



diScienze

Nella stessa collana:

*Mucche allo stato ebraico*, di Riccardo Canesi

*La mentalità del principiante*, di Jonathan G. Koomey

*Le curve celebri*, di Luciano Cresci

*Rischio mercurio*, di Roberto Miniero

*Prima lezione sul colore*, di Mauro Boscarol

*Ripensare la scuola*, AA.VV.

*Storia del colore da Pitagora a Newton*, di Mauro Boscarol

*Litio*, di Michel Jébrak e Christian Hocquard

Jo Handelsman

# Un mondo senza suolo

Il passato, il presente e il futuro precario  
della terra sotto i nostri piedi

Ricerche e contenuti creativi di Kayla Cohen

TARKA

*A World Without Soil.*

*The past, present, and precarious future of the earth beneath our feet*

di Jo Handelsman

©2021 by Jo Handelsman

Originally published by Yale University Press

Traduzione di Virginio B. Sala

Tutti i diritti riservati

Prima edizione marzo 2025

© 2025 Tarka edizioni srl

Piazza Dante, 2 – 54026 Mulazzo (MS)

[www.tarka.it](http://www.tarka.it)

Impaginazione di Monica Sala

Finito di stampare nel mese di marzo 2025

presso Mediagraf SpA – Noventa Padovana (PD)

# Indice

Prefazione IX

Prologo 1

1. Una crisi invisibile 5
2. La materia oscura della Terra 13
3. Lavori in sotterranea 29
4. Dal caos all'ordine: un breve interludio 51
5. Vento, acqua e aratro 71
6. Un pianeta roccioso 111
7. Il duetto clima-suolo 145
8. Custodi del suolo 171
9. Eroi del suolo 197
10. Un mondo con il suolo 227

Ringraziamenti 251

Bibliografia selezionata 255

Indice analitico 267



*Per John Nagy, e tutti gli altri agricoltori*

*Nota all'edizione italiana*

La versione a colori delle tavole fuori testo al centro del libro è visibile e scaricabile in formato pdf all'indirizzo:

<http://www.tarka.it/tavole-a-colori-un-mondo-senza-suolo/>

oppure accedendo mediante il codice QR seguente:



# Prefazione

Ho scritto questo libro perché i problemi dei suoli del mondo costituiscono una crisi silenziosa. La maggior parte delle persone non è consapevole che il terreno sotto i nostri piedi svanisce a un ritmo allarmante. Quella cosa su cui tutti camminiamo, che chiamiamo “terra” e che esponiamo a grandi offese è a rischio. L’erosione del suolo destabilizza la produzione alimentare e la salute ambientale. Se il mondo agisce ora, possiamo amministrare il nostro suolo perché rimanga nel futuro e continui a produrre cibo per una popolazione che si espande e lo si possa utilizzare per seppellirvi carbonio, riducendo i gas serra e rallentando il cambiamento climatico.

Gli esseri umani, come specie, hanno la cattiva abitudine di aspettare troppo a sistemare le cose. Ignoriamo, discutiamo e mettiamo in dubbio finché non siamo sovrastati dal pericolo e in crisi. Una volta che decidiamo di agire, però, spesso escogitiamo soluzioni ingegnose e mettiamo in campo uno spirito collaborativo. La parte confortante della crisi del suolo, a differenza di molte altre che ci stanno di fronte, è che *possiamo risolverla*. Per esperienza sappiamo come praticare l’agricoltura in modi che conservino il suolo per millenni, anziché farlo dilavare nei fiumi e turbinare nell’atmosfera.

Il suolo non è solo una cosa utile. Ho scritto questo libro anche per condividere il fascino che esercitano su di me il suolo e la scienza che ne studia la genesi e la potenza. Amo i misteri del suolo e le sue caratteristiche entusiasmanti. Sono ipnotizzata dalla varietà dei

suoi odori, delle sue tessiture e dei suoi significati. E dal modo in cui ne spunta la vita, come un miracolo annuale. Ma non è un miracolo, è ancora meglio – è *scienza*. I molti modi in cui il suolo ci è di aiuto, fornendoci dal cibo a farmaci salvavita, danno energia al mio studio e nutrono il mio attaccamento a esso.

C'è ancora tempo per salvare questa risorsa preziosa. Quando avrete letto questo libro, spero siate stimolati a intraprendere le azioni necessarie per salvare il nostro suolo.

# Prologo

Caro Presidente,

le scrivo per avvertirla di una crisi emergente che minaccia il suolo di tutti gli Stati Uniti e delle civiltà di tutto il pianeta. Sì, parliamo del suolo – lo chiamiamo anche *dirt* in inglese, *suelo* in spagnolo, *Łeezh* in navajo, *adama* in ebraico, *talaj* in ungherese e *udongo* in swahili.

Lo strato superiore del suolo fertile, da cui dipende ogni forma di vita, si sta rapidamente erodendo. Il suolo è il prodotto di millenni di forze fisiche che agiscono sulla crosta della Terra. Materiale geologico dilavato si mescola con le sostanze chimiche liberate da piante, animali e microrganismi, morti e viventi. Questi sono i materiali base del suolo. L'acqua vi percola attraverso, l'aria riempie le sacche vuote, le piante vi penetrano, gli animali vi scavano e i microbi mantengono attivi i cicli dei nutrienti. Nell'arco di migliaia di anni, il suolo viene arricchito e diventa più profondo grazie a quei processi, che producono il fertile topsoil da cui dipende il 95 per cento della nostra produzione alimentare<sup>1</sup>.

L'impatto profondo del suolo si estende ben oltre l'agricoltura. Tutti gli organismi ne dipendono per avere acqua pulita: in effetti, il suolo è il più grande filtro dell'acqua sulla Terra. È anche il più grande deposito terrestre per il carbonio: ne contiene tre volte la quantità presente nell'atmosfera del pianeta e quattro volte tutta quella contenuta in tutte le piante messe insieme, il che ne fa un potente strumento di mitigazione per il cambiamento climatico<sup>2</sup>.

Poiché è l'habitat biologicamente più vario sulla Terra, contiene microrganismi che sono la fonte di farmaci utilizzati nella medicina tradizionale e moderna. Come sostanza dalle complesse proprietà fisiche, finisce a formare mattoni, pavimentazioni stradali e ceramiche.

In tutto il mondo, il suolo è minacciato. La sua erosione e il suo degrado, già rapidi, probabilmente accelereranno, con il previsto aumento della frequenza di nubifragi generati da un clima che si va riscaldando. Gli Stati Uniti e molti altri paesi stanno erodendo il suolo da una a cento volte più rapidamente rispetto alla velocità con cui si produce. In base ad alcune stime, gli Stati Uniti perderanno così tanto del loro suolo sui terreni agricoli in pendenza che per la fine del XXI secolo le rese dei raccolti saranno gravemente compromesse. Alcune regioni presto diventeranno aride. In effetti, le fotografie aeree delle terre coltivate dello Iowa mostrano frequenti zone in cui il sottosuolo roccioso già spunta attraverso la superficie<sup>3</sup>.

La storia offre un lungo elenco di civiltà arrivate al collasso a causa dell'erosione del suolo. Il numero degli abitanti dell'Isola di Pasqua è diminuito da 14.000 a 2.000 dopo che il suolo è stato eroso dai fianchi molto inclinati delle montagne ed è finito nell'oceano, lasciando l'isola senza capacità di produzione agricola<sup>4</sup>. Esempi simili di comunità che hanno lavorato eccessivamente il loro suolo, che poi ha subito l'erosione e ha perso la capacità di produrre alimenti, abbondano in Cina, in Africa e negli Stati Uniti. Vi sono ampie evidenze che indicano come grandi tratti del terreno agricolo degli Stati Uniti stiano seguendo la medesima traiettoria. La tendenza attuale non è sostenibile. Se continuerà, perderemo abbastanza suolo da creare difficoltà senza precedenti per la produzione alimentare.

C'è di buono che abbiamo conoscenze sufficienti per ridurre o addirittura porre fine all'erosione del suolo con costi di breve termine relativamente contenuti e risparmi di lungo termine, invece, sostanziali. Coltivazioni *no-till*, uso di coltivazioni di copertura e

la coltura consociata con piante di prateria dalle radici profonde costituiscono il trio di pratiche agricole consolidate che possono prevenire l'erosione e ricostituire la salute del suolo. Questi metodi agricoli migliorerebbero l'accumulo di carbonio nel suolo, riducendo in tal modo i gas climalteranti. Nei colloqui sul clima di Parigi del 2015, è stata avanzata una proposta di aumentare il carbonio nel suolo dello 0,4 per cento a livello mondiale annualmente; anche se l'obiettivo è ambizioso, se lo si raggiungesse, verrebbe sequestrata una quantità di carbonio sufficiente a compensare il previsto aumento delle emissioni di carbonio e a mantenere il carbonio atmosferico ai livelli attuali<sup>5</sup>.

Sono molte le politiche che la sua amministrazione potrebbe implementare per incoraggiare gli agricoltori ad adottare pratiche in grado di proteggere il suolo e di arricchire il contenuto di carbonio del suolo, dal modificare come vengono calcolate le assicurazioni sui raccolti al ripristinare la responsabilità della conservazione del suolo per gli agricoltori che ricevono incentivi. L'amministrazione potrebbe spingere i consumatori a partecipare a un movimento per un'etichetta "sicuro per il suolo" per gli alimenti e stringere partenariati con agricoltori, gruppi ambientalisti, aziende del settore agrochimico, rivenditori di alimentari e popoli indigeni per sviluppare criteri di certificazione.

Le presento un problema difficile, ma a cui si può porre rapidamente rimedio. Tutto quello di cui c'è bisogno è la volontà, e non dobbiamo farla mancare, altrimenti la civiltà come la conosciamo sarà insostenibile.

*Jo Handelsman*  
*Associate Director*  
*Office of Science and Technology Policy, 2016*

Questo è il promemoria che vorrei avere inviato al presidente Obama. Il resto di questo libro è il mio promemoria per tutti voi.

## Note

- 1 FAO, *Healthy Soils Are the Basis for Healthy Food Production*, FAO, Roma 2015.
- 2 D.A.N. Ussiri, Rattan Lal, *Carbon Sequestration for Climate Change Mitigation and Adaptation*, Springer International, Cham 2017, pp. 80, 86.
- 3 FAO e ITPS, *Status of the World's Soil Resources: Main Report*, FAO, Roma 2015, pp. 101-103; R. Amundson et al., "Soil and Human Security in the 21st Century", in *Science*, 348, 2015, p. 1261071; D. R. Montgomery, "Soil Erosion and Agricultural Sustainability", in *PNAS*, 104, 2014, pp. 13268-13272; S. W. Trimble, *Man-Induced Soil Erosion on the Southern Piedmont, 1700-1970*, Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa 2008; R. Cruse et al., "Daily Estimates of Rainfall, Water runoff, and Soil Erosion in Iowa", in *Journal of Soil and Water Conservation*, 61, 2006, p. 191, tavola 6; E.A. Thaler, I.J. Larsen, Q. Yu, "The Extent of Soil Loss Across the US Corn Belt", in *PNAS*, 118, 2021, p. e1922375118.
- 4 Montgomery, "Soil Erosion", *cit.*
- 5 "Welcome to the '4 per 1000' Initiative", 4 per 1000, <https://www.4p1000.org>.

# I. Una crisi invisibile



*Come ho fatto a non accorgermene?* Era la domanda che mi assillava mentre camminavo avanti e indietro per il mio ufficio alla Casa Bianca nel 2015. Eccomi lì, consigliere scientifico del presidente Barack Obama e scienziata del suolo da trentacinque anni, e in qualche modo mi era sfuggito il fatto che fossimo di fronte a una crisi. Scomparendo molto più rapidamente rispetto alla velocità con cui veniva ricostituito, il suolo degli Stati Uniti poteva effettivamente esaurirsi.

Facciamo un passo indietro. Due anni prima, avevo ricevuto una telefonata da John Holdren, primo consigliere scientifico del presidente Obama e direttore dello Office of Science and Technology Policy, che mi chiedeva di andare alla Casa Bianca per guidare la Divisione scientifica dell'ufficio; inizialmente avevo detto di no, riluttante a lasciare il mio attivissimo laboratorio di ricerca alla Yale University, dove i miei studenti, laureati e dottorandi studiavano le comunità microbiche nello stomaco degli insetti, nel suolo e

sulle piante. Ma l'intelligenza di John e il profondo impegno del presidente verso la scienza mi hanno convinta. Dopo il normale ma estenuante controllo dei miei precedenti da parte dell'FBI, un corso rapido su come rispondere alle domande dei senatori, un'udienza di conferma sorprendentemente divertente davanti alla Commissione senatoriale per il commercio, la scienza e i trasporti, e l'attesa di nove mesi del voto, alla fine sono stata confermata dal Senato e ho prestato giuramento come "associate director for science".

Il giorno del giuramento, mi sono trasferita nel maestoso ufficio nell'Eisenhower Executive Office Building, dove lavorano quasi un migliaio di persone dello staff, a fianco della Casa Bianca. Ho scoperto presto che dovevo gestire i sedici acri del complesso della Casa Bianca. Dato che raramente davo la buonanotte agli amichevoli agenti del Servizio segreto e superavo le porte di sicurezza prima che facesse buio, la rigogliosa bellezza di quei sedici acri è diventata il mio contatto con la natura, in sostituzione delle ricerche sul campo e del giardinaggio che mi avevano accompagnato per tutta la mia vita adulta. Gli ampi giardini erano il contesto per le parate militari formali del presidente con i leader di altri paesi, le sue passeggiate *dobbiamo-discutere-un-problema-serio* con il suo capo dello staff e l'improvvisata corsa in slitta con le First Daughter durante una tempesta di neve che ha bloccato Washington. Quegli spazi sono diventati la mia connessione con la terra e la storia. Mentre correvo da una riunione all'altra, pensavo alle migliaia di persone dello staff della Casa Bianca che avevano percorso quegli stessi sentieri – forse c'erano addirittura molecole dei passati presidenti che volteggiavano intorno a me. Sentivo l'odore della terra ricca e del compost mentre superavo gli orti della First Lady – il mio staff faceva a gara per avere il privilegio di ripulirlo dalle erbacce. Godevo della colorata e ordinata pulizia dei giardini fioriti, senza mai vedere una pianta malata. E scuotevo ammirata il capo davanti ai perfetti cespugli di rose che orlavano il colonnato della Casa Bianca ed erano testimoni dei miei momenti preferiti

(scortare il presidente dallo Studio ovale a qualche evento nella East Room).

Mentre mi adattavo alla mia nuova posizione, le pareti del mio ufficio si riempivano di immagini di satelliti, telescopi, microbi e del presidente – promemoria dei progetti che riempivano le mie giornate. Il mio compito era servire il popolo americano con politiche basate sulla scienza che rafforzassero l'impresa della ricerca e migliorassero il mondo. In pratica, le responsabilità della mia divisione andavano dal consigliare il presidente e lo Office of Management and Budget sul budget annuale per la scienza, a sovrintendere la gestione dei principali strumenti scientifici, come telescopi e supercollisori. Venivano a trovarmi centinaia di scienziati che mi portavano le loro idee su quello che si sarebbe dovuto fare per rafforzare la scienza e le sue applicazioni. Andavo all'estero per discutere di iniziative internazionali a sostegno di grandi progetti scientifici, e guidavo varie delegazioni degli Stati Uniti agli incontri dei ministri per la scienza del G7, del G20 e dell'Unione Europea. Durante un viaggio in Giappone, ho guidato futuristici veicoli elettrici e ho avuto conversazioni con robot, ma il momento davvero emozionante (e terrificante) è stato quando il ministro che presiedeva la riunione si è rivolto verso di me e ha chiesto: "E che cosa ne pensano gli Stati Uniti?". Stava a *me* trasmettere agli altri paesi la posizione della Casa Bianca.

Lavorare all'interno dell'amministrazione Obama era entusiasmante. Ho appreso delle ricerche per individuare le particelle più piccole della materia e di quelle per scoprire nuove galassie in parti lontane dell'universo, della ricerca di vaccini universali contro le malattie virali, e della missione per salvare la Venere acchiappamosche (*Dionaea muscipula*). Le gratificazioni erano fantastiche. Ho visto il presidente annunciare, nel discorso del 2015 sullo Stato dell'Unione, l'intenzione di implementare l'iniziativa per la medicina di precisione che avevo sviluppato con i colleghi dell'OSTP e di varie agenzie federali. Grazie allo straordinario staff legislativo della Casa Bianca e a un profondo impegno del Congresso per la

salute umana, alla fine l'iniziativa è stata finanziata con una legge che è stata approvata dal Senato con 92 voti favorevoli e 8 contrari – più bipartisan di così non si può.

Ci sono stati anche momenti di tragedia e disperazione, come quando abbiamo saputo delle epidemie di Ebola e Zika, ma c'era sempre speranza: in fin dei conti, eravamo il governo degli Stati Uniti d'America, e saremmo stati in grado di contribuire ad alleviare le sofferenze e a evitare le morti, no? Quando è iniziata l'epidemia di Ebola nell'Africa Occidentale, il presidente ha messo bene in chiaro che voleva che venisse fermata. E in fretta. Per molti mesi ho partecipato a riunioni nella Situation Room; ho visto ammirata l'esercito degli Stati Uniti costruire unità di trattamento in tutta la Liberia in tre settimane; ho avuto discussioni con lo staff di 26 agenzie federali; ho assistito agli sforzi monumentali dello staff legislativo del presidente Obama per ottenere dal Congresso il sostegno finanziario; ho fatto qualche errore, ho avuto discussioni accese, ho avuto la peggio in qualche lotta di potere; e ho incontrato i coraggiosi operatori sanitari che hanno salvato migliaia di vite. Poi, un giorno, la Liberia è stata dichiarata libera dall'Ebola. Ero molto orgogliosa di essere una parte, per quanto minuscola, del governo degli Stati Uniti che lo aveva reso possibile.

Quando non dovevo rispondere alle crisi, alle richieste del presidente e alle esigenze della diplomazia della scienza, seguivo il mio programma scientifico. Un obiettivo fondamentale era aumentare la redditività e la sostenibilità delle risorse alimentari del paese. La mia carriera nelle scienze agrarie mi aveva fatto capire che il cambiamento climatico e le congiunture economiche stavano creando nuove pressioni, a volte insostenibili, sugli agricoltori americani. Particolarmente acute erano due esigenze dell'impresa agricola. La prima era l'esigenza di un maggior numero di esperti nella selezione delle piante, una categoria di scienziati in via di estinzione da cui dipendiamo per migliorare la produzione dei raccolti mediante selezione genetica. La seconda era l'esigenza di migliorare la qualità del suolo utilizzato nella produzione dei raccolti. La prima sfida

comportava un'estensione della formazione; la seconda, pensavo, avrebbe richiesto un'iniziativa di ricerca.

Mentre andavo a rinfrescare le mie conoscenze sulla scienza moderna dei suoli, però, ho scoperto uno iato fra ricerca e pratica. Gran parte di quello che negli ultimi decenni la scienza del suolo ha capito, a proposito del miglioramento della qualità dei suoli, non veniva implementato in due terzi dei campi degli Stati Uniti, il che portava a un problema insidioso: il suolo della nostra nazione stava scomparendo. Portate via da vento e acqua, flottiglie di suolo, anche se in gran parte invisibili, venivano trasportate per tutti gli Stati Uniti. L'erosione del suolo era particolarmente grave negli stati del Midwest, Minnesota, Iowa, Kansas, Arkansas, Missouri e Illinois, dove ogni anno tonnellate di topsoil finivano nel Mississippi e arrivavano fino al Golfo del Messico<sup>1</sup>.

È stata una sorpresa. Avevo studiato scienza del suolo negli anni Settanta e avevo seguito le tendenze nell'erosione del suolo fino al 1985, quando il Congresso ha approvato il National Food Security Act, che ha avviato un grande sforzo di conservazione del suolo gestito dal Natural Resources Conservation Service (NRCS) del Dipartimento dell'Agricoltura. Sapevo che negli anni successivi erano stati fatti molti passi avanti nel ridurre l'erosione del suolo, grazie all'impegno dello NRCS. In seguito, le mie ricerche si erano concentrate sulla microbiologia del suolo e avevo perso di vista le tendenze nazionali, dando per scontato che il problema dell'erosione fosse stato risolto.

Quello che mi era completamente sfuggito era che, dopo il 1985, il Congresso aveva indebolito varie volte il senso della legge, al punto che lo NRCS non aveva più molto potere per richiamare gli agricoltori alla responsabilità per la protezione del suolo. Arrivati al 1992, i passi avanti per la riduzione dell'erosione del suolo erano rallentati considerevolmente. Oggi, gli Stati Uniti perdono suolo da dieci a cento volte più rapidamente rispetto al ritmo della sua produzione. La situazione internazionale è anche peggiore.

Sono rimasta sconvolta da quello che ho scoperto nelle ricerche pubblicate sull'erosione del suolo, e quello che ho appreso conversando con noti scienziati del suolo non solo ha confermato i miei timori, ma mi ha fatto capire che la realtà era anche peggiore di quanto facessero pensare molti studi. Utilizzando dati del Dipartimento dell'Agricoltura degli USA (USDA), il mio staff e io abbiamo creato proiezioni che mostravano quanto la situazione fosse tragica: grandi tratti dei terreni agricoli del Midwest potrebbero perdere completamente il topsoil nell'arco del secolo. Tenendo conto dell'aumento di precipitazioni intense previsto dai modelli del cambiamento climatico, la velocità dell'erosione del suolo accelerava considerevolmente. Rick Cruse, agronomo della Iowa State University, ci ha fatto avere una fotografia aerea in cui si vedevano molti punti in cui il topsoil era scomparso, esponendo agli elementi il subsoil.

Per mesi ho rifatto i calcoli, verificato i dati, letto altri studi scientifici e consultato altri esperti. Solo quando sono entrata a fondo negli aspetti scientifici ho ammesso che la parola "tragico" non era un'iperbole. Questa tendenza all'erosione del suolo potrebbe ridurre l'abbondante produzione alimentare dell'America nel giro di decenni, e una perdita analogamente rapida di suolo in India, Cina e Africa potrebbe dare il via a una crisi alimentare internazionale.

Camminando su e giù per il mio ufficio, costernata per la mia precedente ignoranza, ho riflettuto su che cosa fare. Dovevo dirlo al presidente. Come potevo essere una consulente responsabile e tenergli nascosta quella catastrofe? Salvare il suolo dell'America poteva diventare un'eredità dell'amministrazione Obama.

Qualsiasi processo per informare il presidente inizia con un memorandum. La maggior parte dei miei memorandum precedenti gli erano arrivati, e alcuni erano stati seguiti da un incontro nello Studio ovale per valutare i passi successivi, perciò ero ottimista che anche quello sarebbe stato ricevuto dal presidente Obama, sarebbe stato discusso e avrebbe avuto come risultato un'iniziativa

presidenziale per la conservazione del suolo. Dopo avere aspettato per oltre un anno, però, alla fine mi è stato detto che semplicemente era troppo tardi, rispetto alla scadenza del mandato presidenziale, per avviare un'altra iniziativa importante. Continua a essere il mio maggiore rimpianto non essere mai riuscita a fargli arrivare quel memorandum, ma posso ancora fare qualcosa scrivendo questo libro per informare di questa crisi le persone di tutto il mondo.

La crisi del suolo è reale, si avvicina rapidamente e alla fine influirà su ogni essere vivente sulla Terra. L'erosione avanza a velocità diverse nelle varie parti del pianeta ma, come un virus che si diffonde, non discrimina, né colpisce solo chi la sperimenta da vicino. La perdita di suolo influirà sull'accesso a cibo e farmaci e contribuirà a modificare il clima della Terra. Distruggerà alcuni habitat e ne amplierà altri, e modificherà la distribuzione delle specie, provocando l'estinzione di alcune e la maggiore diffusione di altre. L'erosione del suolo però può essere fermata, e rapidamente. Gli esseri umani dovrebbero essere motivati dalla speranza e dalla possibilità di agire che sono intrinseci a una crisi che possiamo cancellare. Vediamo di capire meglio, in modo da poter agire con una finalità unitaria.

## Note

- 1 USDA, Summary Report: 2012 National Resources Inventory, Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C., e Center for Survey Statistics and Methodology, Ames, Iowa 2015; Jesse Newman, Renée Rigdon, Patrick McGroarty, "The World's Appetite Is Threatening the Mississippi River", in *Wall Street Journal*, 2 luglio 2019, <http://graphics.wsj.com/mississippi/>.



## 2. La materia oscura della Terra



Non è un caso che abbiamo chiamato il nostro pianeta “Terra”, che è anche un sinonimo di “suolo”. Nel nostro mondo c’è molto più che non la sua sola superficie, ma quella sottile pellicola marrone di minerali e biomolecole è una caratteristica che lo definisce, unica all’interno dell’universo noto, e degna di dare il nome al nostro pianeta. Se così è, vale la pena raccontare la storia del suolo dall’inizio.

La Terra si è formata molto prima che fosse presente qualsiasi terra (suolo). La teoria del Big Bang è la migliore approssimazione che abbiamo su come sia iniziato l’universo e, per estensione, come si sia formato il nostro pianeta. La teoria dice che all’inizio tutta la materia e l’energia dell’universo erano compresse in un punto infinitesimamente minuscolo, esploso 13,7 miliardi di anni fa, in un evento che ora chiamiamo Big Bang. Nei suoi primi istanti l’universo era piccolo, denso e tanto caldo che era impossibile si potessero formare particelle. Quando la temperatura dell’universo ha iniziato a diminuire, dapprima si sono formati quark ed elettro-

ni, seguiti dal più semplice fra i 118 elementi: atomi di idrogeno, costituiti da un protone e un elettrone. Quando la temperatura è scesa sotto 1 miliardo di gradi, i nuclei di idrogeno si sono fusi, creando elio. L'ulteriore raffreddamento ha portato a nubi giganti di gas idrogeno ed elio, chiamate nebulose, e, nelle loro profondità, si sono formate le prime galassie di stelle.

I sistemi planetari maturano nell'arco di milioni di anni, mentre i campi gravitazionali e magnetici fanno collassare le nebulose in protostelle, che poi accumulano dischi di frammenti cosmici che ruotano e si scontrano formando rocce, protopianeti e alla fine pianeti. Nel nostro sistema solare, uno degli otto pianeti è diventato la Terra, circa 4,55 miliardi di anni fa. Si trovano minerali che risalgono a 4,4 miliardi di anni fa all'interno di rocce di granito, la cui formazione richiede acqua, perciò i geologi ne deducono che già 150 milioni di anni dopo la formazione della Terra erano presenti rocce e acqua<sup>1</sup>. Acqua e rocce sono due ingredienti fondamentali del suolo; il terzo è la vita.

La documentazione fossile e delle rocce colloca l'origine della vita sulla Terra in un punto fra 3,95 e 3,48 miliardi di anni fa, ma potrebbe essere ancora precedente<sup>2</sup>. La vita può essere definita come un sistema chimico che si autosostenta ed è in grado di modificarsi. I primi sistemi chimici che assomigliavano alla vita sulla Terra probabilmente erano molecole di RNA (singoli filamenti di nucleotidi, strettamente apparentati al DNA) in grado di autoreplicarsi, seguiti da semplici organismi unicellulari, gli antenati di batteri e archei – due dei tre domini della vita. Quelle prime forme unicellulari probabilmente hanno avuto origine nei camini idrotermali ad altissima temperatura sul fondo marino. Il processo grazie al quale si sono formate rimane un mistero.

Non appena è emersa, la vita ha iniziato a modificarsi, grazie a processi come l'evoluzione per selezione naturale. Le popolazioni contengono individui con piccole differenze genetiche. Se una variante di un gene offre un vantaggio che aumenta la probabilità

che un individuo sopravviva e si riproduca, quella variante diventa prevalente e le varianti meno adatte declinano.

Il processo del cambiamento era bidirezionale: l'ambiente agiva da pressione selettiva sulla vita e le forme viventi modificavano il loro ambiente trasformando la chimica e l'atmosfera della Terra. Entrambi i processi sono proseguiti per oltre 3 miliardi di anni. L'esempio di gran lunga più importante di come le forme viventi abbiano trasformato la Terra è stata la produzione di ossigeno da parte dei cianobatteri, che ha portato al Grande Evento Ossidativo di 2,45 miliardi di anni fa<sup>3</sup>. Quei batteri fotosintetici utilizzavano l'energia del Sole per estrarre carbonio dall'anidride carbonica atmosferica, liberando ossigeno come prodotto di scarto. Non appena gli oceani e i minerali in essi presenti si sono saturati di ossigeno, questo si è andato accumulando nell'aria. I cianobatteri si sono sempre più diffusi ed è sempre più aumentato l'ossigeno liberato, fino a raggiungere livelli di concentrazione nell'atmosfera sufficienti a sostenere forme di vita basate sulla respirazione. Esempio particolarmente evidente di evoluzione per selezione naturale, molte specie anaerobiche, che non erano in grado di sopportare l'ossigeno, si sono estinte, lasciando il palcoscenico a forme capaci invece di metabolizzarlo. Oggi quasi tutti gli organismi complessi hanno bisogno dell'ossigeno, il che dimostra quanto siano stati influenti i microbi, che hanno avuto un impatto sul metabolismo di milioni di specie nel corso dell'evoluzione.

I cianobatteri sono stati responsabili anche di un altro cambiamento notevole, questa volta nella stratosfera. Accumulatosi nell'atmosfera, l'ossigeno si è diffuso nella stratosfera, dove la sua concentrazione è diventata sufficiente a determinare la formazione dello strato di ozono. L'ozono si forma quando la luce ultravioletta proveniente dal Sole divide le molecole di  $O_2$  in singoli atomi di ossigeno. Se uno di questi atomi entra in collisione con una molecola di  $O_2$ , si può avere la formazione di ozono ( $O_3$ ). Quando se ne forma una quantità sufficiente, crea un filtro che assorbe una parte dei raggi ultravioletti del Sole, sufficiente per proteggere la

vita sulla Terra da quella radiazione mortale. Questi eventi hanno preparato la scena perché piante, animali e forme microbiche di vita si diversificassero e migrassero sulla terraferma, ponendo le basi per il suolo.

\* \* \*

Come sappiamo quello che è accaduto miliardi di anni fa? Una delle parti affascinanti della scienza è il modo in cui abbiamo appreso quello che ora sappiamo. Ho iniziato praticando la scienza secondo un paradigma sperimentale: manipoliamo variabili, conduciamo esperimenti e ne osserviamo gli esiti. Se variamo la temperatura, che cosa faranno i batteri? Se eliminiamo un gene, come funzionerà la pianta? Se somministriamo questo farmaco, il paziente si riprenderà? Tutti gli esperimenti contengono controlli che forniscono una linea di base per il confronto, in modo da poter misurare l'impatto della variabile manipolata. Tutti gli esperimenti poi vengono replicati: non utilizziamo i risultati di un batterio, di una pianta o di una persona, ma raccogliamo molti risultati per stabilire in che misura l'effetto che ci interessa varia fra gli individui o anche per lo stesso individuo in giorni diversi. Gli esperimenti replicati con controlli facevano parte della mia definizione di scienza: gli eventi dovevano essere controllati e ripetibili, per essere significativi. Così, quando ho iniziato a studiare la formazione della Terra e del suo suolo, sono rimasta perplessa davanti al problema di avere una sola Terra. Una sola Terra significa che le repliche non sono possibili. Tutta la sua formazione, poi, era nel passato, il che significava che non erano possibili esperimenti per vedere se, in condizioni diverse, la Terra si sarebbe formata nello stesso modo. Gli scienziati che studiano eventi del lontano passato non possono replicare gli esperimenti, e nemmeno possono condurre esperimenti del tipo che svolgo nel mio laboratorio di microbiologia. La scienza della planetologia comporta un modo del tutto diverso di conoscenza.

Ho finito per ammirare il tipo di riflessione e di inferenza che sono coinvolti nella costruzione di un quadro della Terra primitiva e delle forze che l'hanno creata. Prendiamo come esempio stabilire quando i primi due ingredienti del suolo, rocce e acqua, sono comparsi sulla Terra. Il geologo John Valley dell'Università del Wisconsin a Madison ha rivoluzionato il suo campo e ha riscritto i manuali, quando ha scoperto le prove che la Terra si è raffreddata drasticamente 4,4 miliardi di anni fa, facendo arretrare di oltre 400 milioni di anni le stime della formazione della crosta continentale e della comparsa degli oceani.

Valley aveva quattro anni quando ha iniziato ad affrontare le cave di granito del Maine meridionale con un piccolo martello e un atteggiamento determinato che faceva ridere suo padre. Ogni estate viaggiavano da Boston alle cave del Maine, dove il piccolo John poteva andare alla ricerca di cristalli e, se aveva fortuna, di gemme. A distanza di decenni, ama ancora le rocce. Da geologo, Valley dice di non avere mai lavorato un solo giorno nella sua vita, che è un modo per dire che non andrà mai in pensione.

John Valley studia lo zirconio, un minerale che utilizza come orologio della Terra. Gli zirconi sono fatti di silicato di zirconio (zirconio, silicio e ossigeno). I tre elementi e il processo di cristallizzazione sono comuni, perciò gli zirconi abbondano nella crosta terrestre. Una volta che si formano, rimangono; anche sottoposti a calore e pressione estremi rimangono intatti. Anche quando la roccia che li ospita viene frammentata e fusa a temperature elevate, la chimica degli zirconi rimane intatta. Non è però il silicato di zirconio che conserva tracce della storia della Terra; le evidenze derivano invece dall'inclinazione della molecola a catturare *altri* elementi. Questa caratteristica permette agli scienziati di datare la formazione del minerale. Quando si formano, gli zirconi possono intrappolare atomi di uranio radioattivo. Con il tempo, gli atomi di uranio decadono e formano un elemento di dimensioni atomiche maggiori, il piombo. Poiché gli atomi di piombo sono troppo grandi per essere intrappolati durante la formazione inizia-

le dello zirconio, appaiono all'interno dei cristalli di zirconio solo se derivano dal decadimento dell'uranio. La velocità del decadimento radioattivo è nota, perciò è un calcolo semplice convertire il rapporto fra uranio e piombo in un intervallo temporale, dove il contenuto di uranio puro indica i cristalli più giovani e quantità elevate di piombo invece indicano quelli più antichi. Utilizzando questo metodo, Valley e i suoi colleghi hanno datato alcuni zirconi molto antichi e hanno scoperto che si sono formati 4,4 miliardi di anni fa<sup>4</sup>.

Questo per la roccia. Il secondo componente del suolo è l'acqua. Quando sono apparsi i primi oceani (i più antichi corpi d'acqua della Terra)? Per inferire le condizioni che hanno reso possibile la formazione degli antichi zirconi, il gruppo di Valley si è basato sugli isotopi, varianti di un elemento con un diverso numero di neutroni nel nucleo. In questo caso, Valley era interessato all'isotopo <sup>18</sup>O, che ha nel nucleo due neutroni in più rispetto alla maggior parte dell'ossigeno, <sup>16</sup>O. Entrambi, <sup>18</sup>O e <sup>16</sup>O, sono stabili nel tempo, il che significa che non decadono formando altri isotopi. Il rapporto fra <sup>18</sup>O e <sup>16</sup>O nello zirconio è determinato dalla temperatura a cui si forma il cristallo e, per gli zirconi di Valley, una maggiore quantità di <sup>18</sup>O indica temperature più basse. Il rapporto fra gli isotopi funge quindi da termometro e costituisce una documentazione permanente del valore di temperatura. Valley ha scoperto che il rapporto fra <sup>18</sup>O e <sup>16</sup>O era molto elevato negli zirconi vecchi di 4,0-4,4 miliardi di anni, il che indica che si sono formati da rocce alterate a temperature relativamente basse (probabilmente nel suolo) e poi sepolti e fusi a temperature elevate a formare gli zirconi. In effetti, l'erosione dovuta agli agenti atmosferici è avvenuta a temperature abbastanza basse perché l'acqua fosse liquida, il che colloca la comparsa degli oceani a 400 milioni di anni prima di quel che in genere si pensava<sup>5</sup>. Non è stupefacente questa serie di deduzioni derivata da granelli di zirconio in una manciata di rocce?

Alla tenera età di soli 150 milioni di anni, la Terra primitiva possedeva due dei tre ingredienti per il suolo: rocce e acqua. L'ultimo ingrediente mancante era la vita.

Dal 2005, John Valley ha applicato i suoi potenti strumenti e la sua profonda intuizione a collocare nel tempo l'origine della vita, utilizzando microfossili. Fino al 1992, gli scienziati potevano solo congetturare che la vita avesse circa due miliardi di anni, perché non esisteva alcun metodo per rintracciarla direttamente<sup>6</sup>. Poi il paleobiologo J. William Schopf ha scoperto quella che riteneva fosse la prova più antica della vita sulla Terra, all'interno di antiche rocce nell'Australia occidentale. Molti però erano scettici nei confronti delle sue affermazioni, perché si basavano esclusivamente sull'analisi visuale di microfossili. Com'era possibile che una cosa tanto importante come l'origine della vita venisse decisa da dettagli di forma, colore e struttura? Le osservazioni morfologiche erano importanti, ma non abbastanza da escludere l'ipotesi che quelle macchie fossero minerali non biologici.

Per dieci anni, Valley ha cercato di persuadere Schopf a condividere i preziosi microfossili che aveva trovato in una roccia vecchia di 3,465 miliardi di anni, ma i campioni fondamentali erano conservati in un museo a Londra. Quando finalmente è riuscito a ottenerli, Valley ha condotto un'analisi chimica formidabile, che ha dimostrato come i microfossili di morfologia diversa erano diversi anche in termini di contenuto di isotopi, il che indicava che si trattava di specie diverse. La collaborazione ha stabilito che quei microfossili erano effettivamente residui di organismi vissuti 3,465 miliardi di anni fa, con tutta probabilità nel fango o sott'acqua<sup>7</sup>. Sappiamo, dunque, che, entro un miliardo di anni dalla sua formazione, la Terra era già popolata da comunità di microbi differenti, e che ogni specie aveva il proprio segreto metabolico per svilupparsi in un mondo competitivo. Nel momento della sua miliardesima rivoluzione intorno al Sole, la Terra aveva sviluppato tutti i componenti necessari per la formazione del suolo (Figura 1).

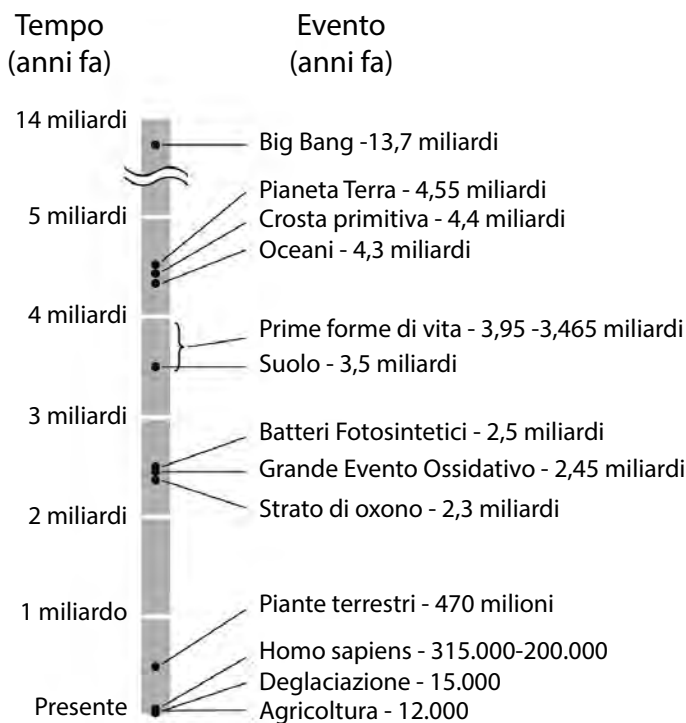


Figura 1 Cronologia degli eventi fondamentali che hanno contribuito alla formazione e all'uso del suolo sulla Terra. (Illustrazione di Bill Nelson).

Il suolo si forma in un processo millenario guidato dagli agenti atmosferici e dall'attività microbica. Inizia con le rocce. La base geologica, che gli scienziati del suolo chiamano substrato (*parent rock*), è la prima caratteristica definitoria del suolo che ne nascerà. Le rocce sono disgregate da processi termici, meccanici e chimici. Il calore fa sì che le rocce si espandano e si fratturino. L'acqua penetra nelle fessure delle rocce e, quando le temperature scendono sotto lo zero, la struttura liquida si espande diventando ghiaccio solido, fratturando ulteriormente le rocce. Poi, le radici delle piante si infilano nelle fratture ed esercitano una forza sufficiente a dividerle, esponendo superfici ancora più ampie agli agenti am-

bientali. L'esposizione può modificare le rocce con diversi mezzi chimici: alcune rocce, come il calcare, con il tempo si sciolgono in acqua. Altre sono modificate chimicamente dall'ossigeno e da elementi presenti in rocce vicine. La perdita o l'acquisizione di elettroni modifica la reattività degli elementi, in particolare dei metalli, sulla superficie delle rocce. Tutti questi processi fratturano le rocce in pezzi più piccoli, ne modificano colore, tessitura e proprietà chimiche.

La maggior parte di questi processi è regolata dagli eventi atmosferici, che plasmano la formazione del suolo esponendo all'acqua e alle fluttuazioni della temperatura i materiali del substrato. Con il passare del tempo, le rocce si disgregano producendo qualcosa che assomiglia a suolo inorganico. L'insieme degli eventi atmosferici nell'arco di un periodo di cinquanta o cento anni è quello che chiamiamo clima. Il clima della Terra, che oscilla fra condizioni da serra e da ghiacciaia, determina anche il comportamento dei ghiacciai, colossi di ghiaccio che scavano valli e polverizzano rocce mentre avanzano o retrocedono inesorabilmente sui continenti. Se basta un soffio di vento per sollevare il suolo, ci vuole un ghiacciaio per spostare massi e macinarli lungo la superficie della Terra per milioni di anni, lasciando dietro di sé una scia di ciottoli.

La velocità con cui si modificano le rocce è variabile. In presenza di abbondanza di acque, il calcare si dissolve rapidamente (geologicamente parlando), mentre il quarzo, uno dei materiali geologici più duri e meno porosi, di solito è l'ultima roccia che rimane. Ne segue, quindi, che suoli nati da substrati diversi avranno velocità di formazione e di erosione differenti.

Ogni manciata di suolo racconta un'antologia di storie, ciascuna appartenente a un minerale costituente. Prendiamo il biossido di silicio, la sostanza più abbondante sulla superficie del pianeta. Le sue caratteristiche notevoli ne hanno fatto sia un fondamento della crosta terrestre (arenaria), sia un cavallo da battaglia della tecnologia moderna. Il biossido di silicio è la sostanza chimica che costituisce la sabbia che si trova sulle spiagge e nei deserti, ed è un

componente fondamentale del suolo. Intorno al 6500 AEC, gli antichi beduini scoprirono che, mescolando sabbia, calce e acqua, si produceva una miscela modellabile che indurendosi diventava un robusto materiale da costruzione simile al calcestruzzo moderno. I Romani perfezionarono il metodo, creando edifici praticamente indistruttibili come il Pantheon e il Colosseo, che sono in piedi ancora oggi<sup>8</sup>.

Fra il 4000 e il 3500 AEC., i popoli dell'Egitto e della Mesopotamia scoprirono che, a temperature elevate, la sabbia fonde e, quando poi si raffredda, solidifica dando una sostanza bella e utile che chiamiamo vetro<sup>9</sup>. Per migliaia di anni, gli esseri umani sono stati affascinati dalle proprietà del vetro, vi hanno aggiunto minerali per modificarne le caratteristiche, creando vetri trasparenti per le finestre e vetri colorati per le opere artistiche. Negli ultimi due secoli si è scoperto che la sabbia rinforza l'asfalto delle strade e ne sono state deposte enormi estensioni, con il rischio di esaurire la disponibilità di sabbia del mondo. Sembra assurdo, data l'abbondanza di deserti sulla Terra, ma solo i granelli di sabbia con forme angolari sono utili come materiali da costruzione, mentre la sabbia del deserto, esposta al vento per millenni, è perfettamente arrotondata. Come ben sappiamo, poi, il biossido di silicio è diventato un minerale molto desiderato per la produzione di chip per computer, il che spiega il nome di Silicon Valley, "valle del silicio", attribuito all'industria informatica nella zona di San Francisco.

Date tutte le sue notevoli caratteristiche, non meraviglia che il biossido di silicio costituisca una parte fondamentale di molti suoli. I grani di sabbia sono le particelle minerali più grandi nel suolo, a cui conferiscono una porosità che consente il movimento agevole di aria e acqua. Le particelle più piccole nel suolo sono argilla, che possono essere piccole quanto un batterio e nella maggior parte dei casi sono composte da minerali silicati in cui è intrappolata acqua. Questi silicati si mescolano con i metalli e sono alterati da reazioni con acqua e ossigeno. I componenti metallici, spesso alluminio e ferro, creano l'arcobaleno di colori associato alle argille, dalle

scogliere rosse di Martha's Vineyard negli Stati Uniti alle falesie marroni di Omarama in Nuova Zelanda.

Le particelle di suolo di medie dimensioni sono chiamate limo. Ogni particella di limo contiene una miscela di quarzo e feldspato, entrambi prodotti dal raffreddamento di magma, il materiale fuso che si trova al di sotto della crosta terrestre. Il limo contiene anche composti a base di alluminio e silicio, con potassio, sodio o calcio. Questi minerali sono incorporati in rocce che vengono gradualmente erose dall'acqua e dal ghiaccio. L'acqua in movimento sposta le rocce e, durante il loro viaggio in acqua, se ne staccano frammenti, sfregano contro le rive dei fiumi e si frammentano urtandosi a vicenda, finché non sono ridotti a particelle di limo.

All'interno di questa infrastruttura minerale si trova una metropoli di microorganismi che cooperano e competono per le risorse a distanza ravvicinata. Si stima che nei suoli di tutto il mondo vivano  $3 \times 10^{29}$  batteri, cioè qualche miliardo in un cucchiaino di suolo, una quantità pari al peso di circa cinque mucche in un ettaro<sup>10</sup>. Come i cianobatteri hanno dimostrato che i microbi possono influire drasticamente sull'atmosfera terrestre, la chimica del suolo dimostra quanto può essere profonda l'influenza dei microbi sotterranei. Batteri apparentati a quelli che hanno ossigenato l'atmosfera della Terra continuano a fissare il carbonio anche oggi, rimuovendo anidride carbonica dall'atmosfera, utilizzandola direttamente e rendendola disponibile ad altri abitanti del suolo.

I microorganismi sono partner fedeli in tutti gli eventi di erosione dei minerali, accelerando reazioni chimiche spontanee e aggiungendo alla miscela la propria chimica. Per esempio, certi batteri producono acidi che sciolgono i minerali nei loro componenti nutrienti; altri producono agenti chelanti, molecole che rimuovono i metalli dal materiale geologico. Questi processi chimici possono produrre strati visibilmente diversi nei profili del suolo. Di particolare importanza per la salute del suolo e delle piante sono i batteri che convertono il gas diazoto, una molecola inerte presente nell'atmosfera, in ammoniaca, una forma di azoto accessibile alle

piante. Questi batteri azotofissatori sono stati la fonte principale di azoto negli antichi ecosistemi che hanno consentito alle piante di insediarsi sulla terraferma.

Oggi le piante della terraferma sono la forma di vita più abbondante sul pianeta e rappresentano 450 gigatonnellate (miliardi di tonnellate) di carbonio. È difficile immaginare una Terra senza piante. Sono le custodi del suolo: contribuiscono a crearlo, a dargli forma e a nutrirlo. Il salto evolutivo dagli ambienti acquatici a quelli terrestri però non è stato facile. Quando le piante più resistenti hanno iniziato a crescere in mezzo a rocce polverizzate, si è sviluppato un ecosistema, con contributi da parte di molti elementi. I batteri hanno fornito azoto e altri nutrienti in forme utilizzabili dalle piante, e queste hanno fissato il carbonio e lo hanno messo a disposizione di organismi micro- e macroscopici viventi sul substrato roccioso. Le radici delle piante pompano nel suolo fra il 20 e il 40 per cento del carbonio fissato attraverso la fotosintesi, il che le rende le principali fornitrici di carbonio per il suolo, che a sua volta rende il suolo l'habitat più ricco di biodiversità del pianeta<sup>11</sup>. Le piante hanno modificato il suolo almeno 470 milioni di anni fa, quando sono migrate dal mare alla terraferma, e il cambiamento continua, ogni volta che la roccia incontra una pianta. Ho avuto la fortuna di vedere in atto questo processo nel 1985, quando ho partecipato a un convegno scientifico sui batteri azotofissatori a Corvallis, in Oregon. Gli organizzatori del convegno hanno previsto una escursione al vicino Mount St. Helens, sito di una recente eruzione vulcanica. Il 18 maggio 1980, la pressione dalle profondità della Terra ha spinto il magma alla superficie, producendo un rigonfiamento sul fianco della montagna, che poi è esploso con una forza pari a 1600 bombe atomiche delle dimensioni di quella sganciata su Hiroshima. Avevo visto in televisione riprese dell'eruzione, che aveva provocato inquietanti cieli notturni a mezzogiorno su centinaia di chilometri intorno al vulcano, dopo che questo aveva lanciato 520 milioni di tonnellate di ceneri fino a oltre 24.000 metri nella stratosfera, oscurando il sole. Gas vulcanici velenosi