

Il clima del nostro pianeta ha sempre vissuto l'alternanza tra ere glaciali e fasi più calde, suscitate da fattori naturali. Dall'inizio dell'era industriale, e soprattutto negli ultimi 50 anni, però, i gas serra emessi dall'uomo hanno impresso una svolta nell'evoluzione climatica, causando un riscaldamento senza precedenti. In questo articolo analizzeremo le principali cause naturali dei cambiamenti climatici e le confronteremo con quelle provocate dall'uomo.

di Pierluigi Adami, *coordinatore scientifico Ecologisti democratici*

Il mondo della ricerca è ricco di dialettica tra teorie diverse – il che è un bene per la scienza. Ciò vale anche per la scienza del clima, e per la teoria del riscaldamento globale causato dai gas serra emessi dall'attività umana (causa antropica). Sino a non molto tempo fa, c'erano degli scienziati dubitavano che i cambiamenti climatici in atto fossero davvero responsabilità dell'uomo; negli ultimi venti anni, la progressiva acquisizione di conoscenza sulle cause del fenomeno, la disponibilità di nuovi modelli climatici e di misure satellitari, hanno consentito di perfezionare lo studio del riscaldamento globale. Secondo l'IPCC è ormai "praticamente certo" che il fattore dominante dell'aumento di temperatura superficiale del nostro pianeta avvenuto a partire dall'era industriale, ma soprattutto negli ultimi 50 anni, è stato il forte accumulo di gas serra emessi dall'attività dell'uomo (i). Studiando la storia del clima della Terra, possiamo comprendere meglio le ragioni del riscaldamento globale in atto.

I FATTORI CHE MODIFICANO IL CLIMA

La concentrazione dei gas serra in atmosfera (in particolare anidride carbonica e metano) è un fattore determinante per il riscaldamento del clima: infatti, almeno negli ultimi 600.000 anni la temperatura media della Terra ha seguito in modo coerente la concentrazione di gas serra in atmosfera: quando la concentrazione aumenta, aumenta la temperatura in modo quasi lineare

(ii). A causa dell'attività dell'uomo, la concentrazione di gas serra ha raggiunto un livello mai registrato (attraverso misure nei ghiacciai perenni) negli ultimi 800.000 anni (i, pag. 385).

Il clima risponde anche ad altre "forzanti": esterne, come la variazione del ciclo solare, dell'orbita terrestre o dell'attività vulcanica; e a forzanti interne, come le variazioni meteorologiche naturali, la circolazione oceanica, fenomeni come El Niño, i monsoni ecc.

il sistema climatico del nostro pianeta è molto delicato: alterazioni anche piccole in uno dei fattori esterni o interni possono provocare rilevanti effetti sul clima. Ciò è anche dovuto ai cosiddetti "feedback climatici", ossia a quei fenomeni di reazione del clima che auto-alimentano il riscaldamento o il raffreddamento, accelerandoli e aggravandone l'intensità.

Ad esempio, l'aumento di anidride carbonica in atmosfera provoca riscaldamento. Il riscaldamento causa lo scioglimento dei ghiacci ed evaporazione di laghi e mari interni; ciò, a sua volta, causa la liberazione di altra anidride carbonica e altri gas presenti nei sedimenti marini in forma di clatrati idrati. Queste ulteriori emissioni di gas serra, a loro volta producono nuovo riscaldamento, che accelera ancora lo scioglimento dei ghiacci e così via.

Ulteriore feedback climatico è dovuto ai Poli: la superficie ghiacciata riflette di più la radiazione solare (maggiore *albedo*) diminuendo l'assorbimento di energia solare e dunque il riscaldamento. Una riduzione della superficie ghiacciata, come quella che sta accadendo in questi anni, fa diminuire l'energia solare riflessa e fa aumentare quella invece assorbita (ad esempio dagli oceani), causando ulteriore riscaldamento.

Viceversa, un aumento dei ghiacci, quale quello provocato in alcune ere dalla variazione orbitale della Terra, fa aumentare la riflessione della radiazione solare (diminuendo quella assorbita), provocando così un ulteriore raffreddamento, in un ciclo che si auto-alimenta, sino a condurre ad una era glaciale.

È interessante anche l'interazione tra clima e sistemi biologici: ad esempio, alcuni studiosi sostengono che a porre fine al periodo di Massimo Termico dell'Eocene, circa 49 milioni di anni fa, potrebbe essere stata l'eccessiva diffusione nelle acque artiche di una felce, l'*Azolia*, che proliferò per 800.000 anni causando un forte assorbimento di anidride carbonica dall'atmosfera, con conseguente raffreddamento del pianeta sino a una nuova era glaciale.

Il nostro pianeta ha comunque vissuto periodi anche più caldi di quello odierno, tutti caratterizzati da alti livelli di anidride carbonica (CO₂) in atmosfera (i, pag. 387). Verso la fine del periodo glaciale del Neoproterozoico (700 milioni di anni fa), si ebbe una fase di forte riscaldamento, con temperatura media globale di oltre 32°C, ossia circa 17°C superiori alla media attuale. All'inizio dell'Eocene, 50-56 milioni di anni fa, si verificò un altro periodo caldo, detto Massimo Termico del Paleocene-Eocene (PETM). La temperatura media globale aumentò sino a +14°C. Quel riscaldamento causò lo scioglimento dei poli, molte terre costiere furono sommerse dall'innalzamento dei mari e la vegetazione sub-tropicale coprì tutto l'Emisfero Nord sin quasi al Polo (come testimoniano le palme fossili in zone oggi gelate - vedi nota iii). La concentrazione di CO₂ in atmosfera quadruplicò, raggiungendo i 1000 ppm (oggi abbiamo superato i 400 ppm) – ma non c'è certezza sulle cause di quel fenomeno. Si ritiene rilevante il contributo della decomposizione dei clatrati di metano presenti nei sedimenti marini e polari in fase di scioglimento, con progressiva emissione di gas serra. Nel Pliocene, circa 3 milioni di anni fa, si riscontrò un aumento della concentrazione di CO₂ che giunse a 350 – 450 ppm, valori intorno a quelli attuali. Si produssero temperature di 1,9°C – 3,5°C superiori a quelle dell'era pre-industriale, anche qui con scioglimento dei ghiacci della Groenlandia e di parte dell'Antartide orientale, con conseguente innalzamento del livello dei mari. Verso la fine dell'ultima glaciazione, che ebbe il suo apice 21.000 anni fa e terminò circa 12.000 anni fa, la Terra sperimentò un riscaldamento compreso tra +3°C e +8°C, che riportò le temperature ai livelli attuali.

Se è vero che la Terra ha vissuto, per cause naturali, altri periodi caldi, mai la temperatura superficiale è aumentata così velocemente come sta accadendo oggi a causa dell'uomo. Infatti, il riscaldamento naturale medio avviene al tasso di +0,3°C per millennio (con picchi che possono superare +1°C per millennio - vedi nota i, pag. 400) incomparabilmente più lento del riscaldamento attuale, pari a circa +1°C in un secolo.

Secondo alcune teorie, in questo periodo il clima della Terra avrebbe dovuto evolvere verso una nuova glaciazione (ma nell'arco di migliaia o decine di migliaia di anni) che invece il riscaldamento dovuto all'uomo ha bloccato, invertendo il ciclo naturale. Ma non è una cosa buona: la velocità dell'attuale riscaldamento è tale da avere effetti ancora non del tutto prevedibili, che possono mettere a rischio la vita di molte specie viventi (incluso l'uomo) in varie zone del pianeta.

Un'ipotesi scientifica molto temuta (alla base del film "The day after tomorrow" su una improvvisa glaciazione dell'Emisfero Nord) è quella che sostiene che lo scioglimento dei ghiacci della Groenlandia, con il distacco in mare di immensi iceberg di ghiaccio (di acqua dolce) alterandone la salinità, possa alterare la circolazione oceanica. Il rischio è una variazione

brusca della Circolazione Atlantica Inversa Meridionale, inclusa la Corrente del Golfo, che regola, e mitiga, il clima atlantico. Secondo questa ipotesi, il sistema della Circolazione Atlantica Meridionale può reagire bruscamente, "a soglia", con rapide diminuzioni quando le alterazioni dovute a scioglimento dei ghiacci superano certi limiti. Una riduzione della Corrente del Golfo avrebbe impatti molto severi sul clima del Nord Europa e Nord America, e in generale su tutto il pianeta.

L'interazione tra clima e criosfera (superficie ghiacciata) è dunque molto critica, sensibile alla concentrazione di gas serra in atmosfera, e soggetta a perturbazioni che possono alterare l'equilibrio climatico per secoli o millenni.

Infine, è noto che nel Medioevo, tra il 950 e il 1250 si è verificato un clima più caldo del normale nell'Emisfero Nord. Si ritiene che ciò possa aver favorito l'esplorazione della Groenlandia dei Vichinghi (a partire dal 982), a quel tempo dunque con un clima più mite e, almeno nella sua costa meridionale, più verde e rigogliosa di oggi, da cui - forse - il nome "Terra Verde" (anche se oltre l'80% del territorio era comunque coperto da ghiacci perenni).

La fase calda della Groenlandia si concluse nel 1500 circa, anche per la sopraggiunta "Piccola Era Glaciale" (vedi nota, v). Gli studi dell'anomalia climatica medievale sono qualitativi, basati su osservazioni storiche delle pratiche agricole in alcuni paesi del Nord atlantico ed europeo (coltivazione di grano e vigna ove ora sarebbe impossibile). Non vi sono dati quantitativi dell'effettivo aumento termico, né sulla estensione geografica, probabilmente limitata a scala regionale (Groenlandia, Islanda, Russia settentrionale - vedi nota vi).

L'EFFETTO DEI VULCANI SUL CLIMA

Tra gli emettitori naturali di gas serra vi è l'attività vulcanica e gli incendi conseguenti alle grandi eruzioni, che nel corso dei millenni hanno contribuito alle variazioni chimiche dell'atmosfera. È possibile confrontare l'odierno contributo alle emissioni di CO₂ dovute a cause vulcaniche e a quelle antropiche: le prime sono poco rilevanti rispetto alle seconde. Infatti, prendendo il dato fornito dal servizio geologico americano USGS, ogni anno i vulcani emettono circa 200 milioni di tonnellate di CO₂ in atmosfera, che rappresenta lo 0,5% delle emissioni di gas causate dall'attività dell'uomo. Ci sono state però fasi del pianeta in cui l'attività eruttiva fu molto violenta. Alla fine del Permiano, 251 milioni di anni fa si verificò la cosiddetta "Estinzione di massa del Permiano-Triassico", ovvero l'estinzione della maggior parte delle specie viventi sulla Terra. Tra le altre ipotesi, studi recenti (vii) correlano tale estinzione con un imponente ciclo di

eruzioni vulcaniche protrattosi per quasi un milione di anni, in un'area oggi in Siberia (a quel tempo c'era probabilmente un unico continente, Pangea), che produsse uno strato di lava spesso 5 chilometri in una superficie ampia come gli Stati Uniti. Quel ciclo vulcanico scaraventò in atmosfera acido solforico, che intensificò e acidificò le piogge – moltiplicando l'erosione dei suoli - e i mari, uccidendo gran parte delle specie acquatiche. Si stima che in totale furono emesse 1200 miliardi di tonnellate di metano (per confronto, solo a partire dal 1800 sono state emesse in atmosfera oltre 2000 miliardi di tonnellate di CO₂ a causa dell'attività dell'uomo). I gas serra vulcanici potrebbero aver causato un aumento di temperatura di 8 – 10 °C protrattasi per alcune migliaia di anni. Una volta terminata la fase eruttiva, si ripristinarono condizioni favorevoli alla vita che produssero nuove specie viventi.

Alla fine del Cretaceo, circa 66 milioni di anni fa, ci fu il probabile impatto di un asteroide. Secondo alcune teorie, ciò potrebbe aver contribuito alla definitiva estinzione dei dinosauri, tuttavia già decimati, forse per effetto di cambiamenti climatici provocati da eruzioni vulcaniche durate centinaia di migliaia di anni (vedi nota viii).

È bene però precisare che l'attività eruttiva vulcanica emette soprattutto ingenti quantità di aerosol e polveri che, filtrando l'energia solare, hanno invece effetto raffreddante. Eruzioni vulcaniche in grado di ridurre la radiazione solare si ripetono in media ogni 35-40 anni e possono causare un raffreddamento di 0,1 °C – 0,3 °C per qualche anno, come è avvenuto per l'eruzione del Pinatube del 1991 (nota i, pag. 392). Alcune delle gigantesche esplosioni vulcaniche del passato sono state responsabili di repentine fasi di raffreddamento. L'esplosione del super-vulcano Toba nell'isola di Sumatra avvenuta circa 73000 anni fa, scaraventò una tale quantità di polveri e aerosol nell'atmosfera da oscurare per anni la radiazione solare in molte aree del pianeta. Secondo una controversa teoria, ciò avrebbe messo a rischio di estinzione anche la nostra specie homo sapiens ("Teoria della catastrofe di Toba") e contribuì all'innesco di una fase di raffreddamento climatico (ix).

Altro celebre evento vulcanico è stata l'esplosione del vulcano Tambora, in Indonesia, l'11 e 12 aprile del 1815. L'eruzione – la più violenta negli ultimi 20.000 anni – ebbe effetti devastanti e cambiò il clima raffreddandolo per parecchi mesi: l'anno seguente, nell'estate del 1816, si verificarono nevicate e gelate in tutto il Nord America e Nord Europa, e l'inverno fu freddissimo in tutto l'emisfero Nord. Non a caso, proprio nella fredda estate di quell' "anno senza estate" - come fu definito - in un'atmosfera cupa e piena di presagi foschi, la scrittrice inglese Mary Shelley inventò il personaggio di Frankenstein. Probabilmente gli effetti climatici furono aggravati dalla contemporanea fase di minima attività solare ("Minimo di Dalton") che si protrasse tra il 1790 e il 1830 (nota x).

L'EFFETTO SUL CLIMA DEL CICLO SOLARE

Questo tema è dibattuto da almeno un secolo (xi). L'attività solare varia secondo cicli quasi periodici di undici anni, durante i quali si alternano fasi di massima e minima attività. Le fasi attive sono caratterizzate dalla formazione delle macchie solari; durante quelle di minima attività (come nel 2007-2009) le macchie solari sono ridotte o assenti. L'attività solare subisce anche variazioni di medio (decadi) e lungo termine (pluri-secolari), di maggiore o minore vigore. Misure satellitari hanno verificato che la variazione della radiazione incidente sull'atmosfera terrestre, in funzione dell'attività solare, è solo dell'ordine dello 0,1%. Tuttavia, le variazioni dell'irradiazione solare interagiscono con il campo magnetico terrestre, raggi cosmici e UV, strato dell'ozono e possono provocare effetti misurabili sul clima (xii). Alcuni studi, ancora controversi, hanno ipotizzato un effetto sul clima della variazione dei raggi cosmici (xiii) nella formazione delle nubi, ma il meccanismo fisico non è ancora chiaro, e gli effetti sul clima sono incerti (xiv). Il ciclo solare influisce sulla produzione dell'ozono stratosferico, che a sua volta filtra i raggi UV e riscalda l'atmosfera. Studi recenti suggeriscono che il ciclo solare abbia impatti rilevanti sulla ciclicità del fenomeno climatico El Niño nel Pacifico tropicale (xv).

Anche il campo magnetico terrestre non è statico, ma varia nel tempo (variazioni a brevissimo termine sino a secolari) in direzione ed intensità. Nell'arco di millenni si giunge all'inversione dei poli magnetici. Nella storia del pianeta si alternarono fasi a polarità "normale" nord-sud e inversa; quella attuale, a polarità normale, dura da 780.000 anni. Secondo alcuni studi, i periodi di maggiore attività magnetica potrebbero contribuire a sviluppare temperature più fredde; altri notano effetti sugli strati alti dell'atmosfera (xvi). Tutti questi fattori insieme, prolungati per secoli, possono influenzare il clima.

Nel passato, ci sono state alcuni periodi in cui il Sole ha manifestato una scarsa attività. Tra le fasi di minima attività (poche macchie solari) il "Minimo di Spörer", avvenuto tra il 1420 e il 1510, il "Minimo di Maunder", tra il 1645 e il 1715, il "Minimo di Dalton", tra il 1790 e il 1830, che si sono più o meno sovrapposti con la "Piccola Era Glaciale" verificatasi in Europa e America settentrionale intorno al XVI e XVII secolo. Quel periodo, però, fu caratterizzato anche da forte attività vulcanica, per cui è difficile discriminare l'effetto dell'attività solare (vedi nota i, pag. 391). È invece probabile che l'attività solare abbia contribuito in modo significativo al riscaldamento dei primi anni del XX secolo, quando le emissioni di gas serra antropiche erano di moderata entità; il rapido aumento termico dal 1950 (+0,12°C per decade), è invece avvenuto in un periodo di diminuita attività solare. Il presente ciclo solare undecennale 24, iniziato a gennaio 2008, sarà uno dei cicli solari più deboli dall'inizio delle registrazioni (1750) e tuttavia il riscaldamento è comunque proseguito, sia pur a tassi di crescita inferiori. Nel complesso, l'aumentata attività solare per alcuni decenni all'inizio del 1900 può aver contribuito per un riscaldamento di 0,1°C o poco più (vedi i, p. 392) sul totale di circa +1°C sino a oggi.

L'ORBITA DELLA TERRA E LE GLACIAZIONI

Il pianeta ha vissuto diverse grandi ere glaciali, la prima nel Proterozoico, intorno a 700 milioni di anni fa, molto intensa (gran parte della Terra era ghiacciata), seguita da altre tra i 460 e 430 milioni di anni fa, 350 e 250 milioni di anni fa. Da quando il genere homo è comparso sulla Terra, circa 2,5 milioni di anni fa (o più), i nostri progenitori hanno sperimentato almeno sette periodi glaciali, intervallati da periodi di clima mite (interglaciali), tra cui quello nel quale stiamo vivendo, iniziato 12000 anni fa.

È ormai condiviso che uno dei driver principali delle glaciazioni sia la variazione millenaria dell'orbita terrestre intorno al Sole. La teoria astronomica delle glaciazioni, basata sugli studi di Milankovich (xvii), ha calcolato che la quantità dell'insolazione sulla Terra dipende dalle variazioni cicliche della geometria dell'orbita e rotazione terrestre: eccentricità, inclinazione, precessione degli equinozi (variazione dell'asse di rotazione) e dell'eclittica, che si sviluppano nell'arco di decine di migliaia di anni. Tutte queste variazioni cicliche cambiano la quantità di insolazione che la Terra riceve in un anno, anche se ciò, a livello globale, porta una variazione media su tempi millenari di solo qualche decimo di grado. Milankovich osservò che tale variazione aveva effetti importanti alle alte latitudini ed era difforme tra le stagioni, favorendo le glaciazioni nei periodi in cui le condizioni orbitali riducono la differenza termica tra le stagioni, con estati più fredde.

Dunque il fattore orbitale è tra i principali driver naturali delle glaciazioni, ma la concentrazione di CO₂ in atmosfera è un altro fattore determinante a supporto o a freno dell'evoluzione naturale dei ghiacci. Risulta infatti che l'alternanza di fasi glaciali – interglaciali risponda alla concentrazione di CO₂; bassi livelli di CO₂ in atmosfera possono innescare, favorire o prolungare periodi di sviluppo glaciale. Dunque le fasi glaciali sulla Terra possono essere innescate dalla combinazione del fattore orbitale, della CO₂ e dei feedback climatici.

Nel corso degli ultimi 5000 anni sino al 1800 si era assistito a un lento raffreddamento della temperatura terrestre. Il raffreddamento si arrestò con l'inizio dell'era industriale e il progressivo aumento di CO₂ emessa dall'attività dell'uomo in atmosfera; è possibile che le emissioni di gas serra antropiche abbiano interagito nel sistema climatico, ritardando o fermando il raffreddamento. La concentrazione di CO₂ in atmosfera si dimostra dominante negli anni dal 1950 a oggi: infatti l'attuale fase di minimo dei ghiacciai dell'emisfero Nord sta avvenendo in un periodo di situazione orbitale che invece dovrebbe favorire lo sviluppo dei ghiacciai. E' praticamente certo che la situazione orbitale non potrà sviluppare una nuova glaciazione nei prossimi 50.000 anni, se la concentrazione di CO₂ resterà superiore a 300 ppm (vedi i, pag. 387 399).

CONCLUSIONI

Gli scettici che negano l'influenza dell'uomo sull'attuale fase di riscaldamento globale fondano le loro tesi sui vari forzanti naturali del clima, dal ciclo solare, all'attività vulcanica, al campo

magnetico terrestre o a variazioni dell'orbita della Terra. Dagli studi del paleoclima sappiamo che il pianeta ha vissuto diverse fasi calde, prima dell'attuale, ma quei riscaldamenti sono avvenuti nell'arco di decine di millenni. Gli eventi di riscaldamento repentini sono stati circoscritti a specifiche regioni, quali quelle polari e la Groenlandia durante l'ultima glaciazione, mentre l'attuale fase di riscaldamento dovuta alle emissioni di gas serra antropiche, non ha precedenti, avendo effetti globali molto intensi sviluppatosi nell'arco di pochi decenni; né il presente tasso di riscaldamento, né la concentrazione di gas serra in atmosfera, giunta a 400 ppm nel 2014, hanno riscontri persino nei precedenti periodi interglaciali. Ciò sta avendo effetti rapidi sul clima polare: a partire dal 1979, l'Artico si sta surriscaldando al tasso di 0,5°C per decade (oltre il doppio della media globale) e alcuni studi ritengono probabile che, se le concentrazioni di gas serra in atmosfera resteranno comprese tra 350 e 450 ppm o oltre per vari secoli, esse potranno causare anche lo scioglimento dei ghiacci dell'Antartide occidentale, con forte innalzamento dei mari (vedi nota i, pag. 387, 433). Per quanto riguarda l'attività vulcanica, su una scala temporale di molte migliaia di anni, essa contribuisce all'aumento delle concentrazioni di gas serra in atmosfera, ma queste sono poco rilevanti rispetto a quelle attualmente emesse per cause antropiche. Viceversa, l'attività vulcanica ha avuto effetti raffreddanti, nel caso dei grandi eventi esplosivi che si sono ripetuti nella storia del pianeta.

È stato a lungo dibattuto se le variazioni del ciclo solare influenzino il clima, e oggi si tende a rispondere affermativamente, anche se l'alterazione della radiazione solare incidente sulla Terra è solo dello 0,1%. Il forzante solare incide attraverso varie interazioni: raggi cosmici e UV, campo magnetico, strato dell'ozono, influenza sulle correnti oceaniche e formazione delle nubi e dei venti. Tuttavia, a partire dagli anni '50, con l'aumento delle emissioni di gas serra dovuto all'attività dell'uomo, queste sono diventate predominanti rispetto alla variazione dell'attività solare.

Analogamente, è vero che la variazione dell'orbita terrestre altera il livello di insolazione con effetti anche determinanti a provocare fenomeni di glaciazione, ma su scale temporali di decine di migliaia di anni. L'attuale riscaldamento globale e di minimo dei ghiacciai, sta avvenendo in una fase orbitale che invece dovrebbe favorire lo sviluppo dei ghiacci, a conferma dell'effetto ormai dominante dei gas serra accumulati in atmosfera. Anche se l'effetto serra può aver interferito con la naturale evoluzione del clima, fermando un possibile raffreddamento, l'attuale riscaldamento globale, così rapido, sta già avendo impatti severi su molte comunità umane e sugli ecosistemi. Se la concentrazione di gas serra si manterrà a livelli elevati durante questo secolo, a causa della sensibilità e instabilità del sistema climatico, oltre al probabile aumento di eventi meteorologici estremi, non si può escludere l'insorgere di fenomeni di feedback rilevanti, che renderebbero irreversibile l'evoluzione dei cambiamenti climatici. Per questo, è ora cruciale la riduzione delle emissioni di gas serra dovute all'uomo.

{comments on}

RIFERIMENTI E LINK

i IPCC Assessment Report AR5 working group I Cap. 5, 2013

https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter05_FINAL.pdf

ii http://hvo.wr.usgs.gov/volcanowatch/archive/2007/07_02_15.html

iii <https://www.climate.gov/news-features/climate-qa/whats-hottest-earths-ever-been>

iv <http://ocean.mit.edu/~cwunsch/papersonline/doevents.pdf>

v

<http://www.scienze-naturali.it/ricerca-scienza/groenlandia-16-secolo-la-scomparsa-dei-vichinghi-non-fu-causata-dalla-fame>

vi IPCC Assessment Report AR4 WG1 Cap. 6, 2008:

https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch6s6-6.html

vii <http://www.livescience.com/41909-new-clues-permian-mass-extinction.html>

viii

http://www.nationalgeographic.it/scienza/2013/02/19/news/cosa_uccise_i_dinosauri_-1507712/

ix <http://www.sciencedaily.com/releases/2009/11/091123142739.htm>

x

<http://www.meteoweb.eu/2014/04/la-terribile-eruzione-del-tambora-e-lanno-senza-estate-dal-mi-nimo-di-dalton-alle-fiabe-di-dickens/275660/>

xi <https://www.aip.org/history/climate/solar.htm>

xii NRC <http://www.nap.edu/read/13519/chapter/2>

xiii <http://science.sciencemag.org/content/298/5599/1732.short>

xiv 2013, <http://phys.org/news/2013-02-cosmic-rays-cloud-droplet-formation.html>

xv NASA, 2013 - http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2013/08jan_sunclimate/

xvi 2014, <http://phys.org/news/2014-05-earth-magnetic-field-important-climate.html>

xvii http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Milankovitch/milankovitch_3.php