LIVIO TREVISAN

LA DERIVA DEI CONTINENTI Avventure di una teoria

INTRODUZIONE

L'idea che i continenti non siano sempre stati nella posizione in cui li vediamo oggi sulle carte degli atlanti è nata oltre un secolo fa.

La sorprendente corrispondenza di forma tra la costa occidentale dell'Africa e la costa orientale del Sudamerica, che già aveva colpito Francesco Bacone (Novum Organum, 1620) suggerì ad Antonio Snider-Pellegrini (La création et ses mystères dévoilés, 1858) la prima ricostruzione grafica delle due Americhe unite al vecchio continente e dell'Australia attaccata alla costa dell'Africa orientale. Nel 1880 lo svizzero H. Wettstein accennava a grandi spostamenti delle terre verso Ovest, dovuti all'attrazione del sole sui corpi non ben solidificati. Nel 1890 W. F. Coxworthy esprimeva l'ipotesi che i continenti attuali sono parti staccate di una massa originariamente unica. Nel 1907 W. H. Pickering (Journal of Geology XV, n. 1) scrisse che un distacco delle Americhe dal Vecchio Mondo poteva essere la conseguenza di un'altra ipotesi, che allora si prospettava, e cioè che l'oceano Pacifico fosse la cicatrice di distacco della Luna. Nel 1909 R. Mantovani, in un articolo intitolato L'Antarctide, ammetteva uno spostamento dei continenti e lo illustrava con carte paleogeografiche, nelle quali i continenti australi apparivano tutti raggruppati intorno all'Africa. Nel 1910 F. B. Taylor (Bearing of the tertiary mountain belt on the origin of the earth's plan, Bull. Geol. Soc. America, XXI, 2 June 1910) sostenne che la Groenlandia si era separata per deriva dal Nordamerica e che la distribuzione nello spazio delle catene montuose corrugatesi nell'era terziaria si poteva spiegare con vasti movimenti orizzontali delle terre emerse.

Queste idee, e altre simili di qualche altro autore, apparvero certamente a quasi tutti con l'alone di quella che oggi si chiama fantascienza e rimasero pertanto isolate.

La situazione cambiò quando apparvero gli scritti di A. L. Wegener. Il suo primo articolo sull'argomento (Die Entstehung der Kontinente, Petermanns Mitteilungen, 1912) inizia con una rapida critica alla mobilità dei continenti come era stata presentata da Pickering e da Taylor, cioè non per il concetto di sé, ma perché era stata motivata con argomentazioni false o insufficienti. Aggiunse di non esserne stato influenzato perché ne aveva avuto conoscenza dopo di aver cominciato a elaborare le proprie idee. Nel 1915 pubblicò il libro Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. Wegener era geofisico e meteorologo. Scrisse di aver avuto l'idea di una deriva dei continenti nel 1910 riflettendo sulla forma delle coste ai due lati dell'Oceano Atlantico, ma di averla ritenuta improbabile fino a che, nel 1911, venne a conoscenza dell'ipotesi di un antico collegamento delle terre brasiliane e africane, proposta dai paleontologi per spiegare l'unitarietà delle faune e delle flore terrestri fossili nel Paleozoico e nel Mesozoico ai due lati dell'oceano. Allora cercò di coordinare intorno all'ipotesi «madre» (che egli chiamò Prinzip der horizontalen Beweglichkeit der Kontinentalschollen) argomentazioni varie, tratte dalla Geofisica, dalla Geologia, dalla Paleontologia proponendo una teoria di una certa complessità, corredata da ricostruzioni della separazione dei continenti attuali partendo da un primitivo continente unico.

La teoria così concepita e presentata aveva l'ampio respiro di una grande sintesi, e implicava tali conseguenze (che Wegener mise in rilievo) da non poter più essere considerata un'ipotesi avventata; così l'interesse all'argomento divenne generale e si accesero discussioni. Le ripercussioni sull'orientamento delle ricerche geologiche furono grandi: alcune immediate, altre a scoppio ritardato. Ma per darne una sommaria valutazione occorre inquadrare le vicende di questa teoria nella storia delle scienze geologiche.

La storia di una disciplina scientifica può essere raccontata in modi diversi, a seconda che si voglia presentarla come acquisizione progressiva di conoscenze più larghe, oppure come evoluzione di un sistema di problemi e di teorie che cercano di risolverli. Per poterla raccontare nel primo modo bisognerebbe aver la certezza di esporre conoscenze acquisite stabilmente. Con quale criterio possiamo porre una linea di demarcazione tra una conoscenza «stabilizzata» e una ipotetica? Alle conoscenze si arriva partendo da problemi e per risolvere i problemi si propongono ipotesi. Una ipotesi può fare carriera ed essere promossa a teoria quando si arricchisce di un contorno di nuovi contenuti; entra nell'inventario delle conoscenze stabili quando è generalmente accettata dai competenti, cioè quando i competenti giudicano che abbia raggiunto la migliore approssimazione alla verità.

Ma questo giudizio non può essere assoluto; se non altro perché è condizionato dal livello delle conoscenze di sfondo nel momento in cui viene dato; quando quel livello col passare del tempo si innalza, il giudizio può essere confermato e corroborato, ma può anche mutare. Si può anche osservare che, se le conoscenze di sfondo sono formate da teorie accettate, ci troviamo in un circolo vizioso dal quale non si sa come uscire.

Con queste considerazioni portate all'estremo si può anche negare ogni valore conoscitivo all'indagine scientifica; rimane però il fatto che l'allargamento delle conoscenze di sfondo porta con sé un controllo crescente di validità, sia pure in tempi lunghi, come accennerò nell'ultimo paragrafo di questo articolo.

Nel caso nostro la teoria è stata accettata da alcuni e respinta da altri e questo stato di incertezza è durato circa mezzo secolo. Poi, il consenso ha assunto l'aspetto di un trionfo. Sulle vicende si possono fare diverse considerazioni. Se enunciamo l'idea nel modo più scarno, ci troviamo di fronte ad una alternativa senza possibilità di compromessi: i continenti o hanno viaggiato o sono rimasti fermi. L'asserto della mobilità è un'ipotesi, e per poterne giudicare il fondamento è naturale prendere in esame almeno le principali implicazioni: i continenti si muovono rispetto a che cosa? Per quali cause? Quali le conseguenze nel campo delle conoscenze attuali? Quali sono le verifiche possibili? Le risposte a queste domande, o i tentativi di risposta, sono il necessario completamento perché attorno ad una ipotesi si formi una teoria, ed è su queste implicazioni che è possibile pronunciarsi pro o contro. Ma pro o contro che cosa? Contro l'ipotesi iniziale o contro la teoria presentata con quel contorno? Le vie sono due: se le risposte ai problemi di contorno sono insoddisfacenti, dobbiamo considerare falsa l'ipotesi, oppure ritenerla potenzialmente valida cercando risposte diverse ai problemi connessi? Questa alternativa ha diviso gli studiosi in due fazioni, come i tifosi alle partite di calcio.

Per rendersi conto dello stato di incertezza durato un cinquantennio e della successiva accettazione generale, è opportuno dare un rapido sguardo retrospettivo ai maggiori problemi della Geologia in quel tempo.

UNO SGUARDO AGLI ORIZZONTI PROBLEMATICI DEL PASSATO

La geologia, dopo un periodo di incubazione nel Seicento, ha cominciato a indossare la toga di scienza alla fine del Settecento, da quando ha assunto il carattere di storia della Terra. Nei secoli precedenti le ipotesi

sulla Terra rientravano nella Cosmologia. Le basi metodologiche per ricostruire una storia del nostro pianeta si sono delineate quando hanno cominciato ad apparire connessioni tra problemi che in origine avevano finalità diverse. Da un lato c'era chi aveva interesse ai giacimenti di minerali utili e quindi cercava regole per la loro ricerca, e da un altro lato c'erano gli studiosi, che, incuriositi dai fossili, ne cercavano un'interpretazione corretta. Lo studio dei fossili ha fornito la prima intelaiatura di una cronologia geologica, ma richiedeva anche conoscenze sulla natura e sulle disposizioni delle rocce che li contengono, e questo era il campo di interesse diretto dei «minatori».

Il termine Geologia è entrato in uso nel Settecento. Per i tempi anteriori, si sa che Richard de Bury, vescovo di Durham, nel suo *Philobiblon* (Colonia 1473) aveva chiamato Geologia la giurisprudenza in quanto «scienza terrena», contrapposta a «Theologia». Il naturalista Ulisse Aldrovandi, ad un manoscritto pubblicato postumo nel 1648, e risalente a poco prima del 1605, aveva posto il titolo *Geologia ovvero de fossilibus*.

All'inizio del Settecento, con la diffusione dell'interesse per gli studi naturalistici, le «teorie della Terra» fiorirono rapidamente e si ramificarono, sia su base speculativa, sia in rapporto a esplorazioni e osservazioni. La proliferazione di teorie, anche stravaganti, può apparire eccessiva in rapporto ai «dati d'osservazione», e una facile critica potrebbe suonare così: sarebbe stato meglio osservare di più ed essere più cauti e più parchi nelle ipotesi. Ma è una critica semplicistica. Le «osservazioni» ben poche idee possono suggerire se non sono orientate e compiute per rispondere a quesiti connessi con qualche ipotesi. In ogni tempo l'osservazione mira a raccogliere indizi per risolvere i problemi che sorgono nell'orizzonte conoscitivo di quel momento (¹).

Già nel secolo scorso Charles Darwin scriveva: «Com'è strano che nessuno veda che ogni osservazione non può non essere pro o contro qualche teoria». Saltando ad un esempio recentissimo, il biologo François Jacob scrisse nel 1970: «perché un oggetto sia accessibile all'analisi non basta scorgerlo; bisogna inoltre che esista una teoria pronta ad accoglierlo». È quindi ragionevole un giudizio quasi opposto e cioè: la fioritura di teorie

⁽¹) Sull'orizzonte problematico di una disciplina in una determinata epoca si è espresso felicemente M. Pera (*Induzione e metodo scientifico*, Ed. Tecnico-Scientifica, Pisa, 1978).

è stata uno stimolo utile per promuovere nuove osservazioni e per provocare l'esame critico delle interpretazioni.

Nel caso di ipotesi o teorie antagoniste le discussioni diventano più accese e i contendenti possono seguire vie diverse: c'è quello che brandisce la penna e scrive, scrive, per convincere i lettori che lui ha ragione e gli altri torto marcio; c'è quello che si mette in viaggio o si chiude in laboratorio per poter suffragare le sue idee con nuove osservazioni o esperienze. La nostra simpatia va naturalmente al secondo, purché si mostri disposto a modificare le sue convinzioni se incontra qualcosa di nuovo che non collima con esse. È facile dirlo, per chi sta al di fuori della disputa con atteggiamento da arbitro, ma non è facile farlo per chi è nella mischia.

Le prime discordanze riguardavano la natura dei fossili. Eliminate le congetture che fossero scherzi di natura o effetti di forze sovrannaturali, si presentò il problema di capire la causa delle estinzioni di un numero enorme di specie e la comparsa di altre nuove. A questi problemi si dedicarono i biologi evoluzionisti.

Alla fine del Settecento i geologi si trovarono divisi sull'origine delle rocce; i *Plutonisti* le volevano quasi tutte di origine ignea, i *Nettunisti* quasi tutte di origine sedimentaria. Ma poi l'accordo non fu difficile (²).

Diversa è la vicenda di un'altra idea conduttrice, nota col nome di *Principio dell'attualismo* (o delle cause attuali) oppure, in una versione più restrittiva, dell'*uniformismo*. È l'idea che, nella storia della Geologia, segna il superamento della fase prescientifica. Fino ad allora dominava il concetto che il passato della Terra fosse stato una sequenza di periodi di tranquillità, separati da un grande numero di cataclismi. Una visione del tutto diversa è quella di una lenta e graduale evoluzione. Non era nuova; in forme varie era stata argomento di meditazione da parte dei filosofi della Grecia antica e traspare dagli scritti di Leonardo da Vinci e da quelli di vari naturalisti dei secoli anteriori all'Ottocento; ma la sua affermazione è legata soprattutto al nome di Charles Lyell, che la espose ampiamente nella sua famosa opera *Principles of Geology* (1830-1833). Nella sua enunciazione più semplice l'«attualismo» suona così: Le grandi trasformazioni avvenute nel passato, delle quali cerchiamo di interpretare le testimonianze,

⁽²⁾ Su questi argomenti Nicoletta Morello ha scritto un eccellente volumetto: La macchina della Terra. Teorie geologiche dal Seicento all'Ottocento. Loescher, Torino, 1979.

sono effetti non di cataclismi, ma di processi simili a quelli attualmente attivi, maturati attraverso tempi molto lunghi. È ovvio che per accettare il concetto dell'attualismo era necessaria la convinzione del presupposto che l'età della Terra non fosse di pochi millenni (come generalmente si riteneva) ma di molti milioni d'anni, argomento che proprio in quel tempo era divenuto oggetto di studio.

L'attualismo, inteso come «principio», risulta recalcitrante a una formulazione precisa che non ammetta eccezioni alla regola. La ragione può essere la seguente: non ha la struttura di un principio come quelli della Fisica, né di una «legge di natura», non è un processo controllabile sperimentalmente; è invece un indirizzo metodologico, una regola per orientare la ricerca e le interpretazioni. Il suo valore consiste specialmente nell'aver mostrato che fino ad allora molti battevano una pista sbagliata. Non è neppure un'ipotesi alternativa. «Catastrofisti» e «attualisti» si sono susseguiti nel tempo, non c'è stata battaglia. Oggi l'attualismo appare quasi un criterio ovvio; tuttavia l'idea di avvenimenti eccezionali di portata planetaria continua a riaffiorare, più o meno consciamente, qua e là, per esempio quando si cerca di spiegare la scomparsa dei Dinosauri pensando a cause diverse da quelle che, in tutti i tempi, hanno determinato l'estinzione di milioni di specie di organismi.

Altro tema lungamente discusso nei suoi molteplici aspetti è quello dell'orogenesi. È evidente che, per poter avanzare ipotesi attendibili sulle cause e sulla meccanica dei corrugamenti montuosi occorre avere una conoscenza degli aspetti geometrici di tali strutture, se non completa su tutto il globo, almeno molto estesa. Ma il desiderio di trovare una spiegazione non ha tanta pazienza e le ipotesi precorrono le osservazioni, non senza qualche delusione.

«Quella benedetta orogenia» scrisse Giovanni Targioni Tozzetti nei *Prodromi* del 1754 «quanto più la studio, e coi sistemi sino ad ora inventati e coll'osservar la Natura, tanto meno l'intendo; e poiché chiaramente conosco che io non posso mai arrivare a intenderla, non mi ci voglio più confondere sopra».

I problemi dell'orogenesi sono strettamente connessi con la mobilità dei continenti, nonostante l'opinione contraria di alcuni studiosi anche relativamente recenti. Per riassumere alcuni aspetti del concatenamento dei problemi, può servire il commento ad alcuni modelli teorici, in forma di disegni schematici.

RAPPORTI TRA MOBILITA' DELLA CROSTA E OROGENESI

Esistono rilievi non dovuti a corrugamento, ma le «catene» montuose presentano strutture in vari modi «piegate», e le pieghe implicano un raccorciamento della crosta terrestre (fig. 1).



Fig. 1 - Modelli schematici di strutture a pieghe. A può essere pensato come dovuto a una contrazione di tutto il globo terrestre, secondo il vecchio paragone della buccia di una mela che si raggrinza. Da quando tale contrazione non è più ammessa, è necessario completare il modello come in B, dove soltanto un involucro superficiale si piega e si raccorcia, e ciò implica l'esistenza di una o più superfici di scollamento dal substrato, dovute a un movimento di traslazione.

Molte catene montuose hanno strutture che denotano movimenti di traslazione su lunghe superfici di distacco: le falde di ricoprimento.

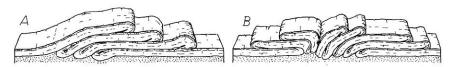


Fig. 2 - Modelli schematici di falde di ricoprimento. $A = \text{tre falde accavallate nello stesso senso. } B = \text{due sistemi di falde in sensi opposti. Esistono catene di entrambi i tipi; le Alpi rientrano nello schema <math>B$.

Se pensiamo di prolungare il movimento traslativo della fig. 1 A, le pieghe si strappano e diventano falde. Il primo geologo che parlò di falde di ricoprimento fu M. Bertrand nel 1884 in un suo studio sulla Svizzera. L'ipotesi ha avuto un cammino travagliato e per qualche decennio ha diviso i geologi in due fazioni: i «faldisti» e i nemici delle falde, o «autoctonisti». È un'ipotesi – dicevano gli autoctonisti – che urta contro una grossa difficoltà: qual è la forza che muove le falde per decine di chilometri? Al che si poteva controbattere: anche le pieghe richiedono movimenti tangenziali, anche se minori. E in ogni caso anche la non esistenza di falde è ugualmente un'ipotesi.

I faldisti erano ancora pochi, quando si affacciò alla ribalta la teoria di Wegener, e allora ripresero fiato; la prospettiva di una sintesi basata sul rapporto tra deriva dei continenti e orogenesi era oltremodo allettante, anche perché consentiva di proporre ipotesi per spiegare la posizione geografica delle catene recenti e antiche. L'orizzonte problematico si allarga e determina una imponente fioritura di studi anche sul terreno.

È da presumere che gli autoctonisti siano scomparsi, o perché hanno cambiato idea, o per estinzione. Tuttavia non tutti i faldisti accettarono l'ipotesi dei continenti alla deriva; alcuni probabilmente per il disagio del motore ignoto col ruolo del deus ex machina, altri per motivi che esporrò in seguito. A complicare la situazione e a spostare l'indice della bilancia dal lato dei fissisti si affacciò all'orizzonte, poco prima del 1940, col tono deciso di chi ha molte buone ragioni da far valere, la teoria degli scivolamenti gravitativi, che riguardava proprio il motore dei movimenti di traslazione.

L'idea di una tettonica gravitativa è nata pensando che certe falde di ricoprimento sono formate da materiali così poco rigidi e tanto sconnessi da non poter trasmettere una spinta da tergo a tutto il loro corpo per grandi distanze. La gravità invece esercita un richiamo su tutta la massa di una falda, come nel caso delle frane.

I concetti in proposito sono illustrati, nella forma più scarna, dalla fig. 3.

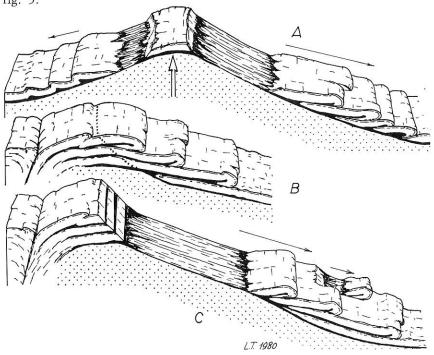


Fig. 3 - A è un modello schematico di tettonica gravitativa: a destra un sistema di pieghe, a sinistra un sistema di falde. In nero una formazione di rocce più plastiche, che ha consentito lo scollamento e lo scivolamento in basso. B è un modello di falde di compressione per spinta da tergo, che può trasformarsi come in C quando un ulteriore sollevamento provoca distacco e scivolamento gravitativo.

Entrambi i modelli appaiono teoricamente verosimili; allo stato attuale delle conoscenze, il secondo, specialmente per scivolamenti su vasta scala, appare più conforme ai casi osservati. Nelle catene (come ad es. l'Appennino) dove falde gravitative sono documentabili, esse risultano dovute a movimenti successivi a fasi di piegamento per compressione.

Si può osservare che anche il modello A ha bisogno di una spiegazione del sollevamento a volta, che implica movimenti di masse interne. Qualche autore ha parlato di «geotumore» che si scarica della sua copertura; altri hanno preferito il paragone con una donna che lascia scivolare via le sue vesti; bella, naturalmente.

LA DERIVA SECONDO WEGENER

A questo punto del discorso occorre ricordare come Wegener intendeva la deriva dei continenti. Il paragone più elementare è un lastrone di ghiaccio galleggiante sull'acqua, dove il ghiaccio corrisponde alla crosta continentale, discontinua, chiamata allora sal o sial, rigida e composta di rocce relativamente leggere come il granito, mentre l'acqua corrisponde all'involucro sottostante, detto sima, più denso ma meno rigido, di composizione simile al basalto.

Oggi questi termini, che facevano riferimento a uno schema troppo elementare (perché identificava il comportamento più o meno plastico con la composizione chimica delle rocce), sono sostituiti da *litosfera* che indica l'involucro esterno più rigido, di composizione litologica varia, e *astenosfera*, che designa l'involucro sottostante, caratterizzato dal suo modo di reagire plasticamente a compressioni e stiramenti, come un liquido ad altissima viscosità. Litosfera è pressoché sinonimo di «crosta», l'astenosfera può identificarsi con una parte superiore del «mantello terrestre».

Il modello fisico del ghiaccio galleggiante è ottimo per rendersi conto che le masse continentali, rigide e leggere, sono immerse nel loro substrato plastico e ne sporgono per un volume proporzionale al rapporto tra le densità, ma per quanto riguarda la mobilità laterale del galleggiante è una maligna trappola. Ricerche geofisiche, consistenti nella misura delle velocità di propagazione delle onde sismiche a varie profondità, hanno rivelato che lo spessore della crosta continentale è di una trentina di chilometri (fino a 70 sotto le maggiori catene montuose) e quello della crosta oceanica si aggira sui 7 chilometri. Guardando il modello della fig. 4 è facile rendersi conto che crosta e mantello oceanici per altri aspetti non corrispondono affatto al modello dell'acqua.

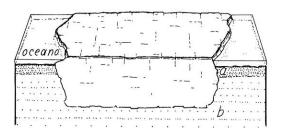


Fig. 4 - Modello di continente galleggiante in un materiale di densità maggiore (punteggiato). Alla profondità b si ha dovunque comportamento plastico, ma la crosta oceanica a è rigida e pertanto le «zattere» continentali risultano come strette in una morsa.

In tali condizioni è ben difficile immaginare uno spostamento laterale delle masse continentali. Questa forte obiezione ha provocato reazioni diverse, a seconda dei substrati culturali e dei caratteri delle persone. I paleontologi in generale erano più inclini ad ammettere ugualmente la deriva, perché spiegava nel modo più convincente la storia della distribuzione degli esseri viventi attraverso i tempi geologici. Altri (la maggior parte dei geologi americani e francesi) erano dell'avviso che la teoria dovesse essere scartata. «Les conceptions mobilistes d'A. Wegener sont progressivament abandonnées sous la pression des faits» scrisse J. Tricart in un trattato di principi e metodi della Morfologia del 1965. Questa frase, sia pure col senno del poi, deve far riflettere sul significato che si deve dare alla parola «fatto». Su questo argomento i cultori di epistemologia della scienza hanno espresso idee che i ricercatori dovrebbero meditare, per non ingannare se stessi e i loro lettori propinando come fatti o come realtà oggettiva le loro interpretazioni di un fenomeno.

Così, per circa mezzo secolo (dal 1915 al 1962) il campo risultò diviso in «fissisti» e «mobilisti». Esistevano anche gli incerti, e questa situazione ha creato uno stato di sfiducia che indubbiamente ha influito sulle scelte personali di indirizzi di ricerca. Non si intraprende volentieri uno studio quando si teme di puntare su un cavallo perdente oppure di essere considerati visionari. Così si diffuse uno stato d'animo di stanchezza piuttosto che di stimolo ad insistere sull'argomento. Una specie di crisi di stagnazione.

I nuovi impulsi vennero indirettamente, per lo più da parte di studiosi che si interessavano a problemi diversi.

Ma, prima di svolgere altre considerazioni, conviene dare uno sguardo alle nuove idee in proposito.

LA TEORIA DELLA TETTONICA A PLACCHE

Per introdurre il nuovo argomento possiamo immaginare un dialogo negli anni cinquanta tra un «mobilista» e un «fissista».

Mobilista: «Le tue osservazioni sono giuste. Non dirò *eppur si muovono*, perché tu mi accuseresti di atteggiarmi a Galileo. Va bene che i continenti sono stretti come in una morsa dalla crosta oceanica rigida, ma se immaginassimo che anche la crosta oceanica si muove?».

Fissista: «Ora diventi ultramobilista. Tu vuoi salvare a tutti i costi quell'ipotesi, aggiungendone un'altra, ugualmente poco plausibile, un'ipotesi ad hoc, come la chiamano i cultori della logica. Non mi convinci».

Ebbene, il fulcro della leva delle nuove concezioni sta proprio nell'idea che anche i fondi oceanici si muovono.

Naturalmente, per essere accettata, l'ipotesi della mobilità dei fondi oceanici non doveva essere presentata nuda, ma rivestita di abiti di buon taglio e alla moda. Con essa prende corpo il discorso del motore, argomento che appartiene ai metodi d'indagine della Geofisica.

Se assumiamo che nell'astenosfera esistono movimenti convettivi, del tipo di quelli che fanno circolare l'acqua in un recipiente riscaldato dal di sotto, queste correnti subcrustali possono trascinare, con la lentezza relativa alla elevata viscosità, placche di crosta, sia continentale che oceanica.

Dal punto di vista fisico, l'esistenza di celle di convezione termica nel mantello non incontra difficoltà, purché la viscosità del mezzo si trovi in un certo rapporto col gradiente termico verticale e con la profondità a cui il materiale si trova. Bisogna però assumere che esistano qua e là sorgenti di calore profonde più intense che all'intorno, per alimentare le colonne ascendenti. Se, come si ammette, il calore deriva almeno in massima parte da processi radioattivi, non c'è peraltro alcuna ipotesi in campo capace di spiegare la disuguale distribuzione delle sorgenti di calore. Tuttavia è accertato che il flusso di calore che emana dalla superficie delle terre e dei fondi oceanici ha in alcuni luoghi valore più che doppio che in altri.

Quando Wegener morì sull'inlandsis della Groenlandia nel 1930, i geofisici avevano da qualche tempo (1906) cominciato a parlare di correnti convettive subcrustali. In uno dei suoi ultimi scritti egli accennò alle idee che in proposito avevano esposto R. Schwinner (che era geologo austriaco) nel 1919 e specialmente G. Kirsch nel 1928, ed espresse l'opinione che correnti profonde potessero spiegare lo smembramento di un

continente. Non sembrava però molto convinto, forse perché la sua idea conduttrice era quella di una deriva generale dei continenti verso Ovest con velocità diverse, mentre l'idea di frammenti di continente vaganti senza una regola semplice trovava resistenza nel suo senso dell'ordine. Ma questa è forse una maligna insinuazione. «Il problema delle forze – scrisse – è appena impostato. Una cosa tuttavia può essere considerata come sicura: le forze che determinano la deriva dei continenti sono le stesse che producono le grandi pieghe montuose» e qui aveva ragione.

La possibilità di una separazione in due parti di un continente ad opera di correnti ascendenti nel mantello e divergenti sotto la crosta fu riesaminata, dopo un trentennio, da A. Holmes, che ne illustrò un ipotetico meccanismo, sulla base di idee esposte alla fine degli anni trenta dal geofisico olandese F. A. Vening Meinesz.

A smuovere le acque stagnanti e a diradare certe nubi arrivò una ventata nuova, portata dalle grandi crociere oceanografiche degli anni cinquanta. Allora sulle terre emerse le conoscenze erano molto avanzate, ma i fondi oceanici, luoghi poco adatti per le escursioni dei geologi armati di bussola e martello, in quanto aree troppo vaste prive di elementari attrezzature turistiche e di osterie, erano quasi del tutto sconosciuti. Occorreva quindi una collaborazione organizzata tra geofisici e geologi. Ed ecco, ad opera degli americani B. C. Heezen, M. Ewing, H. V. Menard, la scoperta della natura vulcanica (basaltica) delle dorsali oceaniche. Un dato elementare necessario per una interpretazione.

La nuova ipotesi è dunque quella della mobilità di tutta la crosta terrestre, anche sotto gli oceani. La crosta è immaginata composta di parti che possono muoversi l'una rispetto all'altra. Un blocco può lacerarsi e i frammenti, dopo movimenti di deriva, possono rinsaldarsi con altri in posizioni diverse dalle precedenti. Placche di crosta, sia oceanica che continentale, di diverse dimensioni, che si frammentano e si ricompongono. Di qui il nome di *Plate tectonics*, tradotto in *Tettonica a placche* o delle placche. Qualcuno ha tradotto «zolle», termine infelice perché evoca i blocchi tagliati dall'aratro o dalla zappa, che hanno forme disadatte a un paragone.

Le prime enunciazioni si trovano negli scritti di R. S. Dietz nel 1961 e di H. H. Hess nel 1962, indipendentemente; la priorità è tuttavia di Hess, che aveva diffuso una prestampa sull'argomento nel 1960.

Il primo titolo è *Sea floor spreading*, perché la chiave del meccanismo di movimento delle placche si trova nell'*espansione del fondo oceanico* che avviene nelle dorsali (fig. 5).

In corrispondenza delle dorsali il flusso termico ha i suoi valori massimi.

Questa spiegazione delle dorsali solleva un nuovo problema: se una placca si accresce da un lato, di mano in mano che si allontana dalla dorsale, che cosa accade nel lato opposto, che avanza? La risposta è illustrata dalla fig. 6.

La fig. 6, esprime l'intelaiatura della teoria della tettonica a placche. Ad arricchirne il contenuto e a corroborarlo si inserirono fin dal principio i risultati di una branca della Geofisica, che fino agli anni sessanta, nello spazio delle scienze della Terra, viveva in un angolino modesto: il Paleomagnetismo.

IL CONTRIBUTO DEL PALEOMAGNETISMO

Il punto di partenza è questo: le rocce con un certo contenuto di minerali ferromagnetici (specialmente i basalti, ricchi di magnetite) conservano l'impronta della direzione del campo magnetico terrestre che esisteva al momento in cui si sono formate. Questa conoscenza era diffusa da tempo, quando, con una certa sorpresa, alcuni studiosi degli Stati Uniti notarono che, esaminando successioni di rocce di varia età geologica, risultava che il campo magnetico terrestre, oltre a mutare lentamente direzione, è stato soggetto a inversioni improvvise di polarità. Nei periodi di polarità invertita rispetto ad oggi, al Nord della bussola corrispondeva il Sud geografico.

Poi si scoprì che un magnetometro trascinato da una nave, registrava l'esistenza nei fondi oceanici, di striscie con polarità normale e inversa. F. S. Vine, D. H. Matthews e Tuzo Wilson ebbero l'idea di applicare questo studio alle dorsali oceaniche, e subito anche altri si dedicarono a questa esplorazione, con risultati di cui la fig. 7 è un esempio.

La simmetria ai lati della dorsale è sorprendente, ed è una spettacolare conferma dell'espansione dei fondi oceanici. Campioni prelevati dal fondo consentono di determinare l'età assoluta delle rocce, coi metodi basati sulla velocità di disintegrazione degli elementi radioattivi; così è

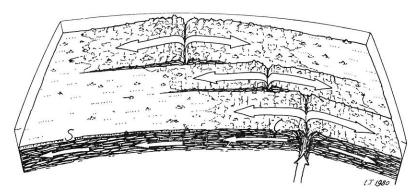


Fig. 5 - Modello di un tratto di dorsale oceanica. Lungo l'asse di questi rilievi sottomarini corre una gola (rift). La crosta oceanica C si muove come indicano le frecce, divergendo dalla gola, dove una corrente ascendente di magma basaltico si consolida generando così nuova crosta. Ai lati della dorsale la roccia basaltica è più antica e appare coperta da una coltre di spessore crescente di sedimenti marini (s). Le dorsali formano un sistema continuo sul globo, e dovunque appaiono tagliate trasversalmente da fratture lungo le quali nastri di crosta scorrono fianco a fianco, con una certa indipendenza.

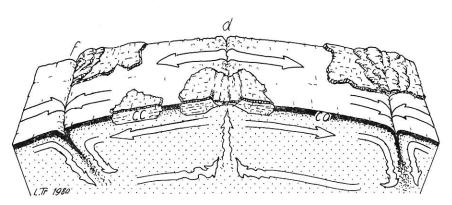


Fig. 6 - Modello generale schematico della tettonica a placche. Nella sezione in primo piano le frecce indicano i movimenti convettivi in seno all'astenosfera (punteggiata). CO (in nero) è la crosta oceanica rigida. CC è la crosta continentale. Al centro la corrente ascendente della dorsale d; ai lati due fosse oceaniche f, dove avviene il risucchio della vecchia crosta, raffreddata e divenuta più pesante.

Le placche continentali, trascinate dalle correnti dell'astenosfera, possono venire a trovarsi in posizioni diverse rispetto alle «celle di convezione». In primo piano al centro: un continente comincia a strapparsi, formando un *rift* continentale, che è sempre ricco di vulcani. A sinistra: un continente (o un'isola) che viaggia indisturbato. Sullo sfondo: a sinistra un continente con un orlo spinto contro una fossa; si forma una catena montuosa del tipo A della fig. 2. A destra due placche continentali vengono in collisione lungo una linea di risucchio; ai loro margini riuniti si forma una catena montuosa del tipo B della fig. 2.

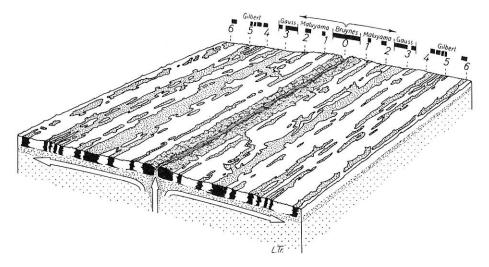


Fig. 7 - Il disegno dimostrativo è stato tratto (con qualche libertà) da una carta paleomagnetica di F. J. Vine, che mostra l'aspetto di un segmento di circa 500 km. della dorsale medio-atlantica, situato a SW dell'Islanda.

Sono punteggiate e in nero le strisce magnetizzate con polarità normale, in bianco quelle di polarità inversa. I numeri indicano l'età in milioni d'anni, a partire dallo zero, che si trova sul *rift* assiale, dove si genera attualmente il nuovo fondo oceanico. I nomi indicano periodi di polarità prevalentemente normale e inversa, e sono quelli dei geofisici che li hanno studiati.

stato possibile determinare, in molte aree oceaniche, l'ordine di grandezza della velocità dei movimenti. Nell'Atlantico l'allontanamento dalla gola assiale ha avuto velocità comprese tra 0,9 e 2,5 centimetri all'anno. Secondo W. C. Pitman e M. Talwani (1972) l'apertura dell'Atlantico avrebbe avuto dapprima il ritmo di 4 cm/anno (da 180 a 81 milioni d'anni fa); poi sarebbe discesa a un minimo di 2,0 (intorno a 9 milioni). Da allora a oggi il valore medio si aggira su 2,4 lungo il parallelo di 35°. Nel Pacifico le velocità sarebbero giunte a 6 cm/anno.

VECCHI PROBLEMI CHE CADONO

Una nuova teoria capace di coordinare organicamente diversi temi di ricerca, al vantaggio di un maggior potere esplicativo può aggiungere quello di mettere in evidenza l'inutilità di insistere su certe piste battute nel passato. Certi problemi risultano male impostati o insussistenti.

Ricorderò qui brevemente due rami secchi che cadono con l'avvento delle nuove vedute. Uno di questi è l'ipotesi di una ciclicità nei fenomeni orogenici. Che l'orogenesi sia stata discontinua e ripetuta nel tempo è nozione vecchia e da tutti accettata, come pure la clausola che esige che una teoria orogenica ne spieghi la discontinuità sia nel tempo che nello spazio (due problemi diversi). È stata avanzata l'ipotesi di una periodicità regolare dell'attività orogenica. Si può insinuare che, in modo larvato, in questa ipotesi riaffiorava l'attaccamento all'antica idea dei cataclismi e dei periodi di riposo interposti. Il risultato è stato che non è riconoscibile alcun ritmo regolare, né localmente, né sull'intero globo. Oggi si può capirne il perché, pensando che la crosta terrestre è sempre stata in movimento e che i corrugamenti non corrispondono ad aumenti periodici di intensità delle forze che li determinano; essi avvengono quando e dove due placche si avvicinano comprimendo e piegando le pile di sedimenti marini accumulatesi ai loro margini.

Altro falso problema, in parte connesso col concetto di periodicità o di ciclicità è quello della nozione di «geosinclinale». A questo termine, nel corso di un secolo, sono stati attribuiti significati sempre più complicati. Già nel 1959 J. Aubouin scrisse un lungo interessante articolo intitolato «A propos d'un centenaire: les aventures de la notion de géosynclinal» (Rev. Géogr. Phys. et de Géol. dyn., Paris 1959); alla fine si nota questa osservazione: bisogna o abbandonare la parola o restringere il significato per poterlo precisare.

Se si definisce geosinclinale «un'area oceanica adiacente a un continente e che per tempi lunghi si abbassa progressivamente favorendo così l'accumulo per migliaia di metri di sedimenti marini» le cose vanno abbastanza lisce, ma se ci si lascia trasportare dalla frenesia di distinguere e classificare tanti diversi tipi di geosinclinali, il concetto iniziale si gonfia con attributi di dubbia pertinenza. Si rischia (ed è successo) di chiamare con lo stesso nome, corredato da aggettivi, fenomeni che non hanno niente o quasi in comune. Il veleno nel concetto di geosinclinale si può individuare dando uno sguardo retrospettivo all'ordine in cui si sono avvicendate assunzioni, problemi, ipotesi:

- 1. Le catene montuose corrugate sono formate da pile di grande spessore di rocce sedimentarie marine.
- 2. Grandi pile di sedimenti implicano infossamenti del fondo marino per lungo tempo (subsidenza).
- 3. Dato l'andamento delle catene montuose, si immagina che i bacini subsidenti abbiano avuto l'aspetto di fosse allungate. Per analogia

con le concavità delle pieghe (sinclinali) viene dato a tali fosse il nome di geosinclinali (J. D. Dana, 1873).

- 4. Dove si formano le geosinclinali? Risposta: ai margini dei continenti, come le cordigliere delle due Americhe. Le catene non costiere derivano da due margini continentali inizialmente separati e poi saldati per avvicinamento.
- 5. Come avviene l'evoluzione da geosinclinale a catena corrugata? Su questo problema e su quelli da esso derivati le ipotesi proposte nell'ultimo secolo sono state varie e troppo complesse per potersi riassumere; ma si può rilevare che nessuno è riuscito a dar risposta enunciando una regola semplice o proponendo un modello generale. Di fronte a questa complicazione bisognava esaminare se i problemi erano stati posti correttamente o no. La proposizione che tutte le catene montuose derivano da geosinclinali (intese nel modo elementare sopra enunciato) oggi risulta non errata, ma oziosa; l'enunciato corrente però era questo: la geosinclinali sono le culle delle catene montuose. Qui nasce l'equivoco, cioè nell'ammissione implicita che ogni geosinclinale nasca ed evolva col destino già segnato di trasformarsi in catena. Oggi appare chiaro che non tutti i bacini marini di sedimentazione debbano necessariamente strapazzarsi a quel modo, quindi non c'è alcun motivo per distinguere con un nome particolare quelli che hanno avuto tal sorte, determinata da un complesso di circostanze indipendenti dalla loro natura. Né quel concetto ci consentiva di prevedere dove e come si formeranno corrugamenti nel futuro. C'era dunque un ragionamento difettoso, e lo stimolo a identificarlo è stato suggerito dalle teorie attuali più ricche di contenuti. Si può aggiungere che è venuto dall'esterno, e non per critica interna. Il termine geosinclinale oggi appare un ramo secco da eliminare (3).

C'È STATA UNA RIVOLUZIONE?

I concetti della Tettonica a placche sono stati accettati (sia pure con qualche riserva su certi punti) da quasi tutti i competenti. L'orizzonte di ricerca si è allargato improvvisamente e la generale fiducia nell'attendi-

⁽³⁾ Nell'articolo *Plate tectonics models of geosynclines* (Earth and planetary Science Letters, 10, North-Holland 1971) W. R. Dickinson così si è espresso: «Benché le credenze della classica teoria sulle geosinclinali abbiano avuto un ruolo prezioso come mezzo per classificare elementi tettonici, esse sono un impedimento non necessario per pensare chiaramente nel futuro».

bilità del nuovo complesso di conoscenze ha allettato molti studiosi a lavorare in un campo che appariva molto fertile. Nella letteratura geologica recente (ricca anche per l'aumento generale dei ricercatori) i lavori basati sulle nuove concezioni sono straordinariamente numerosi. Sentirsi manovratori di placche è un sottile piacere a cui moltissimi desiderano partecipare.

Oggi le vicende fisiche della Terra possono essere raccontate in modo lineare e più comprensibile, perché un filo conduttore lega argomenti che in passato erano separati. Così si spiega anche l'improvvisa fioritura negli ultimi anni di volumetti divulgativi, che ripresentano nella veste nuova e più ricca la deriva dei continenti e la vivacità del nostro pianeta.

Tutto questo è stato un avvenimento di grande rilievo nella storia delle scienze della Terra; spesso si è parlato di rivoluzione, termine che negli scritti divulgativi ha certamente anche una funzione pubblicitaria. Ma quale rivoluzione? Cercare di precisarne il senso può suggerire qualche considerazione epistemologica.

Se per rivoluzione si intende un sovvertimento improvviso, per cui qualcosa di dominante fino ad un certo momento viene rigettato e sostituito, è opportuno distinguere se l'avvenimento rivoluzionario si riferisce all'atteggiamento degli studiosi oppure alla storia delle idee. I momenti critici sono stati due: quello dell'enunciazione della teoria di Wegener e quello dell'enunciazione della Tettonica a placche.

Consideriamo dapprima qual è stato l'atteggiamento degli studiosi nei due momenti. La teoria di Wegener ha aperto un nuovo campo di ricerca e di discussione, considerato valido da alcuni, ma rifiutato da altri, in maggioranza in alcuni Paesi. Ne è nato un dissidio, che dopo alcuni anni ha portato a una stagnazione, a una crisi, che non può certo chiamarsi rivoluzione.

La «Tettonica a placche», con l'inclusione della «deriva dei continenti» e col suo nuovo contorno di idee, ha conquistato la fiducia di quasi tutti gli studiosi, determinando così un fervore esplosivo di nuove ipotesi derivate e di ricerche; è stato un avvenimento che segna una tappa importante nella storia delle scienze della Terra, anche per orientamenti futuri. È avvenuto un mutamento di «paradigma», nel senso (per altro non del tutto chiaro) definito da T. S. Kuhn? A che cosa si sono sostituite le nuove concezioni? Hanno fatto cadere l'ipotesi fissista, che però non può essere considerata come «paradigma precedente», perché, quantunque in certi Paesi fosse sostenuta da una maggioranza di studiosi, non godeva affatto di un consenso generale.

È stato un mutamento di «programma di ricerca», nel senso definito

da I. Lakatos? Oppure un cambiamento di «tradizione di ricerca», nel senso più recentemente definito da L. Laudan? (¹).

Credo che il concetto di Laudan sia quello che meglio si addice al nostro caso, in quanto questo autore afferma che un mutamento di tradizione di ricerca, a differenza di «paradigma» e di «programma», non implica un ripudio di una tradizione precedente e la creazione di una nuova, ma lo considera come naturale evoluzione. Si potrebbe identificarlo con una fase accelerata di un processo evolutivo.

Se, invece di fare riferimento al consenso dei competenti, consideriamo le idee, il «mobilismo» presentato da Wegener con un contorno atto a destare interesse (ancorché con imprecisioni e lacune), aveva un contenuto rivoluzionario. Era una teoria rivale al «fissismo»; la sua accettazione implicava il ripudio dell'idea contraria. Si può tuttavia osservare che il fissismo fino allora non era una teoria, ma un postulato latente, ammesso soltanto perché nessuna «evidenza» poteva far pensare al contrario. Divenne teoria quando, con l'enunciazione di una teoria opposta, trovò persone disposte a sostenerla; e fu sostenuta non con argomenti a suo favore, ma piuttosto con argomenti contro la teoria rivale. Se il successo del «mobilismo» fu parziale per un cinquantennio, l'idea, in sé rivoluzionaria, ebbe effetti di consenso generale soltanto quando fu inclusa in una teoria più ampia.

Dunque l'avvenimento di più vasta risonanza (quello che è stato chiamato rivoluzione) nel campo dell'adesione degli studiosi si è verificato mezzo secolo dopo il lancio dell'ipotesi mobilista, che era rivoluzionaria nel campo delle idee; dopo un tempo molto maggiore considerando i precursori di Wegener.

Ogni disciplina scientifica progredisce con ritmo non uniforme. In un diagramma avente il tempo sulle ascisse e il contenuto esplicativo sulle ordinate, il progresso sarebbe rappresentato da una curva che sale con improvvise impennate. Che cosa provoca le impennate? La tesi che intendo sostenere sulla base delle «avventure» qui riassunte (senza la pretesa di generalizzare) è la seguente: le impennate si verificano quando linee di

⁽⁴⁾ Tradizione di ricerca secondo Laudan è un insieme di imperativi e interdizioni ontologici e metodologici; in termini operativi: un insieme di assunti generali riguardanti le entità e i processi presenti in un certo dominio di studio, ed i metodi appropriati che si devono usare, per indagare su problemi e costruire le teorie in tale dominio («Il progresso scientifico. Prospettive per una teoria - 1977. Traduz. 1979. Edit. Armando, Roma).

ricerca diverse confluiscono dando origine a teorie di più vasto respiro, nelle quali verifiche e falsificazioni risultano più convincenti.

Possiamo ravvisare una prima confluenza nel «contorno» proposto da Wegener all'ipotesi «nuda» della mobilità dei continenti. Il contorno si è formato facendo convergere alcuni problemi della paleobiogeografia, della geofisica, dell'orogenesi attorno ad un nucleo comune, formando così una teoria. Il primo successo, parziale ma molto importante, della teoria è stato determinato dal contorno.

Con l'enunciazione della Tettonica a placche, attorno a un nucleo più ampio (mobilità della crosta continentale e oceanica) le confluenze sono state maggiori. Oltre al paleomagnetismo, già ricordato, le più importanti sono: la vulcanologia e la sismologia, due discipline che avevano fino allora una vita stentata e un po' appartata e che si sono innestate a buon diritto e facendo sentire le loro voci in modo autorevole. Da queste confluenze è nata la Tettonica globale. Anche in questo caso è stato il contorno a determinare le sorti del nucleo.

Dalle avventure narrate si può ricavare qualche altra considerazione. La prima è che in un «paradigma» o «programma di ricerca» o «tradizione di ricerca», una critica esercitata con argomentazioni interne (cioè appartenenti agli argomenti e ai metodi di ricerca in quel campo specifico) difficilmente può portare a sovvertimenti o mutamenti radicali di orientamento. Questi eventi si avverano quando in quel campo confluiscono, talvolta con la violenza di un'irruzione, altre linee di ricerca, appartenenti a campi diversi o a discipline diverse. Quando due teorie, sorte indipendentemente, ampliandosi, si incontrano in un terreno comune, si possono considerare almeno tre casi possibili:

- 1. La più forte, quella col contorno più ricco, soppianta la più debole, se convince che è inconsistente il nucleo della rivale.
- 2. Il campo si divide in due fazioni quando il contrasto investe, senza grandi squilibri, i «contorni» delle due teorie, e rimane quindi in sospeso l'attendibilità dei singoli nuclei.
- 3. I due nuclei possono unificarsi; le eventuali incompatibilità riguardano solo parti accessorie dei contorni, e il loro abbandono risulta giustificato. Con questa confluenza che aumenta il contorno, i problemi appaiono sotto una luce nuova ed altri nascono dal fortunato incontro. Ed ecco l'impennata della linea di crescita di quella disciplina.

Il caso 2 è quello della teoria di Wegener e il n. 3 quello della Tettonica globale. Qualunque sia il risultato, l'incontro o confluenza di diverse linee di ricerca è sempre un avvenimento di rilievo. L'importanza è maggiore quando le linee di ricerca che convergono appartengono a discipline diverse per metodi di ricerca: ogni linea porta con sé un corteo di ipotesi sussidiarie, di implicazioni, di «contorni». Le possibilità di verifiche o di falsificazioni aumentano perché il confronto avviene alla scala non di singole ipotesi, ma di gruppi di ipotesi e perché un controllo basato su metodologie diverse è più efficace.

RIASSUNTO – L'autore espone brevemente e commenta la storia delle teorie sulla mobilità della crosta terrestre, dalle prime ipotesi sulla deriva dei continenti, alla Tettonica a placche e alla Tettonica globale, che negli ultimi anni ha assunto un ruolo di indirizzo dominante nelle Scienze della Terra. L'autore mette inoltre in rilievo l'importanza che, nel progresso della Geologia, hanno avuto le confluenze di linee di ricerca di branche diverse e di altre discipline basate su metodi di ricerca differenti.

ABSTRACT – The author briefly exposes with comments the story of the theories on the mobility of the Earth's crust, from the first hypotheses on continental drift up to Plate Tectonics and Global Tectonics, which have reached a leading role in Earth Sciences. The author furthermore stresses the importance of the confluence of different lines of research, as well as of other sciences – based on different methods of research – in the progress of Geology.

ZUSAMMENFASSUNG – Der vorliegende Artikel befasst sich mit der Geschichte der Theorien über die Mobilität der Erdkruste, von den anfänglichen Hypothesen über die Verschiebung der Kontinente zur Platten- und Globaltektonik, welche in den letzten Jahren in den Erdwissenschaften eine dominierende Rolle zu spielen begannen. Zusätzlich versucht der Autor aufzuzeigen, welche Bedeutung für den Fortschritt der Geologie der Konvergenz verschiedener Forschungsrichtungen sowohl innerhalb der verschiedenen Zweige der Erdwissenschaften als auch anderer wissenschaftlicher Disziplinen zukommt.

Indirizzo dell'autore: prof. dott. Livio Trevisan - Via S. Maria, 34 - 56100 Pisa - Italia