

## PER CAPIRE I FENOMENI GEOLOGICI (2)

UNA TEORIA GLOBALE PER SPIEGARE LA DINAMICA DELLA CROSTA TERRESTRE

di Maria Cristina Speciani

*Nella scienza, quando un'ipotesi interpretativa, formulata dopo lunghi anni di ricerche sperimentali, si articola in modelli e leggi validi per fare previsioni e spiegare dati nuovi, si può ritenere una teoria confermata. Allora, la tettonica delle placche è una teoria, ed è una teoria potente, perché spiega la massima parte dei fenomeni che avvengono sulla superficie della Terra e la trasformano in continuazione. Se è vero che alla formulazione di una teoria si arriva con un processo in cui l'analisi è fondamentale, la forza interpretativa della stessa si comprende attraverso uno sguardo globale. Ed è particolarmente significativo che la trasmissione didattica non tralasci nulla, non tema di far emergere eventuali punti critici, anzi li ritenga uno stimolo alla comprensione del progredire della ricerca.*

**N**on sono passati due anni dal terribile sisma di Banda Ace a cui seguì lo tsunami del 26 dicembre 2004 ed ecco, nel giugno 2006, un nuovo terremoto in Indonesia, di magnitudine elevata (6,3 nella scala Richter), catastrofico per gli esiti sulle popolazioni, provocato anch'esso - come ci hanno informato i quotidiani - «dallo scontro tra la placca euroasiatica e la placca indo-australiana». Così più forte è il desiderio di capire meglio la dinamica della litosfera, proseguendo il percorso che abbiamo già delineato (*Emmeciquadro* n. 26, aprile 2006) e sviluppando, oltre al modello, anche i punti nevralgici della teoria. Navigando su *Internet* si trovano oggi innumerevoli lavori in cui si ripercorre la «storia» delle scoperte che hanno portato alla tettonica delle placche. Mi piace ricordare qui che fin dal 1982 abbiamo proposto un approccio di taglio storico alla tettonica delle placche, quando sembrava eresia ripercorrere lo sviluppo delle scienze piuttosto che fornire le ultime teorie. E occorre chiarire che cosa ha aggiunto all'intuizione originaria l'attuazione di questo percorso con gli studenti nell'arco di vent'anni. Da una parte la convinzione che la scienza è la storia di uomini e di scienziati che sono i veri protagonisti e che solitamente, soprattutto nelle pubblicazioni scolastiche, restano nell'ombra. E ancora la conferma che il desiderio di conoscenza trova risposte non in un



Giugno 2006, eruzione del vulcano Merapi (Indonesia)

elenco di teorie da mandare a memoria, ma in un procedere del pensiero in cui entrano in gioco aspetti analitici e aspetti sintetici. Un percorso in cui i particolari assumono significato, da una parte perché vengono inseriti come «dati» nel quadro che li interpreta e, dall'altra, perché rendono plausibili gli eventuali punti critici sempre presenti in una teoria e non sempre esplicitati come tali.

### Le placche rigide

Riconoscono gli storici della scienza che gli anni Sessanta del secolo scorso offrivano immense opportunità ai geofisici perché nei due decenni precedenti erano state raccolte grandi masse di dati che attendevano di essere elaborati e interpretati. Ma per formulare un nuovo modello per l'evoluzione della Terra occorre scienziati capaci di scorgere nei dati disponibili la rivoluzione dei paradigmi con cui si concepiva la dinamica terrestre fino ad allora. Per questo facciamo riferimento a due figure particolarmente significative: l'americano Jason Morgan, a cui si deve, nel 1967, la prima formulazione del modello globale della tettonica delle placche e, in seguito, la prima definizione del rapporto tra vulcanismo da *hotspot* e «pennacchi»; e il francese Xavier Le Pichon cui si deve, nei primi anni Settanta lo studio dei margini di placca e, in seguito, lo sviluppo di programmi di studio dei fondali sottomarini.

Nel 2002, in occasione della consegna del premio Balzan per la geologia, Le Pichon ha proposto una personale e interessantissima lettura della geologia degli anni Sessanta, di cui riportiamo alcuni brani che testimoniano bene il clima di quegli anni.

Xavier Le Pichon (1937-)



Nel 1959 la dorsale medio-oceanica faceva il suo ingresso trionfale nella tettonica e diventava all'improvviso la struttura più importante del globo. Lo studio geofisico di questa dorsale [medio-oceanica] fu il soggetto della tesi che discussi a Strasburgo nel 1963 quattro anni dopo. Utilizzando tutti gli strumenti geofisici disponibili, in collaborazione con John Ewing, il fratello di Maurice, per la sismica, con Manik Talwani per la gravimetria, Jim Heirtzler per il magnetismo e Mark Langseth per il flusso di calore, in una serie di articoli presentai il primo studio approfondito sulla sua struttura. In questo lavoro cercavo la chiave che mi avrebbe aperto i segreti del suo ruolo tettonico. Questa chiave era alla mia portata ma non fui in grado di coglierla. Sono stato condizionato dalla cultura fissista nella quale ero stato formato e che era quella di tutti i miei capi e colleghi. Rientrando da Strasburgo dove avevo sostenuto la mia tesi, scoprii quello che ormai veniva chiamato il profilo magico di Walter Pitman [...]. Mia moglie si ricorda ancora che le avevo dichiarato: «Le conclusioni della mia tesi sono errate; è Hess ad avere ragione». La scossa fu profonda. L'argomento centrale che mi aveva fatto rigettare il modello di Hess era il flusso di calore misurato sulle dorsali. Le mie misurazioni erano giuste, i miei calcoli erano giusti, ma le mie conclusioni erano errate. Avevo ignorato un parametro nascosto, la cui esistenza fu dimostrata solo diversi anni dopo. Scoprii in quella circostanza ciò che costituisce l'essenza stessa del metodo sperimentale, il riconoscere che nessun modello può essere considerato provato in via definitiva e che deve sempre potere essere messo in discussione da chi lo elabora o da altri. La lezione fu dura. Ma ormai avevamo la chiave. Il lavoro di interpretazione che si apriva davanti a noi era immenso. Furono mesi di attività intensa in un clima di euforia. Utilizzavamo le anomalie magnetiche per determinare l'età e la storia del fondo degli oceani, sotto la direzione di Jim Heirtzler che ci aveva divisi per oceano. Io ereditai l'Oceano Indiano. Ma continuavamo ad utilizzare una cartografia che non ci diceva niente sulla tettonica. Eppure Lynn Sykes aveva dimostrato il legame tra Espansione dei Fondi Oceanici e Sismicità.

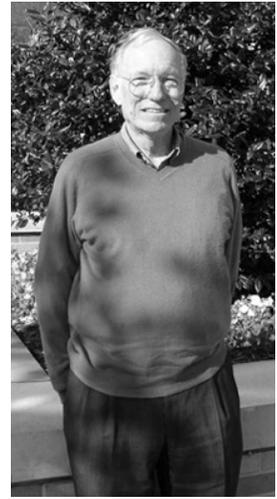
È difficile assegnare un «padre» alla teoria della tettonica delle placche, ma si può dire che la prima formulazione risale al 1967, quando Jason Morgan, allora giovane professore a Princeton, espose le sue idee durante il congresso annuale della *American Geophysical Union*. Egli considerava la superficie terrestre suddivisa in placche rigide e mostrava che l'espansione dei fondali oceanici messa in evidenza da Hess, Dietz e dagli scienziati precedenti poteva essere descritta mediante regole matematiche. L'idea rivoluzionaria di Morgan era che le placche si comportavano come corpi rigidi su una sfera. La comunicazione, in agenda all'ora del pranzo, ebbe pochi ascoltatori e passò quasi un anno prima che ne apparisse una versione scritta.

Parecchi mesi dopo, prima che Morgan pubblicasse il suo lavoro (*Rises, Trenches, Great Faults and Crustal Blocks*, 1968 *Journal of Geophysical Research*), i ricercatori inglesi Dan McKenzie e Robert Parker, ignorando la proposta di Morgan, pubblicavano su *Nature* un modello di evoluzione della crosta terrestre praticamente identico, ma fondato su argomenti molto diversi, di ordine prevalentemente sismologico, partendo da una discussione della cinematica della placca Pacifica.

Decenni più tardi, osservazioni dallo spazio basate sul GPS confermarono «meravigliosamente» le predizioni del modello sul movimento delle placche. Fu un bell'esempio di evoluzione parallela delle idee, che può verificarsi nel momento in cui la ricerca sta per superare una nuova tappa.

Utilizzando i principi enunciati da Morgan, McKenzie e Parker nel 1967, cioè analizzando i confini delle placche, la posizione geografica del polo di rotazione e le velocità angolari ad essi associate, nel 1968 Le Pichon ha costruito una mappa dei movimenti relativi delle sei placche maggiori. Come scrive lui stesso: «Nel mondo della ricerca, le strade radicalmente nuove possono apparire tanto insolite che la comunità tendenzialmente esita a lungo prima di percorrerle. Dal canto mio abbandonai tutto quello che stavo facendo per applicare le idee di Morgan alla predisposizione di un modello cinematico globale a sei placche che potesse prendere in considerazione l'essenziale delle manifestazioni tettoniche alla superficie della Terra. Furono necessari cinque mesi. La tettonica stava ormai entrando nell'era della quantificazione. Era possibile determinare il tasso medio di deformazione utilizzando le frontiere di placca, ricollegarlo alla sismicità e alle diverse manifestazioni geologiche. Sismologia e tettonica si erano ormai riconciliate e stavano per iniziare una fruttuosa collaborazione che fu magnificamente illustrata dai miei colleghi sismologi del Lamont, Isacks, Oliver e Sykes, in un articolo che utilizzava i risultati del mio modello a sei placche.»

Nel 1973 Le Pichon ha pubblicato il primo trattato sui margini di placca, *Plate Tectonics*, accolto molto bene nel mondo scientifico e per molti anni il testo di riferimento più autorevole anche per l'originalità dell'approccio che prendeva in considerazione ogni tipo di frontiera di placca.



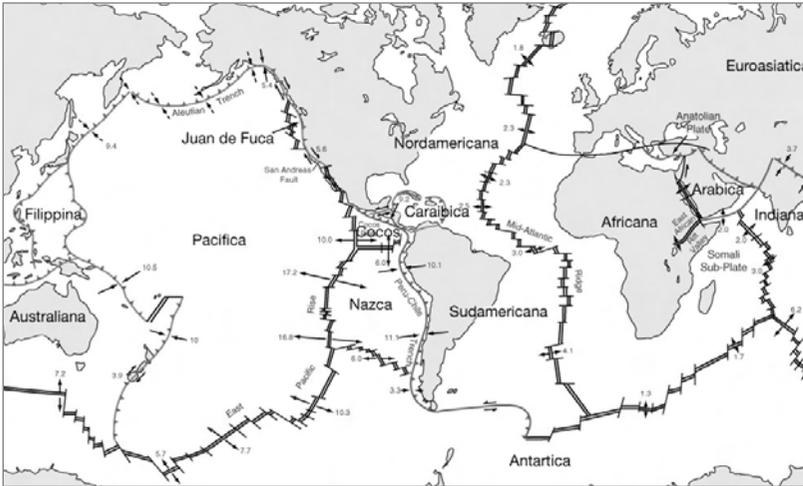
William Jason Morgan (1935-) nel 2003, il giorno dopo aver ricevuto la *National Medal of Science* (USA)

## I punti fondamentali del modello

Illustriamo, in termini volutamente schematici, i punti fondamentali della tettonica delle placche, così come vennero formulati tra il 1967 e il 1968, e soprattutto attraverso immagini significative, ricostruite appositamente facendo riferimento a fonti iconografiche diverse.

*La litosfera del pianeta è divisa in un certo numero di placche*

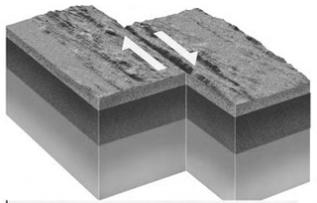
In base alla distribuzione degli epicentri dei terremoti e dell'attività vulcanica, nel 1968 Le Pichon aveva identificato sei placche: Americana, Eurasia, Africa, India, Antartide e Pacifico; altre sei sono importanti: Nazca, Somalia, delle Filippine, Araba, di Cocos, Caraibica.



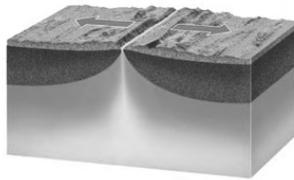
Alcune placche sono formate da sola litosfera oceanica, altre di sola litosfera continentale, e altre infine di entrambi i tipi di litosfera. Le placche sono in grado di muoversi una rispetto all'altra e slittano su uno strato relativamente plastico coincidente con l'astenosfera; le interazioni tra le placche avvengono lungo i loro margini.

### *I margini di placca*

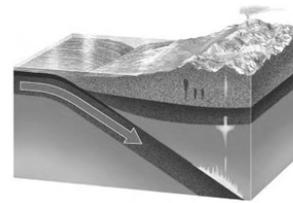
Relativamente al tipo di movimento delle placche le une rispetto alle altre, si distinguono diversi tipi di margini.



Lungo i margini trasformativi o passivi, le placche scorrono l'una a fianco dell'altra senza che vi sia né produzione né distruzione di litosfera.



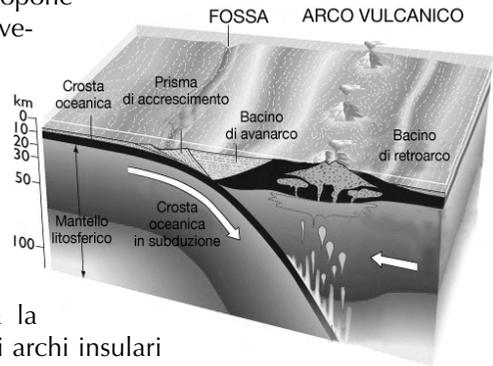
Lungo i margini divergenti due placche adiacenti si allontanano una dall'altra, e, a seguito di risalita di materiale astenosferico, si genera nuova crosta oceanica. Per questo i margini sono anche detti costruttivi o zone di espansione.



Lungo i margini convergenti due placche si scontrano e una delle due si inflette sotto l'altra, si incunea nell'astenosfera e viene progressivamente consumata. Per questo i margini sono anche detti distruttivi o zone di subduzione.

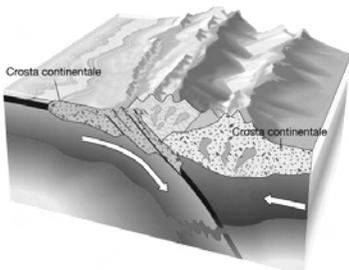
*Il sistema arco-fossa*

Il modello classico che la tettonica delle placche propone per le zone di subduzione (sistema arco-fossa), prevede: una zona di fossa, una zona di subduzione, intervallo arco-fossa (o bacino di avansarco) in cui si accumulano sedimenti, arco magmatico (che nel caso di archi vulcanici insulari è accompagnato da un arco sedimentario più esterno); bacino di retroarco.



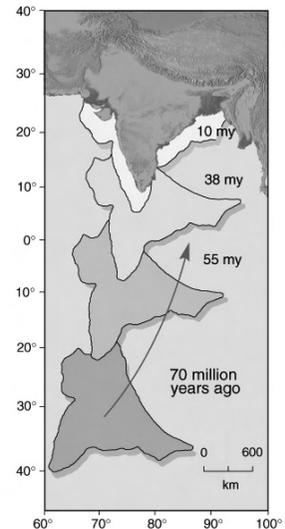
La subduzione è forse il fenomeno più significativo nella tettonica globale. Essa non solo spiega cosa accade alla vecchia litosfera, ma giustifica la maggior parte dei fenomeni vulcanici e sismici, gli archi insulari che ne sono l'espressione superficiale, le fosse oceaniche che segnano il margine delle zone di subduzione rivolto verso il mare, le catene montuose che possono formarsi dalla convergenza di placche in via di subduzione le cui parti emerse (i continenti) giungono a collidere.

La catena dell'Himalaya è la conseguenza più spettacolare dell'incontro tra le porzioni continentali di due placche convergenti.



Quando un fenomeno di questo tipo si verifica, nessuna delle due placche può entrare in subduzione a causa della bassa densità delle rocce costituenti. La crosta continentale si piega, si inarca, viene spinta in alto o di lato: si formano le catene di montagne.

La collisione tra l'India e l'Asia avvenuta circa 50 milioni di anni fa indusse il corrugamento del margine continentale eurasiatico e il suo accavallamento sulla placca indiana. La continua convergenza delle due placche per milioni di anni ha portato al lento sollevamento della catena himalayana e dell'altopiano del Tibet.



**Geodesia spaziale e tettonica continentale**

Il modello della tettonica delle placche è stato, per molti anni, l'unico riferimento per studiare le deformazioni che si producono in ambito continentale. Ma la descrizione - prevalentemente qualitativa - del fenomeno sembrava insufficiente per ottenere una reale comprensione dei processi tettonici.

A partire dall'inizio degli anni Novanta, grazie alla geodesia spaziale, comincia una nuova era nello studio della tettonica attiva. Infatti, grazie alla rete di siti GPS si può ottenere la posizione di qualunque punto emerso con una precisione superiore al centimetro e si possono ripetere queste misurazioni tutte le volte che lo si desidera. Così, l'esplorazione delle zone di subduzione assume una nuova dimensione: si può accedere alla deformazione temporanea legata al ciclo sismico e si possono ricollegare le manifestazioni tettoniche osservate al ciclo sismico stesso. Inoltre si riesce a studiare la geodinamica interna di una zona molto complessa come l'Asia sudorientale. Infine, la rete GPS fornisce indicazioni molto preziose sull'accumulo della deformazione elastica, perciò diventa possibile monitorare zone di faglia per valutare meglio i rischi sismici.

## Per comprendere la tettonica globale

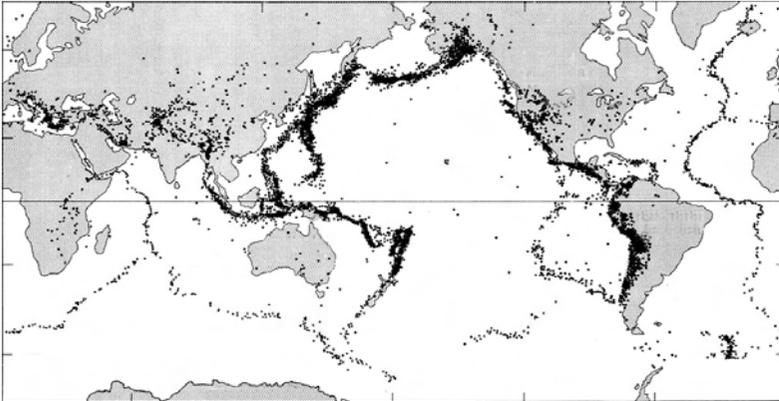
Rileggiamo ora la distribuzione globale di terremoti, vulcani e catene montuose alla luce del modello.

### *Le zone sismiche*

Le fasce caratterizzate da terremoti con ipocentro poco profondo (meno di 70 km) corrispondono all'asse di dorsali medio-oceaniche; c'è attività vulcanica di tipo basaltico.

Le zone con terremoti poco profondi e senza attività vulcaniche (faglia di S. Andreas in California e dell'Anatolia in Turchia) corrispondono a movimenti laterali tra placche.

In corrispondenza delle fosse oceaniche associate a sistemi di archi insulari (per esempio nell'Oceano Pacifico occidentale) si possono avere sia terremoti superficiali che intermedi (tra 70 e 300 km) che profondi (300-700 km) legati a fenomeni di subsidenza (piano di Benjoff).

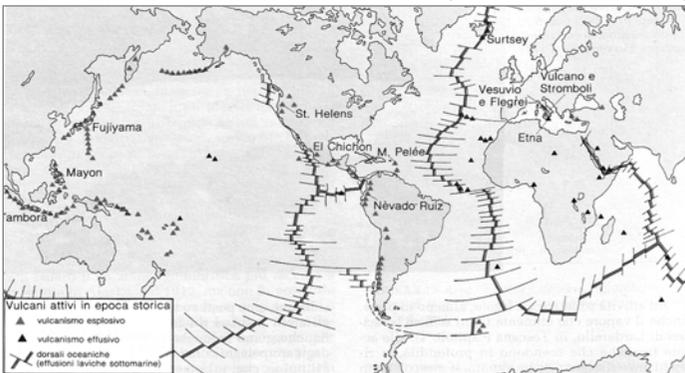


In corrispondenza delle zone continentali (per esempio da Burma fino al Mediterraneo) i terremoti superficiali sono associati a elevate catene montuose e sono rari i terremoti a ipocentro profondo (come avvengono a volte in Sicilia) che indicano un collegamento con grandi forze di compressione.

### *I fenomeni vulcanici*

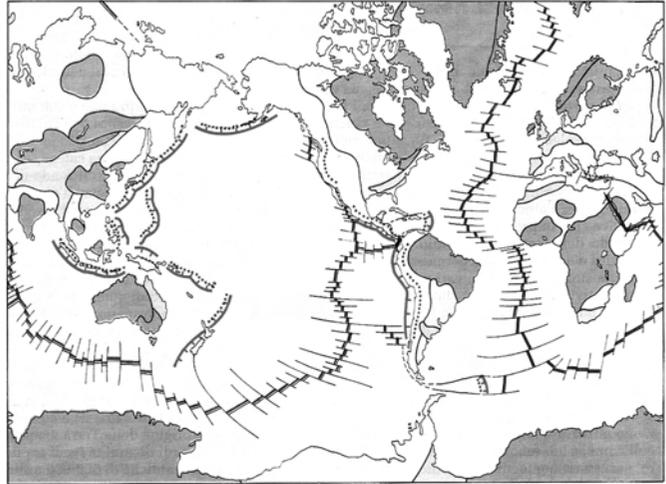
Sono quattro gli ambienti geodinamici in cui un processo magmatico può aver luogo, determinando la genesi, la risalita, e la venuta a giorno

di una massa magmatica: zone di dorsale oceanica e centri di espansione retro-arco; zone di subduzione (archi insulari e margini continentali attivi); zone intra-placca oceaniche, in cui si generano isole oceaniche e *seamount*; zone intra-placca continentali (*flood basalt*, zone di *rift* e zone a magmatismo potassico e ultrapotassico non connesse a *rifting* continentale).



*L'orogenesi*

La formazione delle montagne avviene ai margini di placche convergenti. Tutte le catene che fungono da sutura tra masse continentali diverse sono il prodotto di una collisione continente-continente (tra due placche con crosta continentale). Per esempio, le catene mediterranee sono il frutto dello scontro tra Africa e Europa; la catena dell'Himalaya origina dalla collisione del continente indiano con la placca eurasiatica; gli Urali si sono formati dalla collisione tra Europa e Siberia; gli Appalachi derivano da uno scontro antico tra Africa e America prima che i continenti venissero separati con l'apertura dell'Oceano Atlantico.



**I problemi aperti**

Alcune domande non hanno trovato soluzione esauriente nel modello.

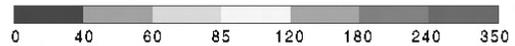
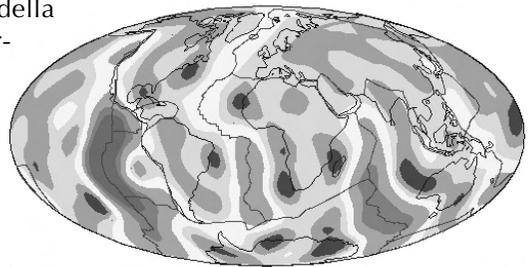
*Il flusso di calore*

Solo nel 1974 si riuscì a costruire per la prima volta un quadro su scala globale dei valori del flusso di calore nelle diverse zone della Terra.

La media del flusso di calore in tutti i continenti è 1,5 HFU.

Il flusso di calore decresce con l'aumentare della distanza dal centro degli oceani: lungo le dorsali oceaniche il flusso è maggiore di 2HFU; nei bacini adiacenti è circa 1,3 HFU; è inferiore a 1 HFU nelle fosse.

Sono zone ad alto flusso di calore: tutti i principali sistemi di dorsali oceaniche (> 2HFU); la catena alpina in Europa; gli stati occidentali dell'America; i bacini marginali del Pacifico occidentale (circa 1,3 HFU). Sono zone a basso flusso di calore: gli scudi continentali, le piattaforme sedimentarie, le zone oceaniche più antiche.



Flusso di calore = quantità di energia termica che sfugge dalla terra per unità di area e di tempo

Unità di misura = HFU (*Heat Flow Unit*) equivalente a  $1 \mu\text{cal}/(\text{cm}^2 \text{ s})$

Si determina moltiplicando il gradiente geotermico (aumento di temperatura in °C, ogni 100 m di profondità) per la conducibilità termica locale. Sulle terre emerse ci possono essere fattori di disturbo; tecnicamente è più facile eseguire queste misure sui fondali oceanici: per mezzo di un carotiere per una profondità di 4-8 metri e con elementi termosensibili.

Il gruppo completo dei dati poteva venire approssimato da funzioni matematiche per chiarire quali forze possono determinare i movimenti della crosta. L'ipotesi formulata è che l'evoluzione termica della Terra dipende dalla concentrazione e dalla durata degli isotopi che producono calore (radioattività): tre miliardi di anni fa c'era probabilmente un maggiore flusso di calore superficiale, rendendo più sottili e più facilmente fratturabili le zolle di crosta terrestre. Si può presumere che in futuro (i dati topografici corrispondono finora con quelli del modello matematico di raffreddamento delle placche) la litosfera continuerà a ispessirsi e l'astenosfera diventerà più viscosa a causa del continuo raffreddamento della terra e del lento decadimento delle sorgenti di calore radioattivo. Ci si potrebbe aspettare che, fra un paio di miliardi di anni, gli scudi continentali andranno aumentando di spessore, sviluppando efficaci ancore «viscose» che porranno fine ai movimenti delle placche.

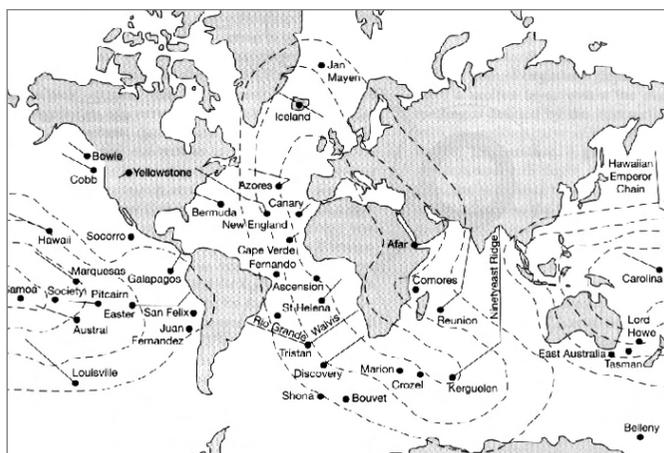
### *I punti caldi (hot spot)*

Attualmente, ma soprattutto nel passato, notevoli quantità di magma vengono eruttate da centri vulcanici situati all'interno delle placche litosferiche. Le lave sono basaltiche come quelle delle dorsali, ma contengono percentuali più alte di metalli alcalini. L'ubicazione di questi centri non trova una immediata risposta in termini di tettonica delle placche e, nel corso degli anni, sono stati proposti diversi modelli per spiegarne esistenza e caratteristiche.

Quello che gode di maggior credito prevede l'esistenza di anomalie termiche stazionarie nel mantello superiore dette *hot spot*, che costituirebbero il luogo di ascesa di cosiddetti pennacchi di mantello in una sorta di meccanismo convettivo. Il materiale costituente i penacchi andrebbe incontro a fusione parziale nel corso della sua risalita per decompressione adiabatica, generando magmi detti «basalti di isole oceaniche» a composizione variabile in funzione della profondità e del grado di fusione

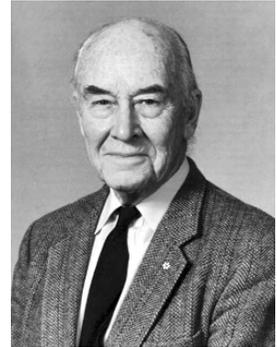
parziale, della composizione della sorgente e di una più o meno complessa serie di contaminazioni e miscelamenti nel corso della risalita.

Non tutto il magmatismo intra-placca, può essere facilmente ricondotto a una genesi da *hot spot*, infatti alcune province vulcaniche continentali sono chiaramente connesse con tettonica di tipo estensionale e fenomeni di *rifting*. In questi casi il magmatismo costituirebbe una risposta passiva all'assottigliamento crostale causato da *stress* differenziale all'interno di una placca.

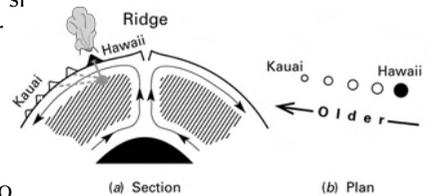


Nel 1971 Morgan per primo aveva proposto che i pennacchi caldi - flussi caldi di materiali relativamente primordiali - nascessero dalla profondità del mantello e dessero origine agli *hot spot*. Ancora oggi non esiste una definizione di pennacchio ampiamente accettata, e spesso gli scienziati usano il termine riferendosi a modelli diversi. A testimoniare che il problema è ancora controverso e che, come sosteneva nel 2004 Alexei Ivanov «*plume in mind of one researcher is not the same as the plume in mind of others*», è l'attualità di *mantleplumes.org* un sito per discutere l'origine del vulcanismo da *hot spot*.

Il punto caldo più vistoso e di più sicura interpretazione è quello delle Hawaii, che già nel 1963 il canadese John Tuzo Wilson, il geofisico che aveva identificato le faglie trasformi, aveva rappresentato come nell'immagine. Wilson aveva ipotizzato che il vulcanismo delle Hawaii, attivo per periodi di tempo estremamente lunghi, era possibile solo se sotto le placche fossero esistite aree relativamente ristrette, di lunga durata e eccezionalmente calde (chiamate *hot spot*) che avrebbero fornito sorgenti localizzate di energia ad alto calore (pennacchi caldi) per sostenere il vulcanismo. In particolare, Wilson ipotizzò che il tipico allineamento delle isole nell'arcipelago hawaiano risultava dal fatto che la placca pacifica si sposta su un profondo *hotspot* presente nel mantello. Oggi si ritiene che molti *hotspot* siano presenti sotto i continenti (per esempio sotto la placca africana) o vicino a margini di placca divergenti, come le catene medio oceaniche o sotto le Azzorre o le Galapagos. Anche il vulcanismo (i *geyser* o le manifestazioni termali) che caratterizza la regione del Yellowstone National Park, nell'America settentrionale, sembrerebbe dovuto alla presenza di *hotspot*.



John Tuzo Wilson (1908-1993)



Nel 1963 J. Tuzo Wilson rappresentava l'origine delle Hawaii come esito di vulcanismo da *hot spot*

## I problemi aperti

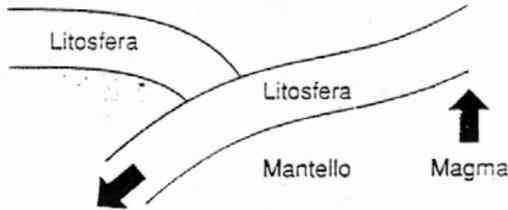
Le placche tettoniche non si muovono a caso, ma sono guidate da forze precise. Gli scienziati non sono ancora in grado di descrivere precisamente queste forze, né di comprenderne pienamente la natura, ma molti credono che esse si originino nella zona più profonda della Terra.

Se l'ipotesi dell'esistenza di celle di convezione nel mantello è condivisa, restano molte domande: quante celle di convezione esistono? dove e come esse si originano? qual è la loro struttura?

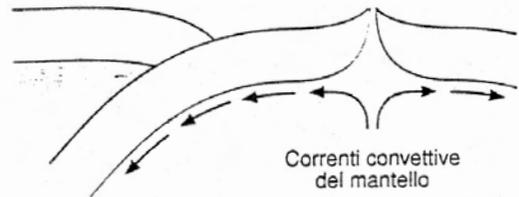
La convezione implica una fonte di calore e il calore interno alla Terra può venire da due fonti: il decadimento radioattivo (in particolare di uranio, torio e potassio) e il calore residuo - energia gravitazionale rimasta dalla formazione del pianeta. Come e perché il calore interno si concentra in regioni particolari e contribuisca a formare celle di convezione resta un mistero.

Fino al 1990 la maggior parte degli scienziati pensava che il meccanismo principale per lo spostamento delle placche, legato alle celle convettive nel mantello, fosse l'espansione oceanica.

In più, parecchi geologi attribuivano all'intrusione del magma entro i margini divergenti una funzione significativa per mantenere il movimento delle placche e la subduzione era considerata un processo secondario, solo una conseguenza dell'espansione dei fondali.

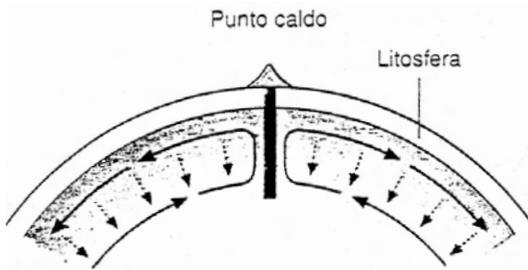


La placca viene spinta ad avanzare dal peso del materiale eruttato dalla dorsale

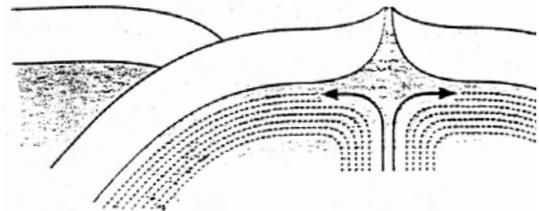


La placca è trascinata passivamente, per attrito, dalla corrente convettiva

Molti scienziati ritengono che le forze associate alla subduzione sono importanti quanto l'espansione dei fondali. Già nel 1994 il giapponese Seiya Uyeda sosteneva che «la subduzione gioca un ruolo fondamentale nel meccanismo di spostamento delle placche; oggi è generalmente considerata la forza che origina il moto delle placche.



Correnti ascensionali provenienti da grande profondità producono punti caldi sulle dorsali e il materiale che si espande lateralmente trascina le placche



La placca non è altro che la parte superficiale fredda e rigida di una grande cella convettiva che raggiunge la superficie terrestre

Noi sappiamo che il movimento delle placche è dovuto a forze interne al pianeta, ma nessuna, tra le ipotesi formulate, è avallata da fatti certi; nessuno dei meccanismi proposti riesce a spiegare tutti gli aspetti del movimento e dal momento che queste forze sono così profonde, nessun meccanismo può essere verificato direttamente e provato oltre ogni ragionevole dubbio.

Non c'è dubbio che le placche si sono mosse nel passato e si continuano a muovere, ma i dettagli del perché e del come esse si muovono continueranno a sfidare la scienza ancora per molto tempo. ❖