



IMPATTO DAL PROFONDO

di Peter D. Ward

A scatenare molte delle estinzioni di massa avvenute in passato sulla Terra non sarebbero stati gli asteroidi, ma gas benefici emanati dagli oceani a causa del riscaldamento globale

I filosofo e storico Thomas S. Kuhn sostiene che le discipline scientifiche si comportano più o meno come organismi viventi: invece di evolvere lentamente, ma con continuità, hanno lunghi periodi di stabilità separati da saltuarie rivoluzioni durante le quali compaiono nuove specie, o – nel caso della scienza – nuove teorie.

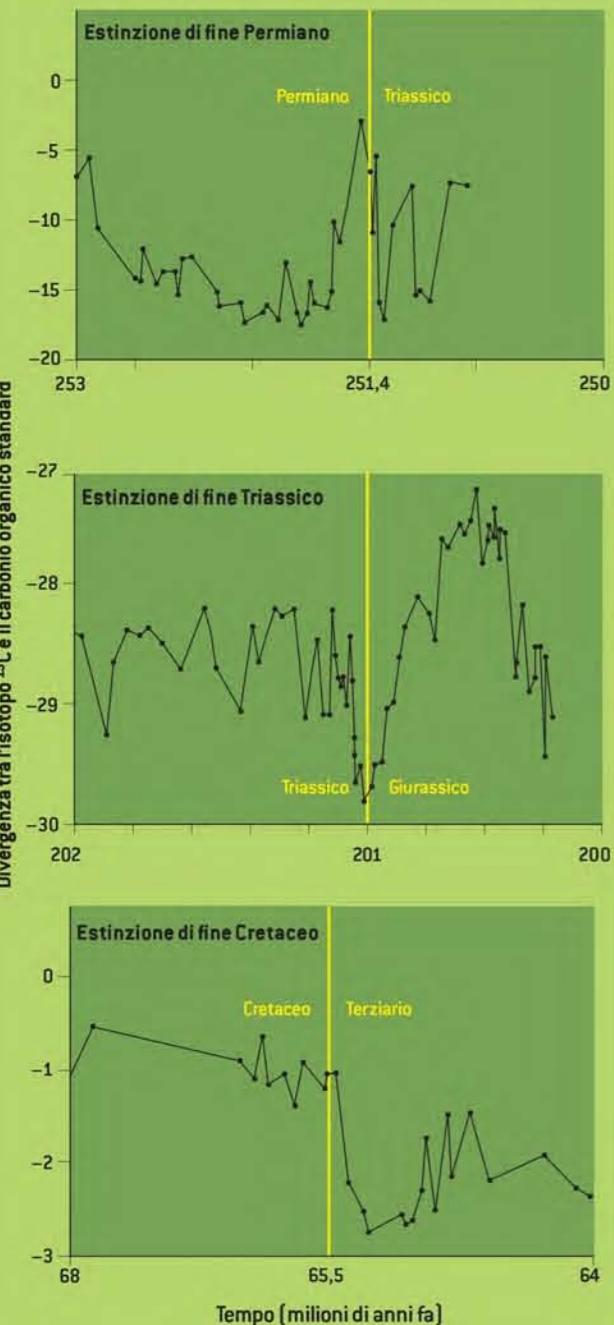
Questa descrizione è particolarmente adatta al mio settore di ricerca, che si occupa delle cause e delle conseguenze delle estinzioni di massa, i periodici sconvolgimenti biologici in cui scompare gran parte degli esseri viventi del pianeta, e dopo i quali nulla è più come prima. Fin da quando furono

scoperte per la prima volta, oltre due secoli fa, i paleontologi hanno pensato che si trattasse di eventi graduali, causati dalla combinazione di mutamento climatico e forze biologiche quali predazione, competizione e malattia.

Nel 1980 la comprensione delle estinzioni di massa subì una rivoluzione del tipo proposto da Kuhn, quando un gruppo dell'Università della California a Berkeley, diretto dal geologo Walter Alvarez, ipotizzò che la famosa estinzione che cancellò i dinosauri, circa 65 milioni di anni fa, fosse avvenuta repentinamente, in una catastrofe degli ecosistemi scatenata dall'impatto di un asteroide. Nei vent'anni successivi, l'idea

Ritmi di distruzione

Il carbonio 13 (^{13}C) trovato negli strati geologici suggerisce meccanismi di lunga durata dietro due antichi eventi di estinzione di massa. ^{13}C è più abbondante in atmosfera quando la vita vegetale è rigogliosa, ma quando le piante muoiono in misura imponente la percentuale di ^{13}C nel carbonio atmosferico crolla. Confrontando campioni antichi con un comune standard di carbonio si evidenziano varie, ampie riduzioni del ^{13}C verso i limiti geologici di fine Permiano (in alto) e di fine Triassico (al centro), che suggeriscono ripetute crisi di estinzione durante centinaia di migliaia di anni. Viceversa, un crollo di ^{13}C nel periodo intorno al limite Cretaceo-Terziario (in basso) dipinge un brusco cataclisma ecologico.



che un bolide proveniente dallo spazio avesse distrutto buona parte della vita sulla Terra fu ampiamente accettata, e molti ricercatori si convinsero che i detriti cosmici fossero alla base di almeno tre delle cinque estinzioni di massa più imponenti.

Ora però siamo alle soglie di un'altra trasformazione nel nostro modo di pensare al passato della vita sulla Terra. Nuovi indizi geochimici stanno emergendo dalle lame di roccia stratificata che corrispondono agli eventi di estinzione di massa, tra cui la scoperta di residui chimici – i cosiddetti biomarcatori organici – prodotti da minuscole forme di vita che generalmente non fossilizzano. Nel loro complesso, questi dati rivelano che un'estinzione di massa provocata da un impatto catastrofico fu l'eccezione, non la regola. Nella maggior parte dei casi, è stata la Terra stessa a trasformarsi nel peggior nemico della vita, in modi finora neppure immaginati. E le attuali attività umane potrebbero mettere nuovamente a rischio la biosfera.

L'estinzione dei dinosauri

Per capire l'entusiasmo suscitato dall'idea dell'impatto è d'aiuto passare in rassegna le prove che lo sostengono. Lo scenario proposto da Walter Alvarez insieme al padre, il fisico Luis W. Alvarez, e ai chimici nucleari Helen V. Michel e Frank Asaro, comprende due ipotesi distinte: in primo luogo, che un asteroide piuttosto grande – del diametro di circa 10 chilometri – abbia colpito la Terra 65 milioni di anni fa; in secondo luogo, che le conseguenze ambientali dell'impatto abbiano cancellato oltre metà delle specie viventi. I ricercatori trovarono le tracce dell'impatto: uno spesso strato ricco di iridio – elemento raro sulla Terra, ma comune in materiali extraterrestri – depositato su tutto il globo.

A una decina d'anni da questo stupefacente annuncio saltarono fuori le impronte digitali del killer, identificate nella forma del cratere di Chicxulub, nella penisola dello Yucatán, in Messico. La sua scoperta spazzò via la maggior parte dei dubbi sul fatto che il regno dei dinosauri fosse finito di colpo. Al tempo stesso suscitò però nuove domande sugli altri eventi di estinzione di massa: se uno era stato causato da un impatto, che dire degli altri?

Negli ultimi 500 milioni di anni, gran parte delle forme viventi della Terra ha semplicemente cessato di esistere per ben cinque volte. Il primo di questi eventi è avvenuto alla fine dell'Ordoviciano, circa 443 milioni di anni fa; il secondo, 374 milioni di anni fa, è stato verso la fine del Devoniano. Il più imponente di tutti, la «grande estinzione» della fine del Permiano, 251 milioni di anni fa, spazzò via il 90 per cento delle forme di vita oceaniche e il 70 per cento di piante e animali – insetti compresi – di terraferma. Un'altra falda globale vi fu 201 milioni di anni fa, chiudendo il Triassico, e l'ultima grande estinzione di massa, 65 milioni di anni fa, mise fine al Cretaceo nel modo drastico di cui si è detto.

Le prove di un impatto al limite geologico tra il Cretaceo e il Terziario (indicato con la sigla K/T) erano e restano convincenti: oltre al cratere di Chicxulub e al nitido strato di iridio, a testimonianza della collisione si ritrovano detriti da impatto (tra cui rocce sottoposte a shock termico), dispersi in tutto il globo. Ulteriori indizi chimici contenuti in sedimenti antichi documentano i repentina cambiamenti della composizione atmosferica e del clima globale che seguirono la catastrofe.

Anche nel caso di altri periodi di estinzione gli indizi sembra-

vano indicare verso il cielo. Già nei primi anni settanta, i geologi avevano associato un sottile strato di iridio alle estinzioni di fine Devoniano. E nel 2002 scoperte separate avevano suggerito l'esistenza di tracce di impatto ai limiti di fine Triassico e di fine Permiano. Nello strato del Triassico erano state registrate deboli tracce di iridio, mentre per il Permiano un altro indizio erano particolari molecole di carbonio della classe dei fullereni, che si pensava avessero intrappolato gas extraterrestri. Così, molti ricercatori iniziarono a sospettare che asteroidi o comete fossero all'origine di quattro delle cinque grandi estinzioni di massa; l'eccezione, l'evento accaduto alla fine dell'Ordoviciano, fu attribuita alle radiazioni di una stella esplosa vicino al sistema solare.

Ma negli ultimi anni, proseguendo lo studio dei dati disponibili, ci si è accorti che i conti non tornavano. Nuove analisi dei fossili indicavano che le estinzioni del Permiano e del Triassico erano stati processi lunghi, durati centinaia di migliaia di anni. E nuove informazioni sull'andamento del carbonio atmosferico, noto come fluttuazione ciclica del carbonio, suggerivano che la biosfera avesse sofferto una lunga serie di danni ambientali, piuttosto che un singolo, catastrofico colpo.

Un impatto non tanto improvviso

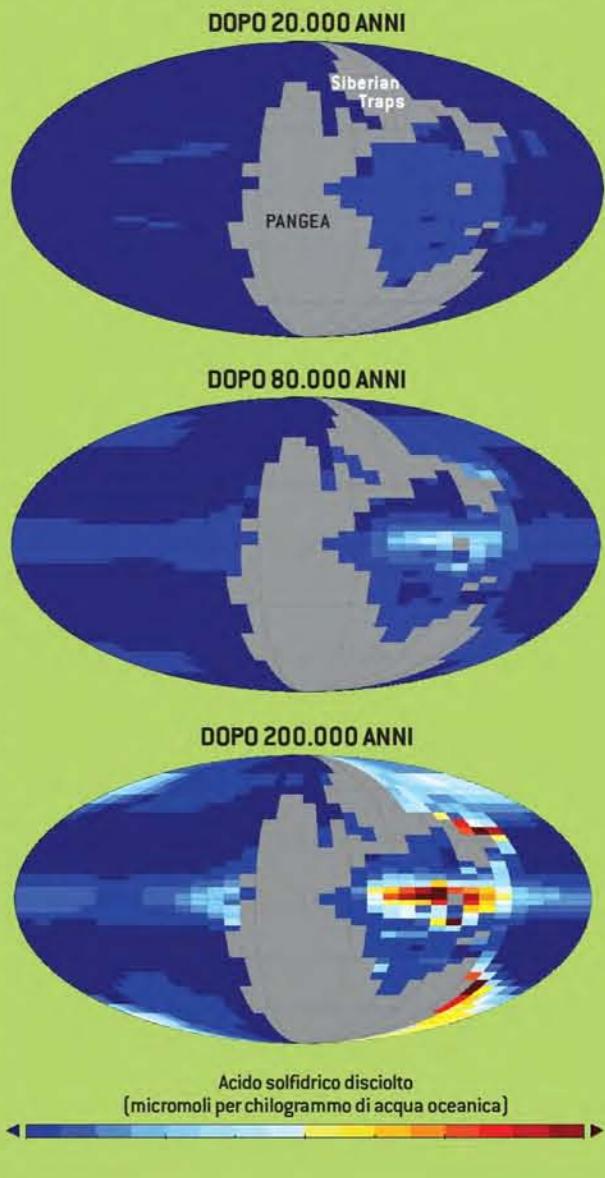
L'evento K/T ci ha insegnato che l'impatto di un grande bolide è come un violento terremoto che rade al suolo una città: il disastro è improvviso, devastante, ma di breve durata, e una volta finito si dà rapidamente inizio alla ricostruzione. Questo ritmo di distruzione e successivo recupero si riflette sia nei dati sugli isotopi del carbonio relativi alle estinzioni K/T sia nella documentazione fossile, per quanto la verifica di quest'ultima abbia richiesto un po' di tempo. L'improvvisa morte in corrispondenza del limite K/T era effettivamente visibile nei fossili più piccoli e numerosi, quelli del plancton calcareo e siliceo, e nelle spore delle piante. Ma quanto più grandi erano i fossili in un gruppo, tanto più graduale appariva la loro estinzione.

Pian piano, i paleontologi compresero che questa distribuzione era influenzata dalla penuria di campioni di grandi fossili in gran parte degli strati rocciosi allo studio. Per risolvere questo problema di campionamento e ottenere un quadro più chiaro del ritmo di estinzione, il paleontologo Charles Marshall, della Harvard University, sviluppò un nuovo protocollo statistico per analizzare la diffusione verticale dei fossili. Determinando la probabilità che una particolare specie si sia estinta entro un dato periodo di tempo, questo procedimento analitico estrae la massima quantità di informazioni contenute anche nei fossili rari.

Nel 1996 Marshall e io unimmo le nostre forze per mettere alla prova il suo sistema su sezioni stratigrafiche K/T, concludendo che l'andamento di quella che era sembrata un'estinzione graduale dei più abbondanti fra i grandi animali marini, le ammoniti europee (cefalopodi imparentati con il nautilo, dalla conchiglia concamerata), era invece compatibile con la loro scomparsa improvvisa al limite K/T stesso. Ma quando vari ricercatori, me compreso, applicammo la nuova metodologia a estinzioni precedenti, i risultati furono diversi. Gli studi del mio gruppo sugli strati in cui erano presenti ambienti sia marini sia terrestri alla fine del Permiano e del Triassico mostravano una successione più graduale di estinzioni, raggruppate attorno ai limiti.

Avvelenamento lento

Le simulazioni al computer proiettano un aumento delle concentrazioni di acido solfidrico tossico e un graduale impoverimento dell'ossigeno delle acque oceaniche di superficie alla fine del Permiano. Questo modello di Katja M. Meyer e Lee R. Kump, della Pennsylvania State University, mostra come influi sugli oceani il riscaldamento globale dovuto all'intensa attività vulcanica iniziata circa 251 milioni di anni fa nella regione del supercontinente Pangea detta Siberian Traps, scatenando una catastrofe nell'ecosistema.



L'AUTORE

PETER D. WARD è professore di scienze della Terra e dello spazio all'Università di Washington, dove si occupa, tra l'altro, degli antichi eventi di estinzione di massa, applicando inoltre le conoscenze delle prime forme di vita terrestri alla ricerca di habitat per la vita extraterrestre condotta dall'Astrobiology Institute della NASA.

Il racconto degli isotopi

Quell'andamento si rifletteva anche nella documentazione fornita dagli isotopi del carbonio, un altro potente strumento per capire i ritmi di estinzione. In natura esistono tre isotopi del carbonio, che hanno differente numero di massa perché diverso è il numero di neutroni contenuti nel nucleo. Uno di questi isotopi, il carbonio 14 (^{14}C), è familiare a molti perché il suo decadimento viene spesso usato per datare scheletri fossili o antichi sedimenti. Ma per l'interpretazione delle estinzioni di massa, è più utile estrarre dalla documentazione geologica il rapporto tra gli isotopi ^{12}C e ^{13}C , che offre una panoramica più ampia della vitalità dei vegetali dell'epoca.

Ciò è dovuto al fatto che la fotosintesi controlla in buona misura le variazioni del rapporto tra ^{12}C e ^{13}C . Le piante usano l'energia solare per rompere l'anidride carbonica (CO_2) in carbonio organico, che sfruttano per costruire le proprie cellule e produrre altra energia; fortunatamente per noi animali, il loro prodotto di scarto è l'ossigeno. Ma le piante sono esigenti, e scelgono di preferenza CO_2 contenente ^{12}C . Pertanto, quando la vita vegetale – che si tratti di microrganismi capaci di fotosintesi, di alghe fluttuanti o di alberi ad alto fusto – è abbondante, una più alta proporzione della CO_2 che rimane nell'atmosfera contiene ^{13}C , e il ^{12}C atmosferico è significativamente minore.

Esaminando i rapporti isotopici prima, durante e dopo un'estinzione di massa, i ricercatori possono ottenere un indicatore attendibile della quantità di vita vegetale sia su terraferma sia in ambiente marino. Ripetendo queste misure su un grafico per l'evento K/T, emerge un andamento semplice. Praticamente in simultanea con la deposizione del cosiddetto strato di impatto contenente le prove mineralogiche dei detriti, il rapporto tra isotopi del carbonio cambia per un breve periodo – ^{13}C crolla drasticamente – indicando un'improvvisa moria della vita vegetale e un rapido recupero. Questo è del tutto coerente con la documentazione fossile relativa sia alle più grandi piante della terraferma sia al microscopico plancton marino, che subirono perdite incredibili nell'evento K/T, ma si ripresero con rapidità.

In sintesi/Estinzioni di massa

- Negli ultimi 500 milioni di anni, oltre la metà di tutte le forme viventi della Terra è stata ripetutamente spazzata via da estinzioni di massa.
- Uno di questi eventi, che ha causato anche la scomparsa dei dinosauri, è attribuibile all'impatto di un asteroide, ma gli altri non hanno ancora avuto una spiegazione adeguata.
- Nuovi dati fossili e geocheimici sembrano indicare che la più grande di queste estinzioni [e forse anche altre] sarebbe stata causata da un micidiale meccanismo ambientale: l'emissione di gas velenosi da parte di un oceano impoverito di ossigeno per effetto del riscaldamento globale.

Forse è stata la Terra stessa a sterminare gran parte dei suoi abitanti

Viceversa, i dati sul carbonio acquisiti dal mio gruppo all'inizio del 2005 per il Permiano, e più di recente per il Triassico, documentano un destino molto diverso delle piante e del plancton in quelle due estinzioni di massa. In entrambi i casi, ripetuti spostamenti del rapporto isotopico su intervalli superiori ai 50.000-100.000 anni indicano che le comunità vegetali furono colpite e poi si ripresero, ma solo per essere turbate di nuovo da una serie di eventi di estinzione. Per produrre un simile andamento sarebbe stata necessaria una successione di impatti di asteroidi, distanziati di migliaia di anni. Non esiste però alcuna prova mineralogica di impatti con questa distribuzione temporale.

L'ulteriore studio dei dati ha addirittura messo in dubbio la probabilità che in quelle due epoche sia avvenuto qualunque tipo di impatto. Nessun altro gruppo di ricerca ha riprodotto l'iniziale scoperta di fullerini contenenti gas extraterrestri al limite di fine Permiano. Una scoperta di cristalli da shock termico risalenti a quel periodo è stata ritrattata, e non c'è accordo tra i geologi sul fatto che presunti crateri d'impatto relativi a quell'evento, sul fondo dell'oceano al largo dell'Australia e sotto i ghiacci dell'Antartide, siano davvero crateri e non formazioni rocciose naturali. Per la fine del Triassico, l'iridio trovato è in concentrazioni così basse che potrebbe riflettere un piccolo impatto di meteorite, ma nulla di lontanamente simile a ciò che si osserva al limite K/T.

Ma se non ci sono prove sufficienti che la causa di queste estinzioni di massa siano stati gli impatti, che cosa può averle scatenate? Un nuovo tipo di dati rivela che a sterminare i suoi abitanti avrebbe potuto essere, e probabilmente è stata, la Terra stessa.

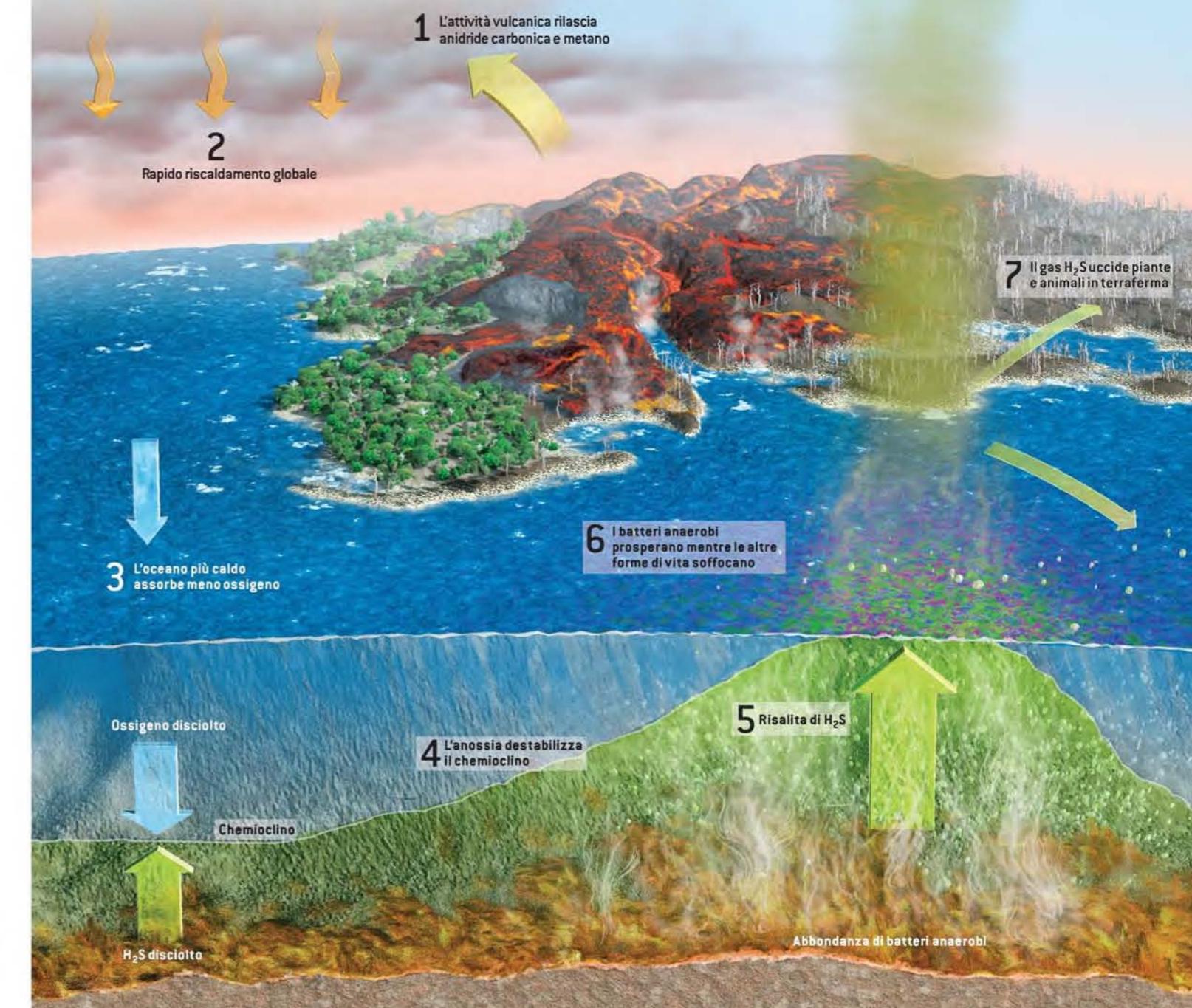
La regressione dell'ossigeno

Circa cinque anni fa un piccolo gruppo di geologi iniziò a collaborare con alcuni chimici organici per studiare le condizioni ambientali in momenti critici della storia terrestre. Il loro lavoro ha comportato l'estrazione di residui organici da strati antichi in cerca di «fossili» chimici noti come biomarcatori. Alcuni organismi lasciano dietro di sé molecole organiche molto resistenti, che sopravvivono al decadimento dei corpi e rimangono incluse in rocce sedimentarie. Questi biomarcatori possono servire come prova dell'antica presenza di forme viventi da tempo scomparse che di solito non lasciano alcun fossile. Vari microrganismi, per esempio, lasciano tracce dei particolari lipidi presenti nelle loro membrane cellulari, tracce che emergono grazie a nuovi tipi di spettrometria di massa, una tecnica che suddivide le molecole in base alla loro massa.

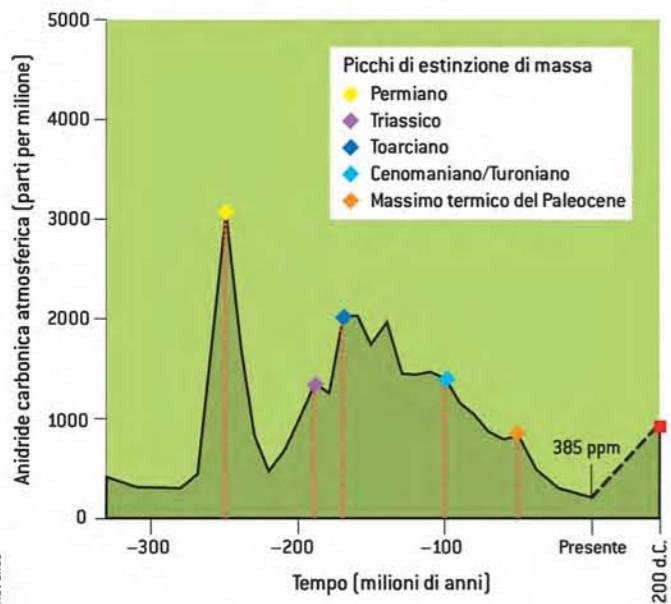
Questa ricerca sui biomarcatori è stata dapprima condotta su rocce preesistenti alla storia di animali e piante, in parte per determinare quando e in quali condizioni la vita è emersa per la prima volta sulla Terra. Ma negli ultimissimi anni gli scienziati hanno iniziato a campionare i limiti delle estinzioni di massa. E, con grande sorpresa di chi effettuava questi studi, i dati dei periodi di estinzione di massa diversi dall'evento K/T suggerivano che gli oceani erano regrediti più di una volta a una condizione

EFFETTO SERRA KILLER

Un nuovo modello per le estinzioni di massa avvenute alla fine del Permiano, circa 251 milioni di anni fa, e alla fine del Triassico, circa 50 milioni di anni più tardi, spiega come un intenso riscaldamento globale possa scatenare la morte in mare e in terraferma. I problemi iniziano con un'estesa attività vulcanica che rilascia volumi enormi di anidride carbonica e metano (1). I gas causano un rapido riscaldamento globale (2). Un oceano più caldo assorbe meno ossigeno dall'atmosfera (3). La scarsità di ossigeno (anossia) destabilizza il chemiclino, il limite che separa le acque ossigenate da quelle permeate di acido solfidrico (H_2S) prodotto da batteri anaerobi del fondo (4). Quando la concentrazione di H_2S aumenta e l'ossigeno diminuisce, il chemiclino risale di colpo alla superficie dell'oceano (5). I solfobatteri fotosintetizzanti verdi e purpurei, che si alimentano di H_2S e vivono normalmente a livello del chemiclino, ora prosperano nelle acque superficiali arricchite di H_2S , mentre la vita oceanica basata sulla respirazione dell'ossigeno soffoca (6). Il gas H_2S si diffonde anche nell'aria, uccidendo piante e animali sulla terraferma (7) e risale fino alla troposfera attaccando lo strato di ozono del pianeta (8). In mancanza di uno scudo per l'ozono, la radiazione ultravioletta proveniente dal Sole uccide le forme di vita residue (9).



VERSO UN'ALTRA ESTINZIONE?



DURANTE LE ANTICHE ESTINZIONI DI MASSA il livello dell'anidride carbonica atmosferica (CO_2) era elevato, confermando l'ipotesi che il riscaldamento globale abbia avuto un ruolo in questi eventi. Oggi i livelli di CO_2 sono di 385 parti per milione (ppm) e si prevede che crescano di 2 o 3 ppm all'anno. Se questa tendenza proseguirà, entro la fine del XXII secolo saranno di 900 ppm, appena al di sotto dei livelli dell'estinzione di 54 milioni di anni fa.



LE ERUZIONI DI ACIDO SOLFIDRICO nell'oceano presso le coste della Namibia sono evidenziate in questa fotografia ripresa dal satellite Aqua come chiazze e vortici di colore verde chiaro sulla superficie dell'acqua. Queste emissioni del micidiale gas si verificano quasi con cadenza annuale, e hanno origine da sedimenti del fondo marino saturi di acido solfidrico. Ma il loro effetto locale è simile a quello delle più massicce risalite di gas ipotizzate per diversi antichi eventi di estinzione di massa: i pesci e altre forme di vita marina muoiono in massa, mentre gamberi, aragoste e granchi, a corto di ossigeno, fuggono sulle spiagge in cerca di aria respirabile.

di estrema penuria di ossigeno – nota come anossia – che era stata prevalente prima che piante e animali divenissero abbondanti.

Tra i biomarcatori scoperti c'erano i resti di grandi quantità di minuscoli batteri fotosintetizzanti. Oggi questi microrganismi vivono in ambienti marini anossici, come gli strati profondi dei laghi stagnanti e del Mar Nero, e non sono dei tipi gradevoli: per ottenere energia, infatti, ossidano acido solfidrico (H_2S), un gas velenoso per gran parte degli esseri viventi, e lo convertono in zolfo. La loro abbondanza in corrispondenza dei limiti di estinzione ha aperto la strada a una nuova interpretazione della causa delle estinzioni di massa.

È noto da tempo che intorno ai periodi delle estinzioni di massa i livelli di ossigeno erano più bassi di oggi, ma la ragione non è mai stata ben identificata. Un'attività vulcanica su vasta scala, associata anch'essa alla maggior parte delle estinzioni di massa, potrebbe aver fatto aumentare i livelli di CO_2 nell'atmosfera, riducendo l'ossigeno e portando a un intenso riscaldamento globale. Tuttavia i cambiamenti causati dal vulcanismo non spiegano necessariamente le massicce estinzioni marine di fine Permiano, né si possono ritenere responsabili i vulcani della morte delle piante terrestri, dato che con più CO_2 la vegetazione prospererebbe, probabilmente sopravvivendo al riscaldamento.

Ma i biomarcatori nei sedimenti oceanici dell'ultima parte del Permiano, e anche nelle ultime rocce del Triassico, hanno dato la prova chimica di una fioritura su scala oceanica di batteri che consumavano H_2S . Poiché questi microrganismi possono vivere solo in un ambiente privo di ossigeno, ma hanno bisogno della luce solare per la fotosintesi, la loro presenza in strati che rappresentano ambienti di mare poco profondo è di per sé indicativa che alla fine del Permiano perfino la superficie degli oceani era senza ossigeno, ma ricca di acido solfidrico.

Bolle di gas venefico

Negli oceani odierni, l'ossigeno è presente in concentrazioni sostanzialmente uniformi dalla superficie al fondo, poiché si scioglie all'interfaccia tra acqua e atmosfera ed è trasportato verso il basso dalla circolazione oceanica. Solo in circostanze insolite, come quelle del Mar Nero, le condizioni anossiche che prevalgono sotto la superficie consentono a organismi intolleranti all'ossigeno di prosperare. Questi microrganismi anaerobi di profondità producono grosse quantità di acido solfidrico, che va anche in soluzione nell'acqua. All'aumentare della sua concentrazione, l' H_2S si diffonde verso l'alto, dove incontra l'ossigeno che si diffonde verso il basso. Finché il loro equilibrio è indisturbato, le acque ossigenate e saturate di acido solfidrico rimangono separate, e la loro interfaccia, nota come chemiocline, è stabile. Normalmente i solfobatteri purpurei e verdi vivono all'altezza del chemiocline, approfittando del doppio beneficio dell' H_2S proveniente dal basso e della luce solare proveniente dall'alto.

Tuttavia, i calcoli dei geochimici Lee Kump e Michael Arthur, della Pennsylvania State University, hanno mostrato che se i livelli di ossigeno precipitano negli oceani le condizioni iniziano a favorire i batteri anaerobi di profondità, che proliferano producendo quantità maggiori di acido solfidrico. Nei loro modelli, se durante una fase di anossia oceanica le concentrazioni di H_2S nelle acque profonde aumentano oltre una soglia critica, il

chemiocline che separa l'acqua profonda ricca di zolfo dall'acqua superficiale ricca di ossigeno può spostarsi improvvisamente fino alla superficie; il nefasto risultato di questa alterazione è l'eruzione nell'atmosfera di grandi bolle di H_2S .

Gli studi di Kump e Arthur indicano che alla fine del Permiano questi movimenti di risalita oceanica avrebbero prodotto H_2S a sufficienza da causare estinzioni sia in terra sia in mare (si veda il box a p. 77). E questo gas soffocante non sarebbe stato l'unico killer. Altri modelli mostrano che H_2S avrebbe anche attaccato lo scudo di ozono che protegge la vita del pianeta dalla radiazione ultravioletta (UV) proveniente dal Sole. Prove che vi sia stata una distruzione dello strato di ozono alla fine del Permiano si ricavano da spore fossili della Groenlandia, che presentano deformità caratteristiche di un'esposizione prolungata ad alti livelli di UV. Oggi vediamo inoltre sotto ai «buchi» dello scudo di ozono, specialmente in Antartide, che la biomassa del fitoplancton diminuisce rapidamente. E se la base della catena alimentare viene distrutta non passa molto tempo prima che anche gli organismi superiori si trovino in disperate ristrettezze.

Kump e Arthur stimano che la quantità di H_2S rilasciata dagli oceani nell'atmosfera alla fine del Permiano sia stata oltre 2000 volte più grande di quella emessa attualmente dai vulcani. Il gas tossico avrebbe permeato l'atmosfera in quantità tale da uccidere piante e animali, anche perché la letalità dell' H_2S aumenta con la temperatura. E molte estinzioni di massa grandi e piccole sembrano essersi verificate in corrispondenza di intervalli di riscaldamento globale.

È qui che può essere entrata in causa l'attività vulcanica. Si sa che, più o meno nella stessa epoca di varie estinzioni di massa, eventi vulcanici di prima grandezza ricoprono di lava migliaia di chilometri quadrati di terraferma e di fondo marino. Una conseguenza di questo tremendo sfogo vulcanico sarebbe stata l'immissione in atmosfera di volumi enormi di anidride carbonica e di metano, tali da causare un rapido riscaldamento globale. Durante le ultime fasi del Permiano e del Triassico, ma anche all'inizio del Giurassico, a metà del Cretaceo e nel tardo Paleocene, l'andamento dei rapporti isotopici del carbonio conferma che le concentrazioni di CO_2 aumentarono vertiginosamente subito prima dell'inizio delle estinzioni, e rimasero alte per centinaia di migliaia di anni, o addirittura per milioni.

Ma il fattore determinante sembrano essere stati gli oceani. Il riscaldamento rende più difficile l'assorbimento di ossigeno atmosferico da parte dell'acqua; pertanto se il vulcanismo avesse fatto aumentare nell'atmosfera i livelli di CO_2 e diminuire quelli di ossigeno, e se al tempo stesso il riscaldamento globale avesse reso ancora più difficile la penetrazione nell'oceano del poco ossigeno residuo, vi sarebbero state le condizioni perché i batteri anaerobi di mare profondo generassero massicce risalite di H_2S . La vita oceanica basata sull'ossigeno sarebbe stata colpita per prima e più duramente, mentre i batteri fotosintetizzanti verdi e purpurei in grado di consumare H_2S avrebbero potuto prospera-

re anche in superficie. Man mano che l' H_2S soffocava le forme di vita sulla terraferma ed erodeva lo scudo protettivo del pianeta, nessun essere vivente era più al sicuro.

L'ipotesi di sterminio planetario formulata da Kump offre un collegamento tra le estinzioni terrestri e quelle marine alla fine del Permiano, e spiega in che modo il vulcanismo e il conseguente aumento della CO_2 abbiano potuto innescare entrambe. Inoltre spiega la strana presenza di zolfo in tutti i siti di fine Permiano. L'avvelenamento dell'oceano e dell'atmosfera spiegherebbe anche la grande lentezza del recupero biologico che seguì quell'estinzione.

Questa sequenza di eventi non è un'esclusiva della fine del Permiano. Un'estinzione minore alla fine del Paleocene, 54 milioni di anni fa, era già stata attribuita a un intervallo di anossia oceanica innescato da un riscaldamento globale di breve durata. I biomarcatori e le prove geologiche di anossia oceanica indicano che la stessa cosa potrebbe essere accaduta alla fine del Triassico, a metà del Cretaceo e alla fine del Devoniano, per cui le estinzioni dovute a un effetto serra estremo potrebbero essere un fenomeno ricorrente nella storia terrestre.

A preoccupare di più, però, è l'ipotesi che che tutto ciò si ripeta in futuro: ciò che è accaduto un tempo potrebbe accadere ancora? Anche se le stime dei tassi con cui l'anidride carbonica affluiva nell'atmosfera durante ciascuna della antiche estinzioni sono ancora incerte, i livelli assoluti di questo gas in corrispondenza dell'inizio delle estinzioni stesse

sono comunque noti (si veda il box in alto nella pagina a fronte). La cosiddetta estinzione termica alla fine del Paleocene iniziò quando la CO_2 atmosferica era appena inferiore a 1000 parti per milione (ppm). Alla fine del Triassico, la CO_2 era appena al di sopra di 1000 ppm. Oggi, con la CO_2 a 380 ppm, dovremmo essere al sicuro da questo punto di vista. Ma con un tasso annuo di incremento del carbonio atmosferico di 2 ppm, che potrebbe accelerare a 3 ppm, i livelli potrebbero avvicinarsi a 900 ppm entro la fine del prossimo secolo, creando le condizioni per l'instaurarsi dell'anossia oceanica.

Da quel momento in poi, quanto tempo passerà prima che si verifichi una nuova estinzione provocata dall'effetto serra? Speriamo che la nostra specie non debba mai scoprirllo.

PER APPROFONDIRE

WARD P.D., *Rivers in Time: The Search for Clues to Earth's Mass Extinctions*, Columbia University Press, 2002.

WARD P.D. e altri, *Abrupt and Gradual Extinction among Late Permian Land Vertebrates in the Karoo Basin, South Africa*, in «Science», Vol. 307, pp. 709-714, 4 febbraio 2005.

GRICE K. e altri, *Photic Zone Euxinia during the Permian-Triassic Superoxidic Event*, in «Science», Vol. 307, pp. 706-709, 4 febbraio 2005.

KUMPL R., PAVLOVA A. e ARTHUR M.A., *Massive Release of Hydrogen Sulfide to the Surface Ocean and Atmosphere during Intervals of Ocean Anoxia*, in «Geology», Vol. 33, n. 5, pp. 397-400, maggio 2005.