

Impronte dei gradienti sulla Terra

Prolusione del Socio nazionale non residente Carlo Doglioni
tenuta il 20 novembre 2023

Un gradiente è la variazione nello spazio e nel tempo di un qualsiasi parametro misurabile, per esempio pressione, temperatura, carica elettrica, natalità, reddito pro capite, ecc.: è quindi uno strumento per misurare la differenza di un determinato parametro in una data area e la sua eventuale evoluzione nel tempo. Per esempio, una batteria funziona per il gradiente elettrochimico tra l'anodo e il catodo. In coordinate cartesiane, il gradiente di una funzione è un vettore che ha come componenti le derivate parziali della funzione. Più alto è il gradiente, maggiore è l'energia coinvolta o accumulata nel contesto in cui viene calcolato. Quindi il concetto di gradiente è trasversale a tutte le discipline. I gradienti controllano qualsiasi fenomeno naturale: studiare i gradienti significa capire la dinamica dei sistemi. I meccanismi che governano la geodinamica sono determinati da gradienti chimici e fisici, oltre ai gradienti esterni come le variazioni di intensità delle varie lunghezze d'onda della radiazione solare. Nel suo viaggio nella galassia e nell'universo, la Terra compie una traiettoria elicoidale, rincorrendo il Sole che a sua volta ruota all'interno della Via Lattea: il tutto è generato da gradienti gravitazionali, qualunque sia la natura della 'forza' gravitazionale.

Conosciamo ancora molto poco dell'interno della Terra: l'interpretazione principale è che abbia una composizione simile alle meteoriti condritiche, molto ricche di ferro (20-30%) e di silicio (10-18%), magnesio (10-14%) e zolfo (2-5%). Queste meteoriti si suppone che rappresentino la composizione dei planetesimi la cui agglomerazione ha formato i pianeti rocciosi. Il bombardamento dei planetesimi ha trasformato l'energia cinetica in calore, tanto che all'inizio il pianeta doveva essere in una condizione di semi-fusione, o stadio di magma-ocean. Da allora la Terra si è differenziata, con gli elementi più pesanti collassati verso il nucleo, e i più leggeri nella parte più esterna del pianeta, se non nella sua atmosfera, il tutto controllato dai gradienti di densità; nel contempo la Terra ha iniziato un lento ma continuo raffreddamento: il mantello terrestre (da 30-2900 km) si pensa raffreddi a una velocità di circa 100°C ogni miliardo di anni. Da uno stadio per lo più indifferenziato e

molto caldo, il pianeta si è evoluto, stratificandosi e raffreddandosi, fenomeni controllati dai gradienti di densità e temperatura. Il sistema solare e la Terra si sono sviluppati circa 4,54 miliardi di anni fa, molto dopo la nascita dell'universo che conosciamo, circa 13,7 miliardi di anni fa.

La vita ha cominciato nelle sue forme primordiali a farsi strada in ambito marino, con organismi inizialmente unicellulari, forse poco meno di 4 miliardi di anni fa. Ma è solo con il fanerozoico, circa 545 milioni di anni fa, che la vita ha cominciato a prendere pieno possesso delle terre emerse. La superficie della Terra era praticamente inabitabile fino al Cambriano, probabilmente perché le radiazioni ionizzanti provenienti dal Sole bombardavano il pianeta molto più di quanto facciano oggi. Le radiazioni ionizzanti sono estremamente dannose per le cellule. Cosa possiamo ipotizzare? All'inizio della sua formazione il Sole emetteva molte più radiazioni ionizzanti e la Terra aveva un'atmosfera e un campo magnetico più sottile e debole di quanto siano oggi. Il campo magnetico protegge l'atmosfera dal vento solare, e l'atmosfera è la schermatura che abbiamo dalle radiazioni ionizzanti. Quindi, la diminuzione del gradiente delle radiazioni e l'aumento della protezione terrestre hanno permesso lo sviluppo che conosciamo della vita sul nostro corpo celeste. Circa 2.5 miliardi di anni fa, l'atmosfera terrestre è passata da uno stadio riducente a quello ossidante che abbiamo oggi, grazie all'immissione di ossigeno generato dalle alghe marine. Il campo magnetico terrestre è prodotto dai movimenti convettivi del nucleo esterno liquido (tra 2900 e 5100 km di profondità).

Quindi c'è una serie di gradienti che permettono la vita sulla Terra, come per esempio la presenza di un'atmosfera che è dovuta sia all'ossigeno emesso dalla vegetazione, sia ai gas alimentati dal vulcanismo prodotto dai gradienti all'interno del mantello terrestre, per cui il materiale più leggero tende a risalire verso l'alto, con una camera magmatica all'interno della quale si accumula del fuso lavico che raggiunge un gradiente di pressione tale per cui il materiale riesce a risalire verso l'alto ed eruttare sia magma sia gas. Marte aveva un'atmosfera e un campo magnetico che lo proteggeva; il pianeta rosso aveva acqua sulla sua superficie come evidente dal reticolo idrografico e dai depositi sedimentari. Marte, a un certo punto della sua storia, ha perso il campo magnetico che si è praticamente spento e di conseguenza l'atmosfera è stata spazzata via dal vento solare. La perdita dell'atmosfera e quindi della sua pressione sulla superficie ha determinato l'evaporazione dell'acqua e quindi anche della possibilità di uno sviluppo come sulla Terra della vita. Sulla Terra abbiamo una finestra termica estremamente ridotta in cui è possibile la vita: se pensiamo dallo zero termico di -273°C fino ai milioni di gradi di una stella: per le forme di vita che conosciamo la possibilità di vita è all'interno di un intervallo di circa 100°C , con rare eccezioni di organismi termofili, o estremofili, in grado di svilupparsi per esempio

lungo i camini a centinaia di gradi che si formano in prossimità delle dorsali oceaniche e del magmatismo associato.

Il nucleo interno solido della Terra non esisteva all'inizio: è cresciuto man mano che il pianeta raffreddava, e tuttora, pur se lentamente, aumenta il suo diametro, ruotando relativamente al nucleo esterno liquido, costituito principalmente da leghe metalliche di ferro e nichel, quindi inducendo un campo magnetico dipolare crescente nel tempo, un gradiente che va crescendo nel tempo a proteggere l'atmosfera e la vita sulla Terra. Il nucleo interno non esisteva prima di 2 miliardi di anni, secondo alcuni addirittura 500 milioni di anni. Ciò significherebbe che il suo sviluppo, assieme alla diminuzione della radiazione ionizzante solare, ha fortemente condizionato la possibilità di crescita ed evoluzione della vita sulla superficie del pianeta, così come descritto da Lamarck e Darwin. Anche i minerali hanno avuto una loro evoluzione, è l'entropia che aumenta come stabilito dal secondo principio della termodinamica: infatti all'inizio della storia della Terra c'erano poche decine di minerali, ma con la dinamica del pianeta c'è stata una speciazione che ha portato a oltre 5000 minerali noti oggi. C'è stata, dunque, un'evoluzione sia organica sia inorganica sulla e nella Terra, governata dai gradienti che la caratterizzano. Per esempio, ci sono alcune dolomie che vengono sintetizzate proprio dalla presenza di batteri.

Le placche tettoniche sono frammenti di litosfera, cioè il guscio esterno della Terra, spesso in media circa 100 km, e composto dalla crosta terrestre e una parte di mantello, detto appunto litosferico, o LID. Le placche si muovono l'una rispetto all'altra e dove le placche si allontanano si creano gli oceani, dove si avvicinano la litosfera entra nel mantello e crea quella che viene chiamata una zona di subduzione e, in generale, al di sopra si formano delle catene montuose, dove si generano i terremoti più energetici. La possibilità che abbiamo di investigare l'interno della Terra è necessariamente legata quasi esclusivamente al magmatismo nelle parti superficiali, ma soprattutto l'andamento delle onde sismiche, che ci permettono di riconoscere non solo i gusci della terra ma anche le anisotropie laterali all'interno del pianeta: la Terra è cioè sì una sorta di cipolla, ma non è omogenea e ogni livello ha delle forti eterogeneità. I movimenti che possiamo misurare tra una placca e l'altra vengono illuminati proprio dalla sismicità: i terremoti si concentrano dove questo guscio esterno si muove l'uno rispetto all'altro in questo puzzle di placche che si allontanano o si avvicinano.

Unendo le direzioni di apertura dei tre grandi oceani che sono l'Indiano, il Pacifico e l'Atlantico, e le direzioni delle tre grandi zone di subduzione del mondo degli ultimi 40-50 milioni di anni (ma forse anche a molto più indietro nel tempo), cioè il sistema alpino-himalayano, il Pacifico occidentale e quello

orientale, si evidenzia come le placche seguano un flusso abbastanza regolare, con quello che possiamo definire come 'equatore tettonico' con un angolo di circa 28° rispetto all'equatore geografico. Grazie alla costellazione dei satelliti e relative stazioni a terra del sistema GPS (ora *global navigation satellite system*, GNSS) vediamo come oggi si muovono le placche e osserviamo che i movimenti che riconosciamo negli ultimi trent'anni sono gli stessi di quelli che possiamo riconoscere nel passato geologico di milioni di anni; da questo deriviamo che il flusso delle placche non è caotico e che segue un trend descritto dall'equatore tettonico. Inoltre, valutando il movimento della placca Pacifica rispetto alla sorgente magmatica della catena delle Hawaii si aggiunge un ingrediente fondamentale: la litosfera si muove verso 'ovest' rispetto alla sorgente magmatica e quindi c'è un livello di scollamento della litosfera rispetto al mantello sottostante. Solo che facendo la somma vettoriale dei movimenti della placche dedotti dalla rete GNSS e la deriva verso 'ovest' della litosfera pacifica, si vede che l'intero guscio esterno del pianeta ruota rispetto al sottostante mantello, e che quindi quest'ultimo si sposta relativamente verso 'est' rispetto alla litosfera. Grazie alla sismologia possiamo riconoscere che lo scollamento relativo tra litosfera e mantello avviene tra i 100 e i 200 km di profondità, un livello definito come canale a bassa velocità (*low velocity zone*, LVZ), dove le onde sismiche rallentano probabilmente per la presenza di una piccola percentuale di fuso magmatico che abbassa la viscosità e che permette lo scivolamento relativo della litosfera rispetto al mantello sottostante. Nella LVZ le onde sismiche rallentano perché la temperatura è leggermente superiore alla temperatura del *solidus* del mantello. Questo scollamento verso ovest dà velocità lineari che diminuiscono verso le zone polari, come anche la sismicità che diminuisce drasticamente. Le placche però si muovono a velocità diverse l'una dall'altra, proprio perché alla loro base il piano di scollamento ha viscosità variabili. Quindi, gradienti di viscosità nel livello LVZ determinano gradienti di velocità tra le placche sovrastanti. Le placche che hanno al di sotto una LVZ con la minore viscosità sono quelle che scivolano verso ovest più rapidamente, come è il caso della placca pacifica.

Il movimento verso 'ovest' della litosfera rispetto al mantello spiega perché le subduzioni dirette a ovest siano più inclinate rispetto a quelle dirette a est o nordest, questo perché da un lato il flusso relativo del mantello da un lato le fa arretrare e verticalizzare, dall'altro le sostiene verso l'alto. Questa asimmetria comporta anche una grande differenza nella topografia, molto più elevata sul lato orientale del Pacifico, dove le subduzioni sono sostenute dal mantello e la placca a tetto è soggetta principalmente a compressione, mentre sul lato occidentale del Pacifico avviene il contrario: la subduzione arretra, si apre un bacino di retroarco estensionale, e non si generano catene elevate,

pur avendo velocità di convergenza tra le placche comparabili tra i due lati dell'oceano Pacifico.

Quindi abbiamo due tipi di catene in funzione della polarità della subduzione, contro o a favore del flusso relativo del mantello verso 'est'. Questa asimmetria la possiamo constatare anche tra le due catene montuose italiane, le Alpi e gli Appennini, le prime con una subduzione mediamente diretta a est, con grande elevazione, rocce cristalline profonde esumate dalla collisione tra la Placca Adriatica e quella Europea, e gli Appennini, all'opposto, con direzione di subduzione mediamente diretta a ovest, una catena costituita per lo più da rocce sedimentarie, poco elevata, con una bacino di retroarco (il Mar Tirreno) e numerose altre differenze. Gradienti di densità della litosfera determinano anche la polarità della subduzione, a favore o contro il flusso mantellico. Ma cosa determina il movimento relativo della litosfera verso ovest? Da dove viene l'energia che la fa scivolare e che genera terremoti e vulcanismo? A questa domanda fondamentale non c'è oggi una risposta univoca e consolidata nella comunità scientifica. Sappiamo che per esempio la sismicità è molto più abbondante alle basse latitudini rispetto ai poli e che quindi sembra presente un controllo astronomico della geodinamica. Tuttavia, gran parte della letteratura al momento considera invece la tettonica delle placche come solo un fenomeno termico, convettivo, o controllato dal basso (*bottom up*) o dall'alto (*top down*). I due grandi scienziati Gutenberg e Richter hanno dimostrato come dal punto di vista statistico vi sia una regola nell'accadimento dei terremoti: in media avviene un terremoto di magnitudo (M) da 8 in su ogni anno, si registrano circa 15-17 terremoti di magnitudo compresa tra 7 e 7.9, 150-170 eventi sismici tra 6 e 6.9, e così via, diminuendo di un grado, la frequenza dei terremoti aumenta di un ordine di grandezza. C'è un rapporto esponenziale chiaro tra la frequenza dei terremoti e la loro magnitudo. Questo ci dice che i terremoti hanno un comportamento frattale e che l'energia che li determina a scala globale è una sola: quindi c'è un gradiente di energia che viene accumulato e dissipato continuamente sulla Terra, e l'unica spiegazione fisica è che tale sorgente di energia sia globale, cioè su tutto il pianeta. Se avviene un terremoto in Giappone, l'energia della litosfera in Argentina o in qualsiasi altra parte del mondo ne è coinvolta; vuol dire che c'è una certa quantità di energia che va ad accumularsi nella Terra e che viene gradualmente dissipata su tutta la sfera. Questa è la prova che la sorgente energetica della geodinamica, e quindi dei terremoti, non può non avere un'origine legata alla rotazione terrestre e agli effetti mareali. L'equatore tettonico è un indizio importante del flusso delle placche e del loro controllo astronomico. Infatti, la sua inclinazione rispetto all'equatore geografico (circa 28°) equivale alla proiezione dello zenith lunare sulla Terra, pur se transiente. Infatti, l'asse di rotazione terrestre è inclinato di

23° circa rispetto al piano dell'eclittica, e la Luna compie una rivoluzione su un piano inclinato di circa 5° rispetto al piano dell'eclittica. La correlazione è evidente. Sugli altri grandi pianeti gassosi come Giove, Saturno, Urano e Nettuno, che hanno un'alta velocità di rotazione, le masse si distribuiscono lungo i paralleli perpendicolari ai loro assi di rotazione; inoltre, così come gli altri pianeti rocciosi, Mercurio, Venere e Marte, non hanno un satellite delle dimensioni dello stesso ordine di grandezza come la Luna per la Terra.

Sulla Terra, inoltre, diversamente dagli altri pianeti, proprio per gli effetti gravitazionali della Luna sulla Terra, abbiamo una forte instabilità dell'asse di rotazione terrestre che produce piccole e grandi oscillazioni dell'asse di rotazione, dalla polodia (6,5 anni), alla nutazione (18,6 anni), alla precessione (26.000 anni), ecc. La precessione che fa sì che l'equatore attuale, tra 13.000 anni si troverà inclinato in modo opposto rispetto al cono descritto dalla precessione dell'asse di rotazione. L'equatore tettonico si trova esattamente lungo la bisettrice di queste due posizioni opposte dell'equatore geografico: per capire ciò, ci viene in aiuto un numero fondamentale che è il tempo di Maxwell, o tempo di rilassamento, che è dato dal rapporto tra viscosità e rigidità, e descrive il tempo per cui un materiale solido, sollecitato da una forza esterna, alla scala del tempo di rilassamento si comporta come fosse un fluido. La viscosità è data da pressione per tempo, mentre la rigidità è data solo dalla pressione. Nel loro rapporto, la pressione si azzerava e rimane il tempo. La litosfera ha una viscosità e una rigidità tali per cui il suo tempo di rilassamento di circa 20.000 anni, a supporto del modello che la litosfera potrebbe comportarsi come un fluido a questa scala temporale, e spiegare perché l'equatore tettonico si trovi lungo la bisettrice dell'oscillazione dell'asse di rotazione terrestre.

La Luna esercita una forza mareale sulla Terra doppia di quella del Sole, questo perché la forza mareale dipende dal cubo della distanza; questo spiega perché la forza mareale della Luna sia maggiore di quella del Sole, nonostante la massa lunare sia molto più piccola, ma la Luna è molto più vicina alla Terra. La forza mareale agisce non solo sulla Terra liquida, ma anche su quella solida: infatti il pavimento di casa nostra si alza e si abbassa due volte al giorno, anche di 30-40 cm, ogni 12 ore e 25 minuti. Si muove anche orizzontalmente di circa la metà. Quindi, l'oscillazione mareale agisce sulla Terra solida in modo significativo, ma la sua azione avviene, o è responsabile, anche del lento, inesorabile movimento verso 'ovest' della litosfera di alcuni cm/anno.

Il sollevamento dovuto all'attrazione luni-solare non avviene in maniera istantanea quando c'è la luna sopra di noi perché la Terra solida reagisce con un leggero ritardo di qualche minuto, a causa della componente anelastica del pianeta. Ciò fa sì che il rigonfiamento della marea non sia esattamente allineato con lo zenit ma abbia un piccolo ritardo per cui, mentre la Terra ruota verso

est, in realtà questo rigonfiamento, o eccesso di massa, vorrebbe rimettersi nella linea di attrazione gravitazionale Terra-Luna, determinando un momento o forza verso 'ovest' in senso opposto alla rotazione terrestre. Questo determina un freno e quindi un rallentamento della rotazione terrestre, piccolissimo, 2 ms al secolo, ma sufficiente perché 400 milioni di anni fa un anno durasse 400 giorni, il giorno fosse di 20-21 ore. A causa del rallentamento della rotazione terrestre, per la conservazione del momento angolare, la Luna si allontana dalla Terra di circa 4 cm ogni anno.

Quindi si genera un gradiente di pressione legato al fatto che la Terra si trova in una condizione permanente di instabilità e quindi l'attrazione gravitazionale è disallineata rispetto a quello che è l'eccesso di massa che si forma per l'attrazione luni-solare; quindi la Terra solida innalza con un leggero ritardo e il rigonfiamento vorrebbe riportarsi verso ovest dove è massima l'attrazione gravitazionale.

Il passaggio di quest'onda dovrebbe generare un ritardo di circa 100 micron sul piano di scollamento alla base della litosfera, e quindi, alla fine dell'anno si accumulerebbe un ritardo di alcuni centimetri che spiegherebbero perché il guscio esterno della Terra ruoti rispetto all'interno della Terra di circa 10-15 cm/anno.

Per riassumere, il flusso delle placche segue un trend coerente con la rivoluzione della Luna, e sappiamo che esiste convenzione del mantello perché della litosfera entra nella Terra lungo le zone di subduzione e mantello astenosferico risale lungo le zone di rifting.

La serie storica dei dati GPS-GNSS ci fa vedere che le oscillazioni delle velocità delle placche coincidono con le armoniche mareali di lungo periodo, a conferma di un controllo astronomico del movimento delle placche tettoniche.

Considerato che il mantello terrestre è in larga parte in condizione subadiabatica, quindi difficilmente in grado di convettare, e solo il mantello superiore superadiabatico, noi potremmo interpretare la tettonica delle placche come un sistema caotico auto-organizzato, determinato dalla coesistenza dei fenomeni endogeni possibili per la temperatura ancora in grado di permettere un comportamento viscoso del mantello, con gli effetti esogeni e astronomici che operano sulla Terra. La litosfera sarebbe un po' come un lombrico che si innalza per l'effetto mareale e si sposterebbe relativamente al mantello verso 'ovest' per la componente orizzontale dovuto al rigonfiamento mareale disallineato. Per riassumere: 1) il sistema terrestre è tettonicamente polarizzato e asimmetrico; 2) la litosfera si sposta verso ovest e 3) la tettonica delle placche e la geodinamica sono alimentate sia da energia endogena sia astronomica.

L'Italia deve la sua magnifica geografia e i suoi magnifici paesaggi proprio al fatto che è il prodotto di due subduzioni così diverse come le Alpi e gli Appennini: abbiamo una meraviglia di tipologie di rocce, una geodiversità

straordinaria, dalla Val d'Aosta alla Sicilia, dal Friuli alla Sardegna. In Italia abbiamo anche 10 vulcani attivi che sappiamo possono essere estremamente pericolosi, come l'eruzione pliniana del 79 d.C. In Italia avvengono in media circa una ventina di eventi distruttivi al secolo. L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) registra un terremoto ogni 30 minuti circa, 15.000-20.000 terremoti l'anno, pur se di bassa magnitudo. Sappiamo dalla storia sismica dove sono avvenuti i grandi terremoti in Italia e lì certamente ritorneranno, ma sappiamo anche che ci sono molte zone dove ancora non ci sono stati eventi importanti, e che da un punto di vista sismotettonico potrebbero generare terremoti anche di forte magnitudo.

L'Appennino si dilata di circa 4 mm all'anno, che vuol dire 40 cm al secolo, in tre secoli, se cumulo il movimento, può essere di oltre 1,2 m, che, se liberato in pochi secondi, può significare un terremoto di magnitudo circa 6.

Il terremoto è liberazione di energia perché lungo una faglia si crea un attrito che determina il rilascio di onde sismiche sia di volume (P e S, prime e seconde, o di pressione e taglio/shear), cioè che entrano nell'interno della Terra, sia di superficie (Love e Rayleigh). Le onde S sono più lente e assieme alle onde di superficie hanno un'ampiezza maggiore e infatti sono quelle che generano maggiori danni.

In Italia il più forte terremoto conosciuto è quello della Val di Noto in Sicilia sudorientale (M 7.3) del 1693, mentre il più forte terremoto al mondo è stato registrato in Cile (M 9.5), con epicentro a Valdivia, nel 1960.

I terremoti sono concentrati ai limiti tra le placche tettoniche e si formano solo nella parte fredda esterna della Terra, per lo più nella parte alta della litosfera (primi 50 km) dove il comportamento meccanico è di tipo fragile, proprio per la bassa temperatura. Andando in profondità, dove domina la maggiore temperatura, le rocce sottoposte a gradienti di pressione si deformano in modo visco-plastico, per cui non rilasciano energia in modo improvviso e la deformazione tende a essere stazionaria.

Le forze in gioco sono quelle della tettonica delle placche, che muove la litosfera orizzontalmente, più la forza di gravità. Quindi vi sono volumi della litosfera che si muovono a favore di gravità, quindi verso il basso, dove per esempio le placche si separano come nelle zone di rifting, e volumi che si muovono contro la gravità, verso l'alto: questi ultimi hanno bisogno di maggiori gradienti di pressione per muoversi e generano i terremoti compressivi che, infatti, hanno magnitudo superiori, come appunto lungo le zone di convergenza tra le placche. Quindi possiamo fare una classificazione dei terremoti in funzione dell'energia generata dai relativi gradienti di pressione, gravitazionale negli ambienti estensionali, mentre è puramente elastica negli

ambienti compressivi e trascorrenti. Grazie alla tecnica interferometrica satellitare, possiamo definire con precisione le aree epicentrali dei terremoti, cioè le aree, o meglio i volumi che si sono mossi durante un terremoto. La tecnica InSAR permette di riconoscere l'impronta digitale di un terremoto, circoscrivendo con grande accuratezza l'area che si è attivata durante un sisma; maggiore il volume, maggiore la magnitudo del terremoto. È all'interno delle aree epicentrali che avvengono gli scuotimenti del suolo più forti, e quindi anche i maggiori danneggiamenti alle strutture e le vittime conseguenti. All'interno delle aree epicentrali il suolo subisce forti accelerazioni sia verticali sia orizzontali. Proprio perché le rocce hanno una significativa componente anelastica, le onde sismiche perdono di energia fuori dal volume epicentrale, dove oltre all'energia radiata dal o dai piani di movimento, il volume si muove contestualmente.

Sulla base dei volumi che possono essere coinvolti e che dipendono principalmente dal gradiente di temperatura e dal gradiente di stress, possiamo calcolare la magnitudo massima possibile in una data area della Terra. In Italia le magnitudo massime si concentrano lungo la dorsale appenninica, proprio perché i volumi che si possono attivare sono maggiori, mentre, spostandosi per esempio verso il Mar Tirreno, lo spessore fragile diminuisce per il maggior gradiente di temperatura e la sismicità massima è inferiore.

Il nostro obiettivo è calcolare lo scuotimento del suolo nelle aree epicentrali, cioè la pericolosità sismica, il cui dato serve all'ingegnere sismico per costruire edifici in grado di resistere a tali sollecitazioni. Secondo l'attuale normativa antisismica, per l'edilizia residenziale, nelle zone dove si attendono i maggiori terremoti, sono previste accelerazioni di 0.25-0.35 g, cioè circa un terzo dell'accelerazione di gravità presa come riferimento. In realtà, infittendo la rete accelerometrica nazionale, abbiamo registrato accelerazioni 2-3 volte superiori all'interno delle aree epicentrali dei terremoti degli ultimi 20 anni, e quindi è necessario aggiornare tali norme per rendere le abitazioni in grado di resistere a tali scuotimenti.

Nella storia della vita sulla Terra – valutiamo l'esplosione demografica degli ultimi 150 anni in cui come esseri umani siamo cresciuti da 1 a 8 miliardi – riconosciamo un gradiente demografico esplosivo. In paleontologia è noto che spesso, quando c'è stata una crescita demografica così veloce e improvvisa di una determinata specie, tale evento si è rivelato il prodromo dell'estinzione della stessa specie, ed è quindi importante riconoscere questi gradienti demografici; significa rendersi conto del problema e del rischio cui andiamo incontro.

Se prendiamo un singolo strato di rocce sedimentarie di una parete delle nostre Alpi o Appennini, questo può rappresentare il lasso temporale della

precessione, quindi 26.000 anni: per la storia dell'uomo è un lasso temporale enorme, per la storia della Terra un istante; ma è solo nell'ultimo secolo che si è generato un gradiente demografico allarmante, supportato dalla tecnologia e dalla possibilità di produzione estensiva di cibo, che ha generato una richiesta sempre più forte di energia e quindi maggiore inquinamento di CO₂ in atmosfera, che ha superato le 400 parti per milione rispetto alle 280 circa di età pre-industriale. Tutto ciò sta comportando il riscaldamento climatico che determina maggiore evaporazione degli oceani e quindi fenomeni di rilascio d'acqua dall'atmosfera sempre più estremi e frequenti, con gradienti di pressione in atmosfera che determinano venti sempre più veloci e distruttivi, anche oltre i 200 km/h, come è successo in nord Italia nell'autunno del 2018 (tempesta Vaia).

Vent'anni fa si pensava che la calotta glaciale della Groenlandia si sarebbe sciolta in circa 1000 anni, ma con l'attuale aumento esponenziale della temperatura sia degli oceani sia dell'atmosfera, ora sappiamo che questa finestra temporale sarà molto più breve: la perdita dei ghiacci groenlandesi significherebbe un innalzamento del livello del mare globale di 6-7 m, un valore terrificante per tutte le aree costiere popolate nel mondo. Stiamo quindi rapidamente uscendo dal periodo Quaternario, segnato da un generale raffreddamento del clima terrestre e caratterizzato da glaciazioni, ed entrando nell'Antropocene. Stiamo assistendo inoltre a una importante estinzione di massa, la sesta estinzione di massa globale, con importante perdita di biodiversità a causa del gradiente termico che si è innescato.

Viviamo gradienti demografici in maniera molto asimmetrica: la popolazione africana sta crescendo a una velocità di oltre 70%, mentre quella europea cresce di circa l'11%; inoltre il reddito pro-capite in Europa è molto più alto di quello in Africa. Questi due gradienti determinano inevitabilmente una migrazione dall'Africa all'Europa a cui assistiamo quotidianamente con le tragedie in mare che scuotono le nostre coscienze.

Gli esopianeti sono dei sistemi che possono rappresentare dei gemelli a migliaia di anni luce di distanza del nostro sistema solare ed è certamente fondamentale studiare l'universo, capire l'origine dei buchi neri, ma la domanda che dovremmo porci è perché non mettiamo la stessa volontà conoscitiva per la Terra?

Dante Alighieri ci ricorda con la sua metafora della *Divina Commedia* che il paradiso è in cielo, mentre è sottoterra che si trova l'inferno. Questa falsa dicotomia culturale fa sì che noi investiamo tantissimo nello studio dell'universo e degli esopianeti, e studiamo molto meno l'interno della Terra. Abbiamo invece un dovere morale nello studio più approfondito del nostro pianeta, viste le implicazioni sociali date dai numerosi rischi naturali, dalla

necessità di reperire risorse rinnovabili, combattere il riscaldamento climatico. C'è anche una ovvia ragione conoscitiva sul funzionamento del pianeta e della tettonica delle placche, ancora troppo lacunosi. Dobbiamo renderci conto che studiare la Terra è fondamentale non solo per la crescita del sapere ma anche proprio per ragioni pratiche di convivenza e di governo dei gradienti chimico-fisici. Come abbiamo visto, il sistema Terra e la sua dinamica sono controllati da una cascata di gradienti, dalla composizione chimica, alle variazioni di pressione, fino alle implicazioni gravitazionali esterne.

Il nostro obiettivo dovrebbe essere quello riassunto nell'acronimo *VALE*: vale la pena studiare la Terra, vale la pena capire i gradienti perché così forse potremo migliorare il rapporto con la Terra, con i suoi rischi e le sue risorse, vale la pena perché dobbiamo difendere la *Vita*, dobbiamo proteggere le nostre *Abitazioni* in caso di terremoto, perché quando c'è un evento sismico le popolazioni sono sfollate anche per 15 anni e perdono la loro *Libertà*, le loro radici storiche e culturali, e vedono sgretolare il tessuto socio *Economico* che le governa. È necessario un rapporto più positivo con la Terra per aiutarci a far capire che investire nello studio del nostro pianeta è anche un grande risparmio economico, oltre che un'opportunità di notevole crescita culturale e sociale.

CARLO DOGLIONI

*Presidente dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia,
Accademia nazionale dei Lincei, Accademia delle Scienze di Torino,
Sapienza Università di Roma*

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare dell'invito a tenere la prolusione per l'apertura dell'Anno Accademico il Presidente Massimo Mori e i colleghi Roberto Compagnoni, Giovanni Ferraris e Lino Sacchi.

Dedico questo scritto a Pietro Rossi, uno studioso che ho stimato molto e che considero un gentiluomo della cultura.

