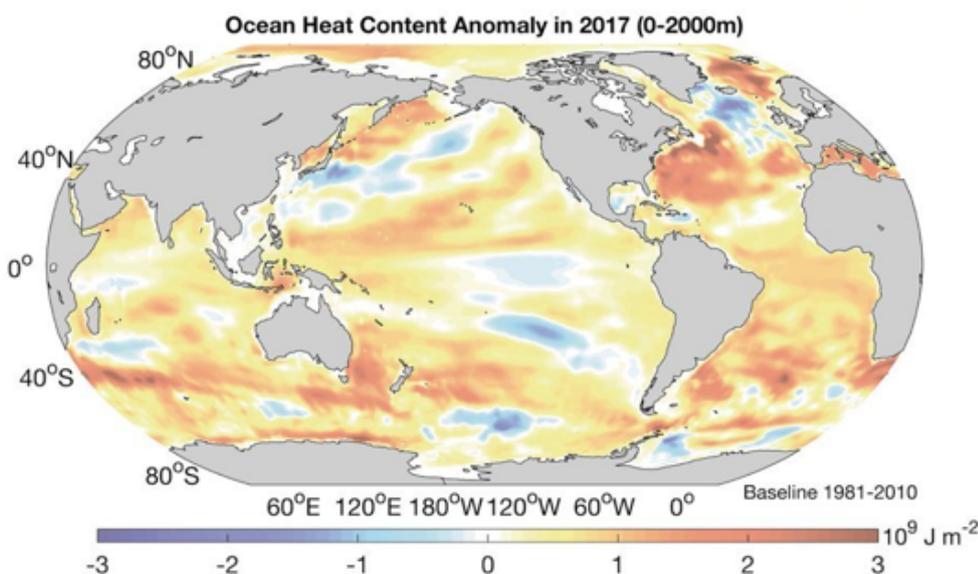


Fig 4.1, la distribuzione di anomalie nel contenuto di calore nell'oceano nel 2017; Cheng e Zhu (2018) usando dati da IAP-CAS.

- È stato il secondo o terzo anno più caldo nei record della temperatura superficiale dal 1850, in base ai data usati e il più caldo senza l'influenza di El Niño nell'aumentare la temperatura; nel 2017 la temperatura superficiale globale è stata di 1-1.2°C più calda delle temperature nel diciannovesimo secolo.

- C'è stato un record per quanto riguarda lo spessore e il volume dell'artico e del mare ghiacciato così come per il ghiaccio dell'antartico. Il grafico in figura 4.2 mostra

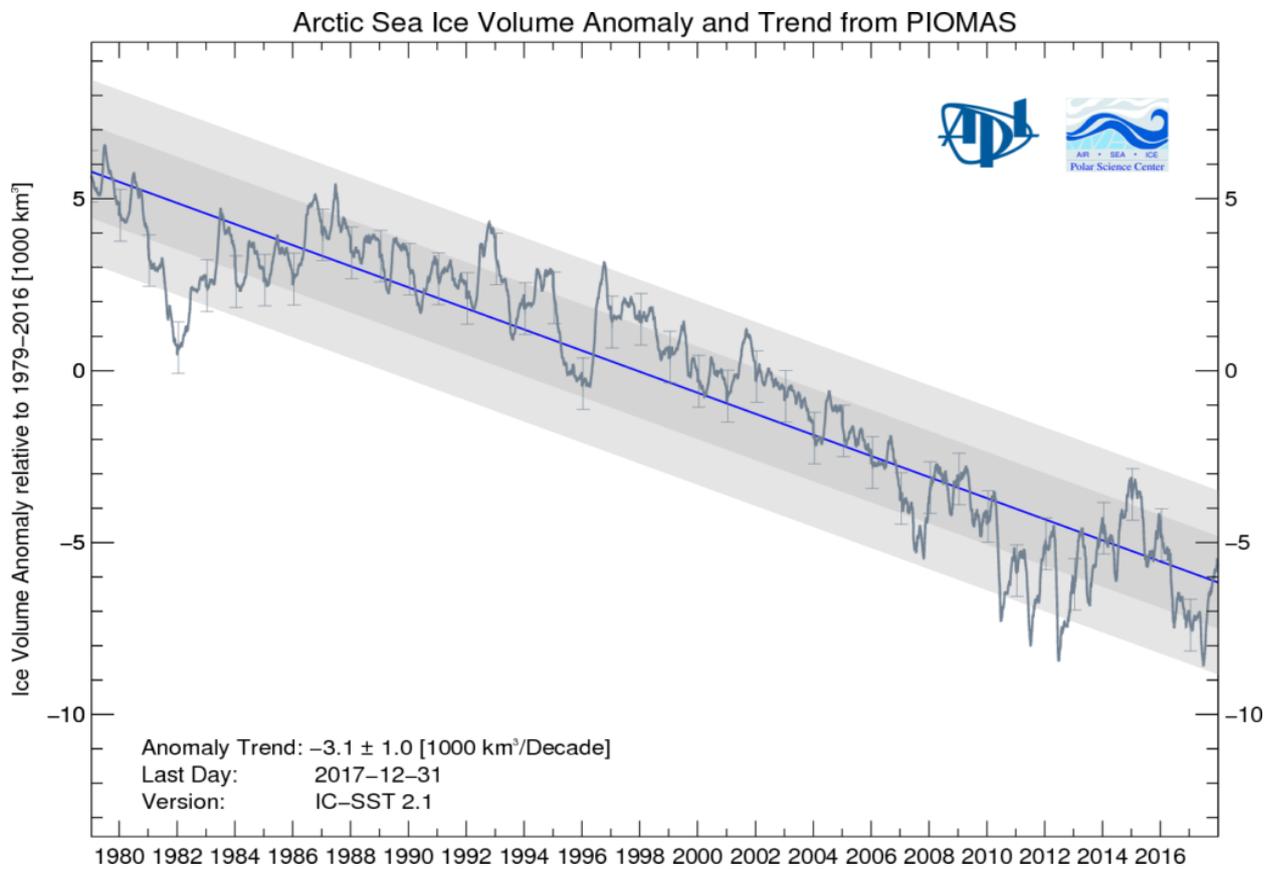


Fig. 4.2, anomalie nel volume del ghiaccio artico dal 1979 al 2017; da PIOMAS.

l'andamento del volume del ghiaccio Artico nel tempo, il trend continua a diminuire ogni decade.

Per quanto riguarda l'ultimo anno, il 2018 invece:

DIRECT MEASUREMENTS: 2005-PRESENT

Data source: Monthly measurements (average seasonal cycle removed). Credit: [NOAA](#)

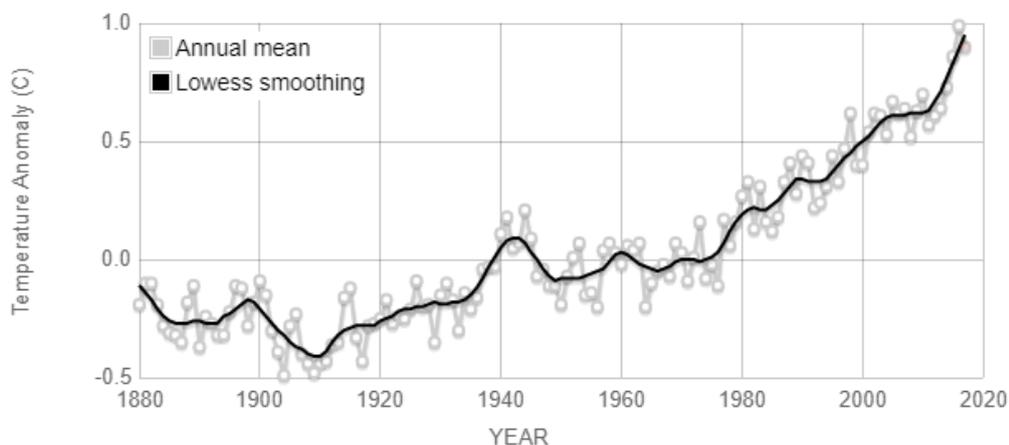


- Come si può vedere nella figura 4.3, la concentrazione di CO₂ calcolata nell'agosto 2018 ha raggiunto i 409 ppm;

Fig. 4.3, Il grafico in figura mostra l'andamento della concentrazione di CO₂ dal 2000 al 2018, raggiungendo i 409 ppm. Dati da NOAA, 2018.

GLOBAL LAND-OCEAN TEMPERATURE INDEX

Data source: NASA's Goddard Institute for Space Studies (GISS).
Credit: NASA/GISS



- Per quanto riguarda la temperatura superficiale della terra, si è raggiunto un aumento di 0.9°C rispetto agli anni precedenti come si può notare dalla figura 4.4;

Fig. 4.4 l'indice di temperatura superficiale che mostra un continuo aumento di temperatura dal 1950 in poi, sempre maggiore, con il 2017 che raggiunge un aumento di 0.9°C; NASA

- I ghiacciai dell'Artico raggiungono il loro minimo ad ogni settembre, con un tasso di decrescita di 13.2% per decade; l'estensione di superficie più bassa si è verificata nel 2012, come si può osservare dalla figura 4.5, con un aumento negli anni successivi fino intorno al 2016 quando si è verificato un'altra diminuzione dello spessore. Nel 2017 lo spessore è stato di 4.80 milioni di km²;

AVERAGE SEPTEMBER EXTENT

Data source: Satellite observations. Credit: NSIDC/NASA

RATE OF CHANGE

↓ 13.2
percent per decade

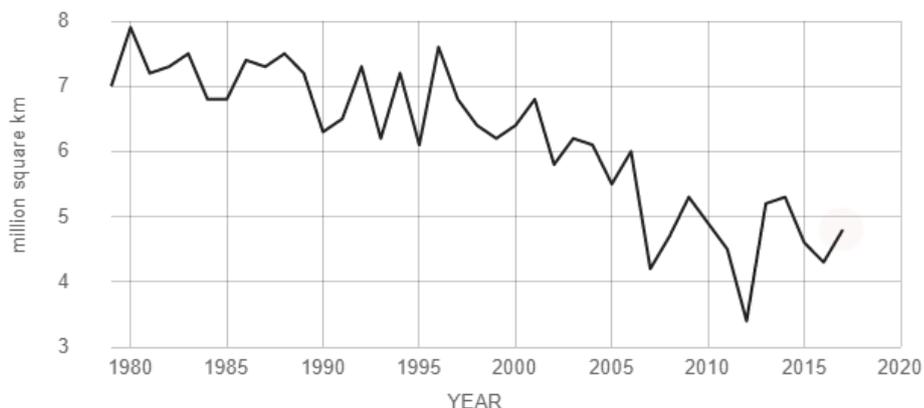


Fig. 4.5, il grafico mostra i dati riguardanti la superficie dei ghiacciai dell'Artico con un minimo raggiunto nel 2012 di 3.40 milioni di km², mentre nel 2017 la superficie è stata di 4.80 milioni di km²; NASA.

- Sia L'antartico che la Groenlandia ha continuato a perdere massa, dal 2002 in poi con maggiore velocità dal 2009 (Fig. 4.6);

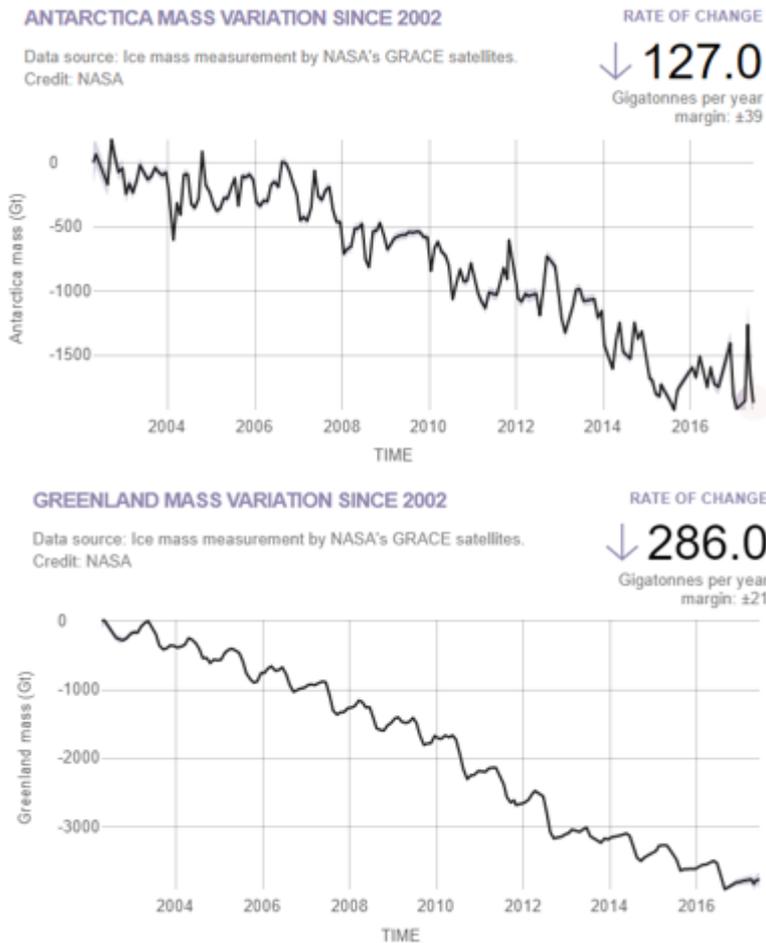
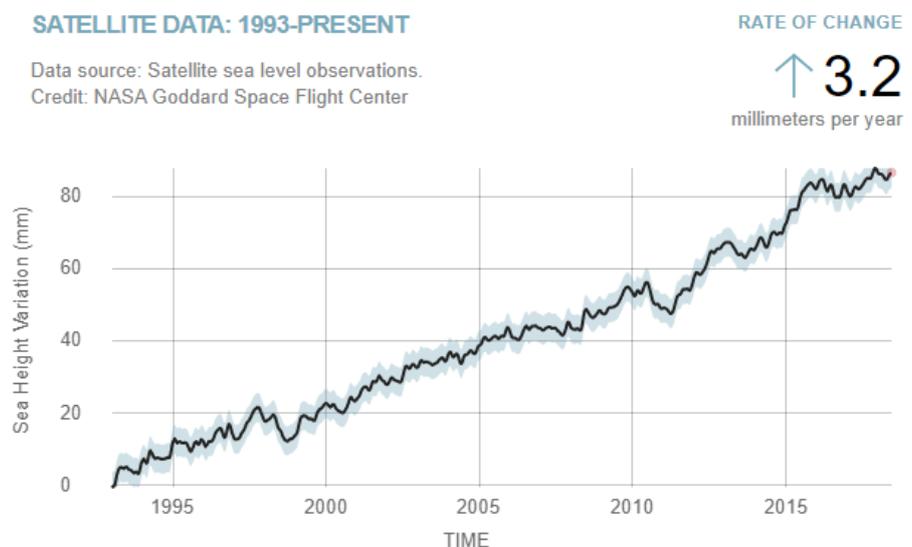


Fig. 4.6, Il grafico mostra la perdita di massa del ghiaccio dell'Antartide e della Groenlandia; in alto, l'Antartide ha un tasso di cambiamento di 127.0 ± 39 Gt all'anno, a giugno 2017 ha perso 1870 ± 175 Gt; la Groenlandia invece ha un tasso di cambiamento di 286.0 ± 21 Gt per anno, a giugno 2017 ha perso circa 3771 ± 98 Gt; in basso, l'aumento del livello del mare dal 1993 ad oggi, mostra un tasso di cambiamento di 3.2 mm per anno; NASA.

- L'aumento del livello del mare è dato dall'acqua che deriva dallo scioglimento degli strati di ghiaccio e ghiacciai e dall'espansione dei mari a causa del calore. Il livello del mare ha

continuato ad aumentare raggiungendo, a giugno del 2018, un aumento di 86.3 ± 4.0 mm rispetto al 1993 come si osserva dalla figura 4.7.

Fig. 4.7, il grafico mostra l'aumento nel livello del mare dal 1993 ad oggi, il tasso di cambiamento è di 3.2 mm per anno; a giugno 2018 si raggiungono gli 86.3 ± 4 mm; dati da NASA



4.2 Conclusioni

Le ipotesi relative all'apparente rallentamento nel tasso di crescita del riscaldamento globale avvenuto nel periodo 1998-2013, (global warming "hiatus"), come visto nei capitoli precedenti sono molteplici

Secondo alcuni studi la pausa nel riscaldamento globale è un fenomeno effettivamente avvenuto, mentre altri concludono che non ci sia stata una reale pausa ma che ciò che è stato osservato sia una delle tante fluttuazioni della temperatura terrestre, analoga ad altre avvenute in passato

Di conseguenza la principale causa di questo rallentamento non sarebbe di natura antropica, ma risiederebbe nelle variazioni dei forzanti naturali del sistema climatico. In particolare, come visto in precedenza fattori rilevanti sarebbero stati:

- L'evento El Niño del 1998, il quale ha portato ad un'inversione della PDO, da positiva a negativa;
- L'inversione della PDO ha causato un immagazzinamento di calore nell'oceano, soprattutto al di sotto dei 2000 metri, così che la temperatura superficiale è rimasta pressoché costante;
- Il forzante solare è stato leggermente minore in questo periodo rispetto che in periodi precedenti, di conseguenza i raggi solari arrivati in atmosfera sono stati di meno (meno forti) così da non scaldare troppo la superficie.

Inoltre, molti studi recenti, mostrano come questo periodo di *hiatus* (15 anni) sia troppo breve per influire in maniera significativa non sia abbastanza lungo per influire in maniera modesta sulle temperature future.

In conclusione quindi si potrebbe ritenere che il cosiddetto *hiatus* nella serie temporale della temperatura media del pianeta non dipenda da variazioni dei forzanti di natura antropica, in quanto essi, come spiegato in precedenza non mostrano alcuna variazione che giustificerebbe una riduzione della temperatura.

La stasi nella crescita della temperatura sarebbe invece dovuta ad una redistribuzione (all'interno del sistema climatico e in particolare nell'oceano profondo) del calore ricevuto.

Negli anni recenti, la temperatura ha ripreso ad aumentare come nel periodo precedente la pausa, insieme all'aumento della concentrazione dei gas serra in atmosfera.

Bibliografia

Trenberth K, Caron Julie M, Stepaniak David P, Worley S, *Evolution of El Niño-Southern Oscillation and global atmospheric surface temperatures*, National center for atmospheric Research, Colorado, USA, 2002.

Lean Judith L, Rind David H, *how natural and anthropogenic influences alter global and regional surface temperatures: 1889 to 2006*, Goddard Institute for space studies, NASA, Washington 2008.

Trenberth K, Fasullo T, *An apparent hiatus in global warming?*, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA, AGU publications, 2013.

Kosaka Yu, Xie Shang-Ping, *Recent global warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling*, Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego, 2013.

Chylek P, Klett James D, Lesins G, Dubey M, Hengartner N, *The Atlantic multidecadal oscillation as a dominant factor of oceanic influence on climate*, Los Alamos National Laboratory, New Mexico, 2014.

Rajaratnam B, Romano J, Tsiang M, Diffenbaugh Noah S, *Debunking the climate hiatus*, Stanford university, California, 2015.

Rypdal k, *Attribution in the presence of a long-memory climate response*, Earth System Dynamics,6, 2015.

Wei Meng, *A quantitative definition of global warming hiatus and 50 year prediction of global mean surface temperature*, College of Physical and Environment Oceanography, China, 2015.

Karl *et al*, *Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus*, NOAA, USA, 2015.

Rahmstorf S, Foster G, Cahill N, *Global temperature evolution: recent trends and some pitfalls*, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany, IOP publishing, 2017.

Medhaug I, Stople Martin B, Fischer Erich M, Knutti R, *Reconciling controversies about the 'global warming hiatus'*, 2017.

Seip Knut I, Wang Hui, *The hiatus in Global warming and interactions between the El Niño and the Pacific Decadal Oscillation: Comparing Observations and Modeling results*, OsloMet, Oslo, Norway, 2018.

Rypdal K, *The life and death of the recent global warming hiatus parsimoniously explained*, Department of mathematics and statistics, Norway, 2018.

Loeb Norman G, Thorsen Tyler J, Nrris Joel R, Wang H, Su Wenying, *changes in earth's energy budget during and after the "pause" in Global Warming: An observational perspective*, NASA Langley Research Center, Hampton, 2018.

Sitografia

Carbonbrief, <https://www.carbonbrief.org/state-of-the-climate-how-the-world-warmed-in-2017>

Scientific Press Releases, <https://eos.org/scientific-press/study-sheds-new-insights-into-global-warming-hiatus>

Lenntech, <https://www.lenntech.it/effetto-serra/conseguenze.htm>

IPCC, https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/tssts-2-1.html

ScienceDaily, <https://www.sciencedaily.com/releases/2017/01/170104143554.htm>

Climate.gov, <https://www.climate.gov/news-features/climate-qa/why-did-earth%E2%80%99s-surface-temperature-stop-rising-past-decade>

Climate Nasa.org, <https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/>