

Una Terra a palla di neve

di Paul F. Hoffman e Daniel P. Schrag

Alcune centinaia di milioni di anni fa, il nostro pianeta fu attanagliato completamente dai ghiacci; a questo episodio seguì immediatamente un periodo di caldo infernale



Glen Allison Digital Imagery © 1999 PhotoDisc, Inc.

Per gli antenati dell'uomo moderno la vita era assai dura. Se le tigri dai denti a sciabola e i pelosi mammut erano una preoccupazione quotidiana, i rigori del clima dovevano essere una sfianante sfida a lungo termine. Negli ultimi milioni di anni, si è avuta una glaciazione dopo l'altra. All'apice dell'ultimo episodio glaciale, 20 000 anni fa, ghiacciai dello spessore di oltre due chilometri attanagliavano gran parte del Nord America e dell'Europa. Il ghiaccio arrivava fino alla latitudine di New York.

Per quanto una situazione di questo genere possa sembrare drammatica, essa impallidisce al cospetto degli eventi catastrofici che alcuni dei nostri più arcaici microscopici predecessori dovettero sopportare intorno a 600 milioni di anni fa. Appena prima della comparsa di forme riconoscibili di vita animale, nel Neoproterozoico, si instaurò una glaciazione così intensa che per-

fino i tropici erano coperti dai ghiacci.

Si provi a immaginare una Terra che abbia l'aspetto di una palla di neve, per 10 milioni di anni o più: il calore del nucleo fa sì che gli oceani non congelino fino al fondo, ma con una temperatura di - 50 gradi Celsius il ghiaccio raggiunge lo spessore di un chilometro. Quasi tutti gli organismi primitivi che popolano il pianeta soccombono, ma una piccola frazione sopravvive.

A parte lo stridore dei ghiacciai e il brontolio dei ghiacci marini, l'unico sommovimento è dato dall'attività dei vulcani, che cercano di fare capolino attraverso la gelida coltre. Benché il pianeta sembri destinato a non risvegliarsi mai più da questo letargo, i vulcani preparano lentamente una via di uscita: l'anidride carbonica.

Poiché i cicli geochimici che normalmente portano al riassorbimento del carbonio sono bloccati dalle coltri glaciali, l'anidride carbonica si accumula

nell'atmosfera fino a raggiungere livelli record. Data la capacità di questo gas di intrappolare il calore, il pianeta si scalda e il ghiaccio inizia a fondere. Perché questo accada bastano poche centinaia di anni, ma nel frattempo sorge un nuovo problema: un brutale effetto serra. Gli organismi sopravvissuti alla ghiacciaia devono ora affrontare la prova della stufa.

Per quanto improbabile possa suonare, vi sono chiare indicazioni del fatto che questa sconvolgente inversione climatica - la più estrema immaginabile sul nostro pianeta - si sia verificata fino a quattro volte tra 750 e 580 milioni di anni fa. Si è a lungo ritenuto che il clima della Terra non fosse mai stato così tremendo, anche se cambiamenti climatici di questa entità erano stati ammessi per altri pianeti, come Venere (si veda l'articolo *Cambiamenti climatici globali su Venere*, di Mark A. Bullock e David H. Grinspoon, in

Torri di ghiaccio simili a quelle del Perito Moreno, in Argentina (sopra), un tempo sormontavano tutti i continenti della Terra. Gli indizi di questo gelido passato sono riaffiorati in strati rocciosi come quelli delle colline costiere della Namibia nordoccidentale (nel riquadro).

«Le Scienze» n. 369, maggio 1999). I primi indizi di un passato così duro per le forme di vita terrestri cominciarono a trapelare all'inizio degli anni sessanta ma, negli ultimi otto anni, noi e i nostri colleghi abbiamo scoperto nuovi elementi che ci consentono di ricostruire una storia ancora più esplicita. Questa storia sta catturando l'attenzione tanto dei geologi, quanto dei biologi e dei climatologi.

Spessi strati di rocce antiche custodiscono i soli indizi esistenti sul clima terrestre nel Neoproterozoico. Per decenni, molti di questi indizi sono apparsi zeppi di contraddizioni. Il primo paradosso era la presenza di detrito

glaciale in prossimità del livello del mare ai tropici. I ghiacciai in prossimità dell'equatore sopravvivono ai nostri giorni solo ad altitudini maggiori di 5000 metri, e al culmine dell'ultima glaciazione non erano scesi al di sotto dei 4000. Mescolati ai detriti glaciali si trovano insoliti depositi di rocce ricche in ferro. Questi depositi avrebbero dovuto formarsi solo qualora gli oceani e l'atmosfera del Neoproterozoico avessero avuto un contenuto in ossigeno scarso o nullo; ma all'epoca i gas atmosferici erano già in proporzioni simili a quelle attuali. Per confondere le cose, rocce che di norma si formano in acque calde sembravano essersi accu-

mulate appena dopo il ritiro dei ghiacci. Posto che la Terra sia mai stata abbastanza fredda da gelare completamente, come avrebbe potuto scaldarsi di nuovo? Inoltre il rapporto isotopico del carbonio nelle rocce indica un prolungato calo della produttività biologica. Che cosa potrebbe avere causato questa drastica riduzione della vita?

Ognuno di questi annosi enigmi trova improvvisamente risposta se li guardiamo nel contesto di ciò che potremmo chiamare «Terra a palla di neve», ovvero di un evento di glaciazione totale del nostro pianeta. Questa teoria ha cominciato ad acquistare credibilità scientifica da quando l'abbiamo intro-



Cortesia Paul F. Hoffman

dotta in un articolo su «Science», un paio di anni fa. Se la nostra teoria si rivelerà corretta, la storia che abbiamo ricostruito non si limiterà a spiegare i misteri del clima del Neoproterozoico e a mettere in dubbio le convinzioni acquisite sui limiti del cambiamento climatico. Queste glaciazioni estreme si verificarono appena prima di una rapida diversificazione della vita pluricellulare che culminò nella cosiddetta esplosione cambriana, tra 575 e 525 milioni di anni fa. Paradossalmente, i lunghi periodi di isolamento e le condizioni estreme avrebbero potuto stimolare il cambiamento genetico, e ciò potrebbe spiegare l'esplosione evolutiva.

La ricerca di quelle che poi si sarebbero rivelate sorprendenti prove di questi eventi climatici ci ha portati in giro per il mondo. Attualmente stiamo studiando le rocce neoproterozoiche di Australia, Cina, Stati Uniti occidentali e Isole Svalbard, ma le nostre ricerche hanno avuto inizio nel 1992 lungo le scogliere della Skeleton Coast in Namibia. All'epoca che ci interessa questa regione dell'Africa sudoccidentale era parte di una vasta piattaforma continentale, in lenta subsidenza, situata alle basse latitudini australi.

Qui si riscontrano rocce formate da depositi detritici lasciati dal ritiro di ghiacciai. Le rocce, in cui predominano i carbonati di calcio e magnesio, si trovano subito al di sopra di detriti glaciali e contengono la prova «chimica» delle condizioni climatiche torride succedutesi alla glaciazione totale. Dopo centinaia di milioni di anni di seppellimento, queste rocce, ora affioranti, raccontano la storia che alcuni scienziati avevano già iniziato a ricostruire 35 anni fa.

Nel 1964 W. Brian Harland dell'Università di Cambridge fece notare che depositi glaciali costellano gli affioramenti di rocce neoproterozoiche pressoché in tutti i continenti. All'inizio degli anni sessanta, gli scienziati avevano iniziato ad accettare l'idea della tettonica delle zolle, che descrive il pianeta come ricoperto da un sottile involucro roccioso frammentato in giganteschi «zatteroni» che galleggiano sulla roccia semifluida del mantello. Harland, basandosi sull'orientazione magnetica dei granuli di minerale nelle rocce glaciali, riteneva che nel Neoproterozoico i continenti si fossero aggregati tutti insieme in prossimità dell'equatore. Prima che queste rocce si consolidassero, i granuli si erano allineati al campo magnetico, con un'inclinazione minima rispetto al piano orizzontale, data la vicinanza all'equatore. (Se le rocce si fossero formate in prossimità di uno

dei poli, l'inclinazione sarebbe stata vicina alla verticale.)

Rendendosi conto che i ghiacciai dovevano avere coperto anche le zone tropicali, Harland fu il primo a proporre che la Terra avesse sperimentato una grande glaciazione neoproterozoica. Sebbene alcuni suoi contemporanei fossero scettici sull'attendibilità dei dati magnetici, altri scienziati hanno da allora dimostrato che le intuizioni di Harland erano corrette; ma nessuno riusciva a spiegare come i ghiacciai potessero avere resistito al calore tropicale.

Proprio mentre Harland annunciava le sue idee sui ghiacciai del Neoproterozoico, si andavano sviluppando i primi modelli matematici del clima della Terra. Mikhail Budyko, dell'Osservatorio geofisico di Leningrado, trovò un

modo per spiegare i ghiacciai tropicali utilizzando equazioni che descrivono il modo in cui la radiazione solare controlla il clima interagendo con la superficie e con l'atmosfera terrestre.

Alcune superfici geografiche riflettono una frazione maggiore dell'energia solare incidente rispetto ad altre; questa caratteristica è ben quantificabile e viene definita con il nome di albedo. La neve riflette la maggior parte dell'energia solare, e ha quindi albedo elevata, mentre le scure acque dell'oceano hanno albedo bassa, e le superfici continentali hanno valori intermedi di albedo che dipendono dal tipo e dalla distribuzione della vegetazione.

Quanto maggiore è la quota di radiazione riflessa dal pianeta, tanto più bassa diventa la temperatura. Con la

loro alta albedo, neve e ghiaccio raffreddano l'atmosfera, e quindi pongono le condizioni per il proprio mantenimento. Budyko sapeva che questo processo di retroazione favorisce la crescita delle attuali coltri glaciali polari; ma le sue simulazioni climatiche rivelavano anche che la retroazione può andare fuori controllo. Quando il ghiaccio iniziò a formarsi a latitudini inferiori a 30 gradi nord e sud, l'albedo del pianeta aumentò con rapidità molto maggiore, dato che la luce solare colpiva una più vasta superficie di ghiaccio per grado di latitudine. Nei modelli, la retroazione divenne così forte che le temperature superficiali precipitarono e l'intero pianeta andò incontro a congelamento.

Surgeati e fritti

Queste simulazioni accesero l'interesse per le modellizzazioni climatiche, che allora erano agli albori, ma neppure Budyko credeva che la Terra avesse davvero potuto sperimentare un simile

raffreddamento. Si riteneva che una catastrofe di quell'entità avrebbe portato all'estinzione tutte le forme di vita; tuttavia le tracce di alghe microscopiche in rocce di anche due miliardi di anni fa assomigliano molto alle forme moderne, e questa somiglianza implica una continuità di vita. Inoltre si pensava che se la Terra fosse mai entrata in una simile morsa di gelo, l'alta albedo della superficie avrebbe fatto abbassare le temperature superficiali fino a un punto di non ritorno: una glaciazione di questo genere sarebbe stata perenne.

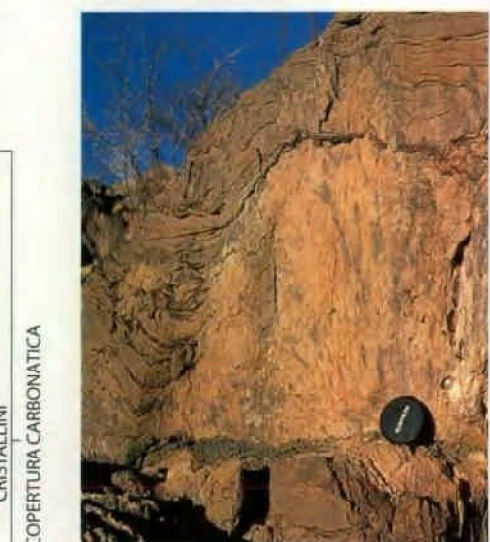
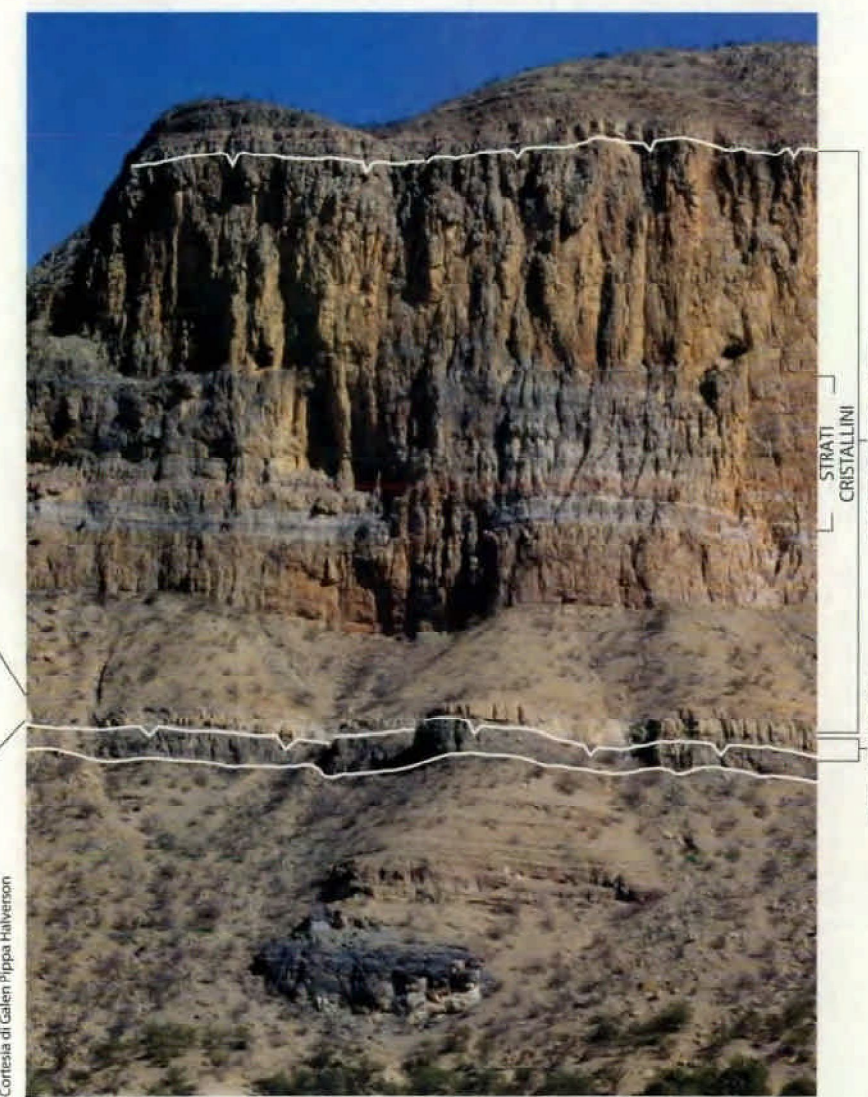
La prima obiezione cominciò a sfumare alla fine degli anni settanta, con la scoperta di notevoli comunità di organismi in luoghi un tempo ritenuti inospitali. Le sorgenti calde sottomarine danno sostentamento a microrganismi adattati al particolare ambiente chimico; il tipo di attività vulcanica che alimenta queste sorgenti sarebbe continuato anche in una Terra ridotta a palla di neve. Le prospettive di sopravvivenza sembrano ancora più rosee per

gli organismi psicrofili, o amanti del freddo, come quelli rinvenuti nelle gelide e secche valli montane dell'Antartide orientale. I cianobatteri e certe alghe occupano habitat come la neve, le rocce porose e le superfici di particelle di polvere racchiuse nei ghiacci galleggianti.

La chiave del secondo problema - l'inversione del congelamento della Terra - è l'anidride carbonica. In un tempo breve come una vita umana, la quantità di questo gas nell'atmosfera può variare sensibilmente: le piante lo consumano nel processo di fotosintesi, mentre gli animali lo emettono con la respirazione. Inoltre attività umane come il consumo di combustibili fossili hanno rapidamente caricato l'atmosfera di anidride carbonica fin dagli inizi della Rivoluzione industriale. In rapporto ai tempi geologici, tuttavia, questi processi di produzione e assorbimento del carbonio sono irrilevanti.

L'anidride carbonica è uno dei molti gas emessi dai vulcani. Normalmente questo incessante apporto di carbonio

Le masse continentali erano con ogni probabilità concentrate nella zona tropicale durante la glaciazione totale avvenuta circa 600 milioni di anni fa. Anche se i continenti hanno da allora mutato posizione, i detriti lasciati dai ghiacciai in ritiro affiorano in decine di zone della crosta terrestre: una di queste è la Namibia (pallino rosso).



Le falesie rocciose lungo la Skeleton Coast della Namibia (a sinistra) hanno fornito alcuni degli indizi più convincenti sull'ipotesi della glaciazione totale. Gli autori Schrag (all'estrema sinistra) e Hoffman indicano uno strato di roccia che rappresenta la brusca fine di un evento di glaciazione totale di 700 milioni di anni fa. Il masso chiaro che si vede tra i due autori fu trasportato probabilmente da un iceberg, e cadde sul fondo fangoso alla fusione del ghiaccio. Subito dopo, strati di carbonati puri, tipici di mari caldi e poco profondi, si depositarono al di sopra dei depositi glaciali. Queste coperture carbonatiche sono le sole rocce neoproterozoiche che mostrano ampi strati cristallini tipici di un rapido accumulo di carbonati (qui sopra).

è compensato in parte dall'erosione delle rocce silicatiche: la decomposizione chimica di queste rocce converte l'anidride carbonica in ione bicarbonato, che viene dilavato e finisce negli oceani. Il bicarbonato si combina con ioni calcio e magnesio, così da produrre sedimenti carbonatici che immagazzinano enormi quantità di carbonio.

Nel 1992 Joseph L. Kirschvink del California Institute of Technology fece notare che, durante una glaciazione globale, la tettonica delle zolle avrebbe continuato a costruire vulcani e a immettere anidride carbonica nell'atmosfera. Nel contempo, l'acqua liquida necessaria per erodere le rocce e per seppellire il carbonio sarebbe stata intrappolata nel ghiaccio. Senza meccanismi di riassorbimento, l'anidride carbonica si sarebbe accumulata fino a livelli altissimi: abbastanza alti - ipotizzava Kirschvink - da riscaldare il pianeta e mettere fine alla morsa del gelo.

Kirschvink aveva inizialmente sostenuto l'idea di una glaciazione totale nel Neoproterozoico anche per spiegare i misteriosi depositi di ferro rinvenuti nel detrito glaciale. Questi rari depositi si trovano in fasi molto precoci della storia terrestre, quando gli oceani (e l'atmosfera) contenevano pochissimo ossigeno e il ferro poteva facilmente andare in soluzione. (Esso è pressoché insolubile in presenza di ossigeno.) Secondo Kirschvink, una copertura glaciale durata milioni di anni avrebbe privato totalmente gli oceani di ossigeno, sicché il ferro in soluzione espulso dalle sorgenti calde sottomarine si sarebbe accumulato nell'acqua. Quando l'effetto serra indotto dall'accumulo di anidride carbonica nell'atmosfera iniziò a fondere il ghiaccio, l'ossigeno andò nuovamente in soluzione negli oceani, costringendo il ferro a precipitare insieme con i detriti prima inglobati nei ghiacci marini e nei ghiacciai continentali.

Basandosi su questo scenario, Kenneth Caldeira del Lawrence Livermore National Laboratory e James F. Kasting della Pennsylvania State University valutarono per mezzo di un modello al computer che per vincere la glaciazione totale sarebbe stata necessaria una concentrazione di anidride carbonica pari a 350 volte l'attuale. Assumendo che i vulcani del Neoproterozoico immettessero gas nell'atmosfera agli stessi ritmi di oggi, il pianeta sarebbe rimasto in balia dei ghiacci forse per decine di milioni di anni prima che si accumulasse una quantità di anidride carbonica sufficiente a far iniziare la fusione dei ghiacci marini.

Kirschvink non era al corrente di alcuni nuovi risultati che avrebbero dato forte sostegno alla sua ipotesi della Terra a palla di neve. Il primo consiste nel fatto che i depositi glaciali neoproterozoici sono quasi ovunque ricoperti da rocce carbonatiche. Tali rocce si

formano di norma in mari caldi e poco profondi, come la zona delle Bahamas nell'attuale Oceano Atlantico. Se tra il ghiaccio e le acque calde vi fosse una soluzione di continuità di qualche milione di anni, nessuno sarebbe sorpreso. Ma la transizione da depositi glaciali a carbonati è improvvisa, e mancano indizi di un intervallo significativo tra l'epoca della deposizione dei detriti e quella della formazione dei carbonati. Insomma: un passaggio repentino quanto sconcertante da condizioni glaciali a condizioni tropicali.

Vagliando i dati delle nostre osservazioni sul campo in Namibia, ci siamo resi conto che non c'è alcun paradosso. Spesse sequenze di rocce carbonatiche sono la conseguenza prevedibile di condizioni «serra» estreme, come quelle che sole avrebbero potuto fare uscire la Terra da una situazione di gelo altrimenti irreversibile. Se la Terra andò effettivamente incontro a una

glaciazione totale, sarebbe occorsa una concentrazione ultraelevata di anidride carbonica per innalzare le temperature all'equatore fino al punto di fusione del ghiaccio. Una volta avviata la fusione, l'acqua degli oceani, di bassa albedo, sostituisce progressivamente i ghiacci di alta albedo, e il processo che ha condotto al congelamento totale è invertito. L'atmosfera «serra» contribuisce a innalzare le temperature superficiali fino ad almeno 50 gradi Celsius, secondo calcoli eseguiti lo scorso anno da Raymond T. Pierrehumbert dell'Università di Chicago. L'evaporazione, ora di nuovo possibile, contribuisce pure a riscaldare l'atmosfera, dato che il vapore acqueo è un potente gas-serra, e una maggiore riserva di umidità atmosferica comporta un'intensificazione del ciclo dell'acqua. Le piogge torrenziali sottraggono, sotto forma di acido carbonico, parte dell'anidride carbonica contenuta nell'atmo-

sfera. L'acido carbonico altera rapidamente i detriti rocciosi lasciati esposti dal ritiro dei ghiacciai. I prodotti dell'erosione chimica si accumulano nell'acqua dell'oceano, inducendo la precipitazione di sedimenti carbonatici, che rapidamente si stratificano sul fondo marino e poi si trasformano in roccia. Le strutture conservate nella copertura carbonatica della Namibia indicano come questa si sia accumulata in modo estremamente rapido, forse in poche migliaia di anni. Per esempio, vi si trovano cristalli di aragonite, in aggregazioni alte un paio di metri, che avrebbero potuto precipitare solo da acqua sovrassatura in carbonato di calcio.

Le coperture carbonatiche custodiscono una seconda serie di indizi a supporto dello scenario tratteggiato da Kirschvink. In esse infatti si osservano rapporti anomali di due isotopi del carbonio: il carbonio 12 e il più raro carbonio 13. Gli stessi rapporti si rilevano

EVOLUZIONE DI UNA TERRA A PALLA DI NEVE ...



La frammentazione di una singola massa continentale, 770 milioni di anni fa, lascia diversi piccoli continenti presso l'equatore. Le aree prima isolate da influenze oceaniche sono ora raggiunte da masse d'aria umida. L'aumento delle precipitazioni rimuove una maggiore quantità di anidride carbonica dall'atmosfera e accelera l'erosione delle rocce continentali. La temperatura globale diminuisce e vaste calotte glaciali si formano negli oceani polari. Il biancore dei ghiacci riflette più radiazione solare rispetto alle acque dell'oceano, riducendo ulteriormente la temperatura. Questo ciclo di retroazione innesca un raffreddamento inarrestabile che in un millennio racchiude il pianeta in una morsa di ghiaccio.

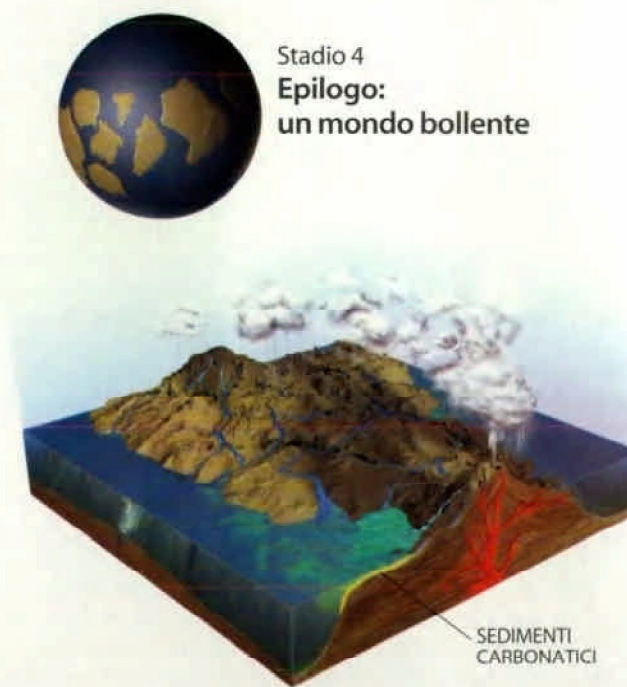


Le temperature medie globali piombano a -50 gradi Celsius poco dopo l'inizio del processo. L'oceano gela per uno spessore di circa un chilometro, e solo il calore che filtra dall'interno della Terra impedisce che il ghiaccio raggiunga il fondo marino. La maggior parte degli organismi marini muore, ma alcuni riescono a sopravvivere presso le sorgenti calde vulcaniche. Data la scarsa umidità dell'aria, si blocca la crescita dei ghiacciai terrestri e si creano vasti deserti sabbiosi. In mancanza di precipitazioni, l'anidride carbonica emessa dai vulcani non viene rimossa dall'atmosfera. Dato che l'anidride carbonica si accumula, il pianeta si scalda e i ghiacci marini iniziano lentamente a fondere.

... E IL SUCCESSIVO SURRISCALDAMENTO



Il livello di anidride carbonica nell'atmosfera aumenta di 1000 volte in seguito a circa 10 milioni di anni di normale attività vulcanica. L'effetto serra che ne deriva porta le temperature, nei pressi dell'equatore, al punto di fusione del ghiaccio. Via via che il pianeta si riscalda, l'umidità dei ghiacci marini che sublimano all'equatore riforma ghiaccio a quote maggiori e alimenta la crescita dei ghiacciai terrestri. I tratti di mare sgombro da ghiacci che si formano ai tropici assorbono una quantità maggiore di radiazione solare, e danno inizio a un più rapido incremento delle temperature globali. In pochi secoli, il gelo profondo lascia il campo a un mondo terribilmente caldo e umido.



Con lo scongelamento degli oceani tropicali, l'acqua di mare evapora e si unisce all'anidride carbonica nel produrre un effetto serra ancora più intenso. Le temperature superficiali arrivano anche a 50 gradi Celsius, generando un intenso ciclo di evaporazione e precipitazione. Piogge torrenziali, acidificate dall'anidride carbonica, erodono i detriti rocciosi lasciati dai ghiacciai nel loro ritiro. I fiumi rigonfi convogliano il bicarbonato e gli altri ioni nell'oceano, dove si formeranno grandi quantità di sedimenti carbonatici. Nuove forme di vita, generate dal prolungato isolamento genetico e dalla pressione selettiva, popolano la Terra via via che il clima globale si normalizza.

Tutti gli animali discendono dai primi eucarioti, cellule con nucleo dotato di membrana, apparsi circa due miliardi di anni fa. All'epoca del primo episodio di glaciazione totale della Terra, oltre un miliardo di anni più tardi, gli eucarioti non si erano evoluti al di là dei protozoi unicellulari e delle alghe filamentose. Ma, a dispetto del clima estremo, che avrebbe potuto «potare» l'albero degli eucarioti (*linee tratteggiate*), tutti gli 11 *phyla* di animali che hanno mai abitato la Terra emersero in un piccolo intervallo di tempo poco dopo l'ultima glaciazione totale. Il prolungato isolamento genetico e la pressione selettiva potrebbero essere responsabili di questa esplosione di nuove forme di vita.

nelle coperture carbonatiche di tutto il mondo, ma non si era mai pensato di interpretarle in termini di glaciazione totale. Con Alan Jay Kaufman, ora all'Università del Maryland, e lo specializzando Galen Pippa Halverson della Harvard University, abbiamo accertato che la variazione dei rapporti isotopici si mantiene per molte centinaia di chilometri di affioramenti rocciosi in Namibia settentrionale.

L'anidride carbonica vulcanica che va a finire negli oceani è costituita per l'1 per cento circa da carbonio 13; il rimanente è carbonio 12. Se la formazione delle rocce carbonatiche fosse stato l'unico processo in grado di rimuovere carbonio dagli oceani, allora la roccia dovrebbe presentare una percentuale di carbonio 13 identica a quella del gas vulcanico. Ma i tessuti molli delle alghe e dei batteri che vivono nell'acqua di mare usano pure il carbonio contenuto nel loro ambiente, e per la fotosintesi privilegiano il carbonio 12. Di conseguenza, il carbonio disponibile per costruire le rocce carbonatiche in un oceano ricco di forme di vita come quello odierno ha un rapporto tra l'isotopo 13 e l'isotopo 12 più alto rispetto al carbonio emesso dai vulcani.

Gli isotopi del carbonio nelle rocce neoproterozoiche della Namibia indicano una situazione diversa. Appena prima dei depositi glaciali, la quantità di carbonio 13 scende a livelli equivalenti a quelli «vulcanici», e noi riteniamo che questa caduta testimoni una diminuita produttività biologica, dovuta al fatto che i ghiacci avevano già ricoperto gli oceani alle alte latitudini, mentre la Terra si trovava ormai alla soglia di un raffreddamento globale. Una volta che gli oceani si fossero ghiacciati completamente, la produttività biologica sarebbe venuta meno del tutto, ma non esiste una documentazione di ciò nei carbonati, per il semplice fatto che il carbonato di calcio non può formarsi in un oceano coperto da ghiacci. Questa «caduta» del carbonio 13 persiste nella copertura carbonatica che sormonta gli strati di detrito glaciale, e quindi lascia il posto a livelli molto più elevati di carbonio 13 in strati parecchie centinaia di metri

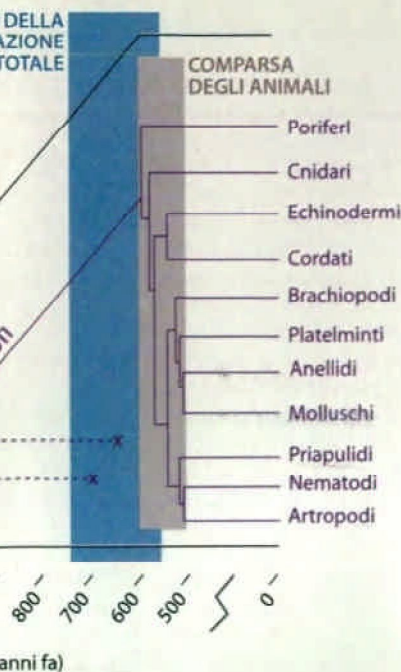
più alti nella sequenza. Questa risalita dei livelli di carbonio 13 corrisponde probabilmente a una ripresa della produttività biologica al termine del periodo di forte riscaldamento.

Una variazione dei rapporti isotopici del carbonio si presenta anche in rocce carbonatiche coeve ad altri episodi di estinzione di massa, ma nessuna ha l'entità e la durata di questa. Perfino l'impatto meteoritico che si presume abbia condotto all'estinzione dei dinosauri circa 65 milioni di anni fa non comportò un collasso così prolungato dell'attività biologica.

Nel complesso, l'ipotesi della glaciazione totale spiega molte osservazioni peculiari nella documentazione geologica del mondo neoproterozoico: le variazioni isotopiche del carbonio associate ai depositi glaciali, il paradosso della copertura carbonatica, gli indizi dell'esistenza di ghiacciai permanenti al livello del mare a latitudini tropicali e i depositi ferrosi a essi associati. La forza di questa ipotesi è nella sua capacità di spiegare simultaneamente tutte queste bizzarrie, per nessuna delle quali si è potuta trovare una buona spiegazione indipendente. E, quel che più conta, riteniamo che questa ipotesi possa gettare luce sulle prime fasi dell'evoluzione della vita animale.

Il ritorno della vita

Negli anni sessanta Martin J. S. Rudwick, lavorando con Brian Harland, ipotizzò che il recupero climatico seguito a una intensissima glaciazione neoproterozoica avesse spianato la via



Heidi Noland

a una diffusione esplosiva delle forme di vita pluricellulari. Gli eucarioti, organismi unicellulari con nucleo dotato di membrana da cui sarebbero discese tutte le forme di vita vegetale e animale, erano comparsi oltre un miliardo di anni prima, ma gli organismi più complessi presenti all'epoca della prima glaciazione neoproterozoica erano le alghe filamentose e i protozoi. È sempre rimasto un mistero perché sia occorso tanto tempo a questi organismi primitivi per diversificarsi negli 11 tipi di piano corporeo che appaiono improvvisamente nella documentazione fossile durante l'esplosione cambriana.

Una serie di eventi globali del tipo «dal freezer alla padella» avrebbe imposto un filtro ambientale all'evoluzione biologica. Tutti gli eucarioti esistenti deriverebbero quindi dai superstiti della catastrofe neoproterozoica. Si può avere un'idea dell'entità delle estinzioni degli eucarioti osservando gli «alberi genealogici» universali. Gli alberi filogenetici, in base al grado di somiglianza, indicano in che modo vari gruppi di organismi si siano evoluti l'uno nell'altro. I biologi definiscono questi alberi studiando le sequenze degli acidi nucleici negli organismi viventi.

La maggior parte di questi alberi mostra la filogenesi degli eucarioti come un'espansione ritardata che corona un lungo fusto privo di rami. La mancanza di una ramificazione precoce potrebbe significare che la maggior parte delle linee eucariotiche sia stata «potata» durante gli episodi glaciali. Gli organismi sopravvissuti potrebbero avere trovato rifugio presso sorgenti calde

sia sul fondo marino, sia in prossimità della superficie del ghiaccio, dove la fotosintesi poteva essere mantenuta.

I forti e variabili gradienti di temperatura e di chimismo tipici delle effimere sorgenti calde avrebbero preselezionato alcuni organismi a sopravvivere nelle condizioni infernali che presto si sarebbero instaurate. Messa a confronto con pressioni ambientali variabili, molti organismi rispondono con alterazioni genetiche «all'ingrosso». Una forte pressione evolutiva favorisce grandi cambiamenti genetici in tempi brevi, dato che gli organismi che possono più rapidamente alterare i propri geni avranno maggiori opportunità di acquisire caratteristiche tali da aiutarli a sopravvivere e a riprodursi.

Le comunità delle sorgenti calde, geograficamente disperse sulla superficie ghiacciata del globo, avrebbero accumulato diversità genetica per milioni di anni. Quando due gruppi con origine comune restano isolati a lungo l'uno dall'altro in condizioni molto differenti, è probabile che a un certo punto l'entità delle mutazioni genetiche sia tale da produrre una nuova specie. Il ripopolamento che si verifica dopo ogni glaciazione sarebbe il portato di pressioni selettive inusuali e variabili con rapidità, del tutto dissimili da quelle precedenti la glaciazione; tali condizioni favorirebbero l'emergere di nuove forme di vita.

Martin Rudwick potrebbe non essersi spinto abbastanza in là con la sua ipotesi secondo cui il miglioramento climatico seguito alla grande glaciazione neoproterozoica avrebbe spianato la strada per l'evoluzione delle forme di vita primordiali. Gli stessi eventi climatici estremi potrebbero avere svolto un ruolo attivo nella diffusione della vita animale pluricellulare.

Abbiamo mostrato come i depositi glaciali e le rocce carbonatiche riscontrabili in tutto il mondo in epoca neoproterozoica siano indizio di un tipo straordinario di evento climatico: una

glaciazione totale seguita da un più breve ma altrettanto tremendo periodo di riscaldamento estremo. Ma che cosa provocò queste calamità, e perché il mondo è stato risparmiato da eventi come questi in epoche più recenti? La prima possibilità da tenere presente è che il Sole fosse a quell'epoca più debole, del 6 per cento circa, rendendo la Terra più suscettibile di raffreddamento. Il lento e progressivo riscaldamento del Sole attraverso le ere geologiche potrebbe spiegare come mai una glaciazione così estrema non si sia più prodotta. Tuttavia non vi sono convincenti indizi geologici di una glaciazione simile nel miliardo di anni precedente



il Neoproterozoico, quando il Sole era ancora meno caldo.

L'insolita configurazione dei continenti in prossimità dell'equatore durante il Neoproterozoico potrebbe meglio spiegare l'evento di glaciazione totale (si veda l'illustrazione a pagina 84). Quando i continenti sono più vicini ai poli, come ai nostri giorni, l'anidride carbonica nell'atmosfera rimane in concentrazioni abbastanza alte da mantenere caldo il pianeta. Se le temperature globali scendono abbastanza da far sì che i ghiacciai ricoprano i continenti alle alte latitudini, come accade in Antartide e in Groenlandia, le coltri glaciali prevengono l'erosione chimica delle rocce coperte dal ghiaccio. Quando il processo di sottrazione del carbonio dall'atmosfera è parzialmente impedito in questo modo, l'ani-

dride carbonica si stabilizza a un livello abbastanza alto da impedire l'ulteriore avanzata delle coltri glaciali. Se tutti i continenti fossero raccolti ai tropici, d'altro canto, essi rimarrebbero liberi dai ghiacci anche se la Terra divenisse più fredda e si avvicinasse alla soglia di un raffreddamento incontrollato. L'interruttore di sicurezza rappresentato dall'anidride carbonica in questo caso non funzionerebbe, perché il carbonio continuerebbe a essere sottratto dall'atmosfera senza impedimento.

Forse non sapremo mai che cosa abbia effettivamente innescato il meccanismo della glaciazione totale, dato che disponiamo solo di teorie su ciò che è in grado di provocare cambiamenti climatici, anche per i tempi recenti. Ma dovremmo comunque essere consci della capacità del pianeta di subire cambiamenti climatici estremi. Negli ultimi milioni di anni della sua storia, la Terra ha avuto il suo periodo più freddo da quando sono apparsi gli animali, ma anche nel momento della massima avanzata delle coltri glaciali, circa 20 000 anni fa, è stata ben lontana dalla soglia critica necessaria per innescare un evento di glaciazione totale. Certamente, per le prossime centinaia di anni l'umanità avrà a che fare con un problema diverso: quello del riscaldamento globale indotto dalle emissioni di anidride carbonica dovute all'uso di combustibili fossili. Tuttavia non si può escludere che in un futuro più lontano il mondo sia destinato a condizioni di gelo estremo.

Restano ancora 80 000 anni al picco della prossima glaciazione, sicché la possibilità di prevedere il corso degli eventi è quanto mai remota. Comunque, se la tendenza dell'ultimo milione di anni dovesse proseguire, e se l'interruttore di sicurezza non funzionasse, la Terra potrebbe sperimentare una nuova catastrofe totale, tale da riorientare completamente l'evoluzione successiva delle forme di vita.

PAUL F. HOFFMAN e DANIEL P. SCHRAG, entrambi alla Harvard University, sono sostenitori dell'ipotesi della glaciazione totale neoproterozoica, altrimenti detta della «Terra a palla di neve». Hoffman è un geologo che ha per lungo tempo studiato le rocce precambriane: egli ha guidato la serie di spedizioni in Namibia che hanno fornito gli indizi della glaciazione totale. Schrag è un geochimico oceanografo che utilizza le variazioni chimiche e isotopiche delle scogliere coralline, dei sedimenti abissali e delle rocce carbonatiche per studiare le variazioni climatiche alle scale temporali più diverse: dai mesi ai milioni di anni.

LIPPS J. H. e SIGNOR P. W. (a cura), *Origin and Early Evolution of the Metazoa*, Plenum Publishing, 1992.

ERWIN D., VALENTINE J. e JABLONSKI D., *The Origin of Animal Body Plans* in «American Scientist», 85, n. 2, marzo-aprile 1997.

HOFFMAN P. F., KAUFMAN A. J., HALVERSON G. P. e SCHRAG D. P., *A Neoproterozoic Snowball Earth* in «Science», 281, pp. 1342-1346, 28 agosto 1998.

LEUTWYLER KRISTIN, *The First Ice Age*, pubblicato solo nel sito Internet di «Scientific American», all'indirizzo: www.sciam.com/2000/0100issue/0100hoffman.html