

La terra vista da un geologo

Giorgio Vittorio Dal Piaz

L'uomo moderno non sembra accorgersi, durante la frenetica vita quotidiana, di essere ancora profondamente radicato sulla Terra, a cui rivolge la dovuta attenzione solo in occasione di eventi catastrofici che lo riguardano in modo diretto, ma che poi dimentica rapidamente assieme alla lezione che potrebbe ricavarne. La geologia ha il privilegio di decifrare la vita della Terra, svelando ciò che può sembrare nascosto, ma è scritto chiaramente nella sua epidermide e nelle viscere. Cercheremo di leggere insieme il libro della natura, con la convinzione che la geologia, oltre ai suoi compiti istituzionali nella conoscenza del territorio e nella prevenzione dei rischi, possa avere un ruolo non irrilevante anche per valorizzare l'ambiente alpino.

Ritenuta per secoli immobile al centro dell'universo, la Terra è in realtà un macrosistema in disequilibrio, caratterizzato dalle sue ancestrali origini (4600 milioni di anni fa) da una dinamica globale, con ciclici trasferimenti di materia e di energia. Le eruzioni vulcaniche e i terremoti sono la prova più palese della sua vitalità, con effetti spesso devastanti che l'uomo ha dovuto fronteggiare dai più remoti primordi. Nel 79 d.C. l'eruzione esplosiva del Vesuvio causò la scomparsa di Pompei e di Ercolano e costò la vita a Plinio il Vecchio, accorso a Stabia (Castellamare) con la flotta per soccorrere la popolazione in fuga. Lo sappiamo dalla famosa epistola del nipote Plinio il Giovane e ne vediamo una mirabile rappresentazione nel quadro *Vesuvius* di Andy Warhol. Si tratta di manifestazioni ormai ben note dell'energia termica della Terra, grazie alle spettacolari visioni notturne delle fontane di lava e delle colate dell'Etna in eruzione (fig. 1) e

di altri vulcani attivi del mondo, trasmesse in televisione.

I terremoti sono l'espressione più vistosa e spesso luttuosa dell'instabilità meccanica della Terra, caratterizzata dal lento accumulo e dall'improvvisa liberazione di quantità talora enormi di energia prodotta da rotture della crosta terrestre. Attualmente si conoscono le zone soggette a rischio sismico, il tempo di ritorno e la grandezza (magnitudo) del massimo evento atteso per una data struttura sismogenetica, ma non si è ancora in grado di formulare previsioni temporali sufficientemente precise e affidabili per avvertire la popolazione di un pericolo imminente. Occorre quindi convivere con i terremoti, intensificando gli interventi preventivi tesi alla mitigazione del danno.

Eruzioni vulcaniche e terremoti avvengono sotto i nostri occhi e si svolgono in tempi che possiamo misurare con il nostro orologio. Vi sono tuttavia altre tracce della vitalità della Terra ed altre manifestazioni delle sue profonde e continue trasformazioni che sfuggono alla percezione dell'uomo perché l'evento naturale è già avvenuto oppure, se tuttora in atto, si svolge in modo così lento da non consentirne l'osservazione diretta. Parliamo di processi dinamici, termici e metamorfici la cui cinetica è scandita dal tempo geologico, misurabile in milioni di anni. Si tratta di eventi che le scienze geologiche ricostruiscono *a posteriori* decifrando le tracce indelebili che essi hanno impresso nelle rocce e sono interpretabili sulla base del confronto con i processi in atto. Il libro della natura è un diario ricco di preziose informazioni sulla lunghissima, affascinante e talora travagliata storia del nostro piano-



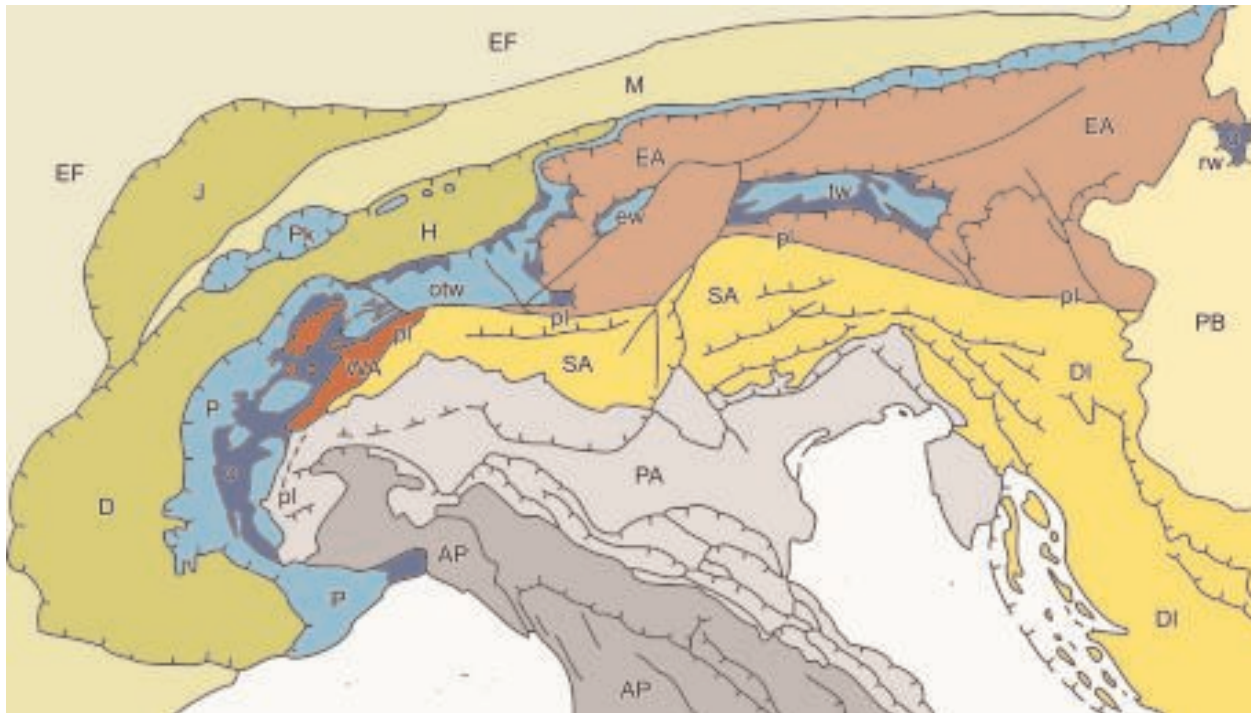
1. Spettacolare eruzione notturna dell'Etna nel 2002 (courtesy National Geographic, 756046)

ta: non è difficile leggerlo, basta uscire dalle città, fermarsi e guardarsi attorno.

Tra i fenomeni più grandiosi che caratterizzano, dai suoi inizi, l'evoluzione dinamica della Terra e le sue trasformazioni possiamo ricordare lo sviluppo di profonde depressioni della superficie terrestre, dette fosse tettoniche (ad esempio la *rift valley* dell'Africa orientale), l'apertura e la scomparsa di un oceano (substrato roccioso compreso), la migrazione dei continenti più volte assemblati e smembrati, la formazione di cate-

ne montuose (orogenesi) e il loro smantellamento (figg. 2a-b).

La mobilità a scala globale (geodinamica) è accompagnata dalla genesi di magmi che consolidano in corpi ignei infracrostali (plutoni, filoni) e risalgono in superficie (vulcani), dalla formazione di successioni sedimentarie di vario tipo in ambiente continentale e marino, dalle loro deformazioni duttili (pieghe) e fragili (fratture, faglie) e dalla loro ricristallizzazione in litotipi scistosi e gneissici (metamorfismo)



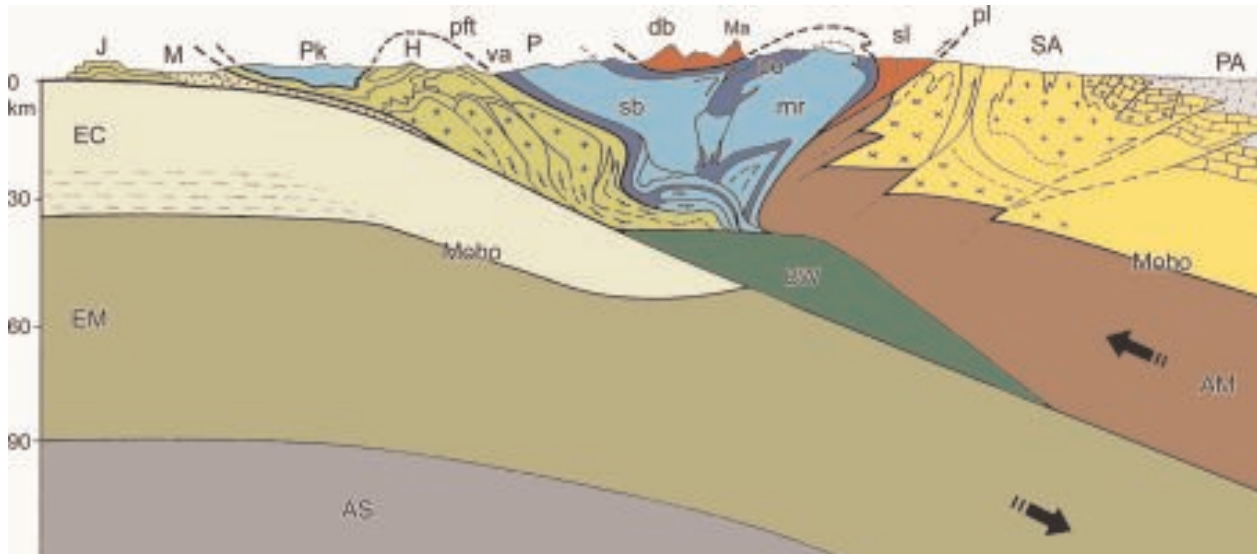
2a. Carta geologica delle Alpi (Dal Piaz *et al.*, 2003). La catena è formata da falde derivate dal margine settentrionale del continente africano (Austroalpino orientale EA e occidentale WA), traslate verso nord e nord-ovest al di sopra delle unità ofiolitiche (O: blu) che costituiscono la sutura dell'oceano mesozoico. Al di sotto vi sono le falde derivate dal margine continentale europeo, costituite dalla Zona Pennidica (P: falde pennidiche delle Alpi occidentali; Pk: Klippen delle Prealpi Romande e del Chiabiese; otw: finestra tettonica dell'Ossola-Ticino; ew-tw-rw: finestre dell'Engadina, Tauri e Rechnitz) e dalla Zona Elvetico-Delfinese (HD); seguono, verso l'avampaese europeo indeformato (EF), il bacino della molassa (M: avanfossa oligo-miocenica) e la catena pellicolare del Giura franco-svizzero (J). A sud la catena collisionale Austroalpino-Pennidica è delimitata da un grande sistema di fratture (pl: Lineamento periadriatico) che la separano dal Sudalpino (SA), frammento di crosta africana deformato dopo la collisione continentale con strutture a vergenza padana. A est la catena delle Dinaridi (DI) e il Bacino Pannonico (PB), a sud l'avampaese padano-adriatico (PA) e la catena degli Appennini (AP). Linee con dentelli: intersezione dei principali sovrascorrimenti con la superficie topografica; i dentelli sono rivolti verso l'unità tettonica che sta sopra (a tetto)

quando, coinvolti in zone orogeniche, sono traslati a grandi profondità (subduzione) e poi riportati in superficie (esumazione) ove ora possiamo esaminarli.

Si tratta di processi ricorrenti, con cicli della durata di decine o centinaia di Ma, concentrati

in una rete di ristrette fasce di debolezza meccanica della litosfera terrestre (zone mobili) che circondano aree relativamente molto più stabili e resistenti (cratoni).

Le grandi deformazioni della crosta terrestre, lo sviluppo delle catene montuose e la loro com-



2b. Sezione litosferica della catena collisionale nelle Alpi nord-occidentali. 1) Unità di origine africana, Austroalpino: Zona Sesia-Lanzo (sl) e falda della Dent Blanche (db), comprendente il Cervino (Ma). 2) Unità ofiolitiche derivate dalla sutura dell'oceano mesozoico ligure-piemontese (po). 3) Unità di origine europea: 3.1) Zona Pennidica (P): falde Monte Rosa (mr) e Gran San Bernardo (sb), sottostanti unità vallesane (va), lembi esterni delle Prealpi Romande e del Chiablese (Pk), thrust pennidico frontale (pft); 3.2) Zona Elvetica (H): scaglie di basamento cristallino (crocette), comprendenti il Monte Bianco, e unità dei sedimenti di copertura. 4) Bacino-avanfossa della molassa (M). 5) Giura franco-Svizzero (J). 6) Unità completamente sepolte segnalate dalle proiezioni sismiche, di natura incerta e probabile origine europea (BW). 7) Litosfera europea: crosta continentale (EC) e mantello (EM). 8) Litosfera africana: crosta continentale delle Alpi meridionali (SA), con struttura vergente verso l'avampaese padano-adriatico indeformato (PA) e sottostante mantello (AM). Lineamento Periadriatico (pl), sistema di faglie al limite tra il prisma collisionale austroalpino-pennidico e le Alpi meridionali. Astenosfera (AS)

plessa architettura (tettonica) erano alcuni dei problemi scientifici più dibattuti nell'Ottocento, con particolare riguardo alla nascita delle Alpi, rese popolari dai diari di viaggio di H.B. de Saussure (1779-1796). Alcuni naturalisti dell'epoca ne attribuivano la genesi a profonde forze interne (endogene), in particolare all'attività di fusi magmatici e alla deformazione della crosta terrestre prodotta dalla risalita di corpi granitici (teoria del plutonismo). Altri puntavano invece sul graduale raffreddamento del globo, con conseguente contrazione e fratturazione della crosta

terrestre (teoria del contrazionismo). In entrambe le concezioni si riteneva che i processi deformativi fossero governati da spostamenti verticali, di tipo positivo (sollevamenti, catene montuose) o negativo (sprofondamenti, fosse tettoniche, geosinclinali), controllati da forze gravitazionali.

Nella seconda metà dell'Ottocento furono riconosciute situazioni stratigrafiche anomale, laddove successioni rocciose più antiche giacevano al di sopra di successioni più recenti. Tali anomalie vennero interpretate come effetto dello

spostamento orizzontale, su distanze di decine o centinaia di chilometri, di sottili ed estese scaglie di crosta terrestre (falde, lembi di ricoprimento) e dell'appilamento (sovrascorrimento) delle une sulle altre (concezioni mobiliste, teoria delle falde). Si sosteneva, in questo modo, lo sviluppo di grandi processi di raccorciamento in senso orizzontale di una zona mobile della crosta terrestre, bilanciati dal suo ispessimento; in altre parole, la progressiva compressione di un grande bacino marino (geosinclinale) avrebbe causato la progressiva espulsione delle successioni rocciose in esso contenute e il loro accavallamento, per formare una catena orogenica a falde di ricoprimento. Questa nuova teoria mobilista fu concepita e sviluppata nelle Alpi e Prealpi svizzere dall'ingegnere minerario francese Bertrand (1884) e dai geologi svizzeri Schardt (1893) e Lugeon (1902), e poi estese alle Alpi orientali (Termier, 1904), all'arco delle Alpi occidentali (Argand, 1909-1916), alla catena alpina (Staub, 1924) e all'intero sistema orogenico alpino-himalaiano (Argand, 1924), mettendo in evidenza il ruolo fondamentale della collisione tra Eurasia e Gondwana (Africa-India) e fornendo alla controversa teoria di Taylor (1910) e Wegener (1912) sulla deriva dei continenti il decisivo supporto di rigorosi dati geologici e tettonici a scala globale (riferimenti bibliografici in Dal Piaz 1996, 2001).

Le geniali ricostruzioni di Argand e di Staub influenzarono profondamente le ricerche sulle catene collisionali sino alla comparsa, negli anni sessanta, di una nuova teoria di geodinamica globale, detta Tettonica delle placche (*Plate Tectonics, New Global Tectonics*) che, come Venere, nacque dal mare, grazie alle scoperte innovative acquisite nel dopoguerra con la sistematica esplorazione dei fondi oceanici (Hallam 1973; Bosellini 1978; Ranalli 1995; Trümpy 2001).

Il primo fondamentale risultato delle nuove esplorazioni fu la scoperta dell'età relativamente

molto giovane (dal Giurassico all'Attuale: 170-0 Ma) del fondo roccioso degli oceani (crosta oceanica), costituito essenzialmente da lave basaltiche, rispetto a quella dei continenti circostanti, il cui substrato di rocce metamorfiche ed eruttive è molto più antico. La seconda scoperta, basata sulla datazione delle anomalie magnetiche fossili (magnetostratigrafia) e sulla loro distribuzione spaziale, dimostrava che l'età della crosta oceanica aumenta, in modo simmetrico, procedendo dall'asse delle catene vulcaniche sommerse, situate al centro degli oceani (dorsali medio-oceaniche, ridge), ove continua ad avvenire la risalita dei magmi basaltici, sino alla base delle scarpate che delimitano il margine dei continenti, dove si registrano le età più antiche. Nacque così il concetto rivoluzionario di espansione dei fondi oceanici (*Ocean Spreading*) formulato nel 1962 dal geologo americano Hess, fondamentale innovazione rispetto alla teoria della deriva dei continenti. Si noti che entrambe le concezioni prevedono il progressivo allontanamento di continenti in origine contigui (o viceversa), ma con meccanismi totalmente diversi: 1) migrazione laterale (deriva), secondo Wegener, di zattere-iceberg di crosta continentale che scivolano lentamente su di un substrato roccioso già esistente; 2) allontanamento passivo di due continenti come effetto, secondo le nuove vedute, della continua creazione tra di essi (accrezione magmatica) di nuova crosta basaltica, prodotta dalla fusione parziale delle peridotiti (rocce povere in silice e ricche in olivina e pirosseni) della sottostante astenosfera terrestre. Il Mar Rosso e il golfo di Aden sono la testimonianza di bacini oceanici allo stato embrionale e giovanile, destinati a espandersi progressivamente nei tempi geologici futuri, con l'allontanamento dei continenti circostanti. Il processo eruttivo in atto è chiaramente visibile nell'unico settore emerso (Islanda) della dorsale medio-atlantica. Procedendo a ritroso nel tempo possiamo ricostruire la storia dell'Atlantico: esso è compar-

so nel Giurassico (170 Ma) separando, con la sua nuova crosta basaltica, l'antica litosfera continentale delle due Americhe da quella europea ed africana, con dimensioni iniziali simili a quelle del Mar Rosso, per poi espandersi progressivamente, alla velocità di 1-2 cm/anno, sino a raggiungere la configurazione attuale. In altri casi le velocità di espansione degli oceani è maggiore, da 5 cm/anno (Indiano) a 9-18 cm/anno (Pacifico).

Accertato che tutti gli oceani attuali si sono formati attraverso grandiosi processi di espansione alimentati dalla risalita di magmi basaltici profondi, iniziati nel Giurassico e tuttora attivi lungo le dorsali medio-oceaniche, occorre rinvenire zone della Terra in cui avvenivano processi di segno opposto, cioè venivano traslati nelle sue viscere volumi corrispondenti di litosfera terrestre, a meno di non prevedere un aumento di volume del nostro pianeta, contrastato da argomenti astronomici e fisici. L'attenzione fu attirata dalle zone con sismicità e attività vulcanica molto elevate, associate a formare lunghe cinture, da tempo note, attorno all'oceano Pacifico e nell'oceano Indiano nord-orientale. Negli anni trenta queste zone sismiche erano state interpretate (Benioff, Wadati) come piani di taglio a elevata inclinazione lungo cui frammenti dell'involucro più esterno e rigido della terra solida (detto in seguito litosfera) discendevano in profondità (subduzione) sino a essere assimilati dall'involucro terrestre sottostante (mantello astenosferico). L'interpretazione dei nuovi dati di geologia marina, paleomagnetismo, sismologia e vulcanologia e la loro integrazione con i concetti classici della collisione continentale portarono alla formulazione nel 1968-1969 della teoria della Tettonica delle placche (Isacks, Le Pichon, Morgan, Oliver, Sykes, Wilson), visione sintetica e unitaria della dinamica terrestre nel tempo presente, nelle ere passate e in prospettiva futura, capace di fornire una spiegazione esauriente di tutti i processi geologici e le loro interconnessioni.

Le zone a elevata mobilità geodinamica già citate in precedenza sono interpretate come limiti di enormi frammenti della litosfera terrestre, detti placche, in espansione laterale lungo le dorsali oceaniche (margini divergenti o costruttivi) o in consunzione nelle zone di subduzione profonda (margini convergenti o distruttivi), marcate da deformazioni, sismicità e attività magmatica. Avvengono, per concludere, grandiosi processi di trasferimento di materia che si forma a grande profondità, risale sino alle dorsali oceaniche per poi migrare lateralmente e, infine, discendere lungo le zone di subduzione, costituendo enormi celle convettive a cui è strettamente legata la dinamica delle placche litosferiche. Esaminando le mappe dei fondi oceanici si nota che i margini di placca divergenti e convergenti sono spesso rotti e dislocati in senso orizzontale da grandi fratture verticali, dette faglie trascorrenti e trasformi; la più nota è la faglia sismogenetica di San Andreas, estesa dal Messico alla California.

Un margine divergente in fase embrionale (continentale) è rappresentato sulla superficie terrestre da una depressione tettonica che trova l'esempio più noto nel sistema di rift dell'Africa orientale. Il processo di estensione crostale può arrestarsi (fossa del Reno) o proseguire sino alla completa lacerazione della crosta continentale con formazione di due continenti distinti, separati dalla nuova crosta oceanica in espansione (Mar Rosso). Il tratto dei continenti adiacente all'oceano, detto margine continentale passivo, è caratterizzato da una crosta intensamente fratturata e resa sottile dalla tettonica tensionale della fase di rifting (20-25 km rispetto ai 35-40 km delle condizioni normali). I margini passivi sono soggetti a un progressivo affossamento (subsidenza termica) che facilita la deposizione di potenti successioni sedimentarie durante l'intera fase di migrazione laterale (*drifting*) del continente.

Le catene orogeniche sono le morfostrutture più



3. Veduta della sutura collisionale dalla Punta Dufour, la vetta più alta del massiccio del Monte Rosa, appartenente al margine continentale europeo (primo piano). La parete nord del Breithorn, al centro, è costituita da ofioliti derivate dalla sutura del bacino oceanico ligure-piemontese; esse sono sovrascorse da un lembo di crosta continentale africana in cui è modellata la piramide del Cervino (sullo sfondo). Interpretazione geologica nella parte centrale e superiore di fig. 2b

vistose di un margine convergente, governato da un regime geodinamico compressivo e caratterizzato da processi di ricoprimento tettonico, raccorciamento e ispessimento della crosta terrestre (sino a 50-80 km), con conseguente disequilibrio isostatico. Si tratta di concetti già ben codificati dalla teoria delle falde, ma che vanno integrati associandoli ad un processo di subduzione della litosfera oceanica. La Tettonica delle placche riconosce due tipi principali di catene orogeniche: 1) le Ande e le Cordigliere nordamericane; 2) le catene collisionali del sistema alpino-himalayano.

Le prime sono situate lungo il margine occidentale dei continenti americani, al di sopra della zona di subduzione in cui si consuma la litosfera oceanica della placca inferiore (Juan da Fuca, Pacifica, Cocos, Nazca, procedendo da nord verso sud); sono formate in prevalenza da enormi plutoni di rocce granitoidi, cristallizzate all'interno della crosta continentale più antica, e da successioni vulcaniche e sedimentarie superficiali. Si tratta quindi di catene che si formano al bordo di un oceano ancora aperto e in espansione, senza collisione tra due continenti.

Le seconde sono l'espressione di un margine convergente in cui la litosfera oceanica si è gra-

dualmente consumata in subduzione, sino a sparire del tutto in profondità, dando origine alla collisione dei continenti che essa inizialmente separava. Sottili unità litologiche di origine oceanica (dette ofioliti) sono una preziosa testimonianza dell'oceano mesozoico scomparso in subduzione e marcano la zona di collisione continentale.

Concentrandoci sulle Alpi, ne vediamo la struttura in una mappa (fig. 2a) e in una sezione verticale profonda una cinquantina di chilometri (fig. 2b), ricostruita in base alla geologia di superficie e all'interpretazione di "radiografie sismiche" della parte sepolta (radici) della catena, al limite tra Vallese e Valle d'Aosta. Esse sono costituite da una pila di falde derivate dal margine continentale africano (unità austroalpine e sudalpine), dal sottostante margine continentale europeo (unità penniniche ed elvetiche) e da limitati resti dell'interposto oceano mesozoico della Tetide (unità ofiolitiche), diramazione orientale dell'Atlantico.

Come l'Atlantico anche il settore oceanico della Tetide alpina (bacino ligure-piemontese) era sorto nel Giurassico medio-superiore (170 Ma), espressione di un margine divergente in espansione tra la placca europea e quella africana. La storia evolutiva dei due bacini oceanici, inizialmente del tutto simile, divenne antitetica dopo una settantina di Ma: infatti, mentre l'Atlantico continuava ad accrescersi lungo la sua dorsale vulcanica mediana, la litosfera oceanica della Tetide concludeva la sua fase di espansione nel Cretacico superiore quando, verificatasi l'inversione del regime geodinamico, essa veniva subdotta sotto il margine del continente africano, causando il progressivo avvicinamento dell'Africa all'Europa. La collisione continentale ebbe inizio nell'Eocene (circa 50 Ma) con la definitiva chiusura dell'oceano mesozoico, scomparso in profondità. Questo scontro immane portò la parte frontale del continente africano (Austroal-



pino) ad accavallarsi al di sopra di quella europea (Pennidico), entrambe frammentate e suddivise in molteplici falde di ricoprimento, riunite nel cosiddetto prisma collisionale (cuneo d'accrescimento) e sottoposte a trasformazioni metamorfiche diversificate in funzione delle condizioni di pressione e temperatura raggiunte e dell'attività dei fluidi circolanti. Le unità ofiolitiche, pizzicate tra le falde africane e quelle europee, costituiscono un'esile ma importantissima cicatrice (sutura ofiolitica) della Tetide, la traccia del cosiddetto "oceano perduto" (fig. 3). La storia successiva è contrassegnata da intense deformazioni del prisma collisionale, da trasformazioni metamorfiche associate a un cambiamento del regime termico, dallo sviluppo di un importante evento plutonico e vulcanico di età oligocenica (30 Ma), dall'ulteriore crescita incrementale dell'orogene alla fronte (Elvetico) e nella parte retrostante (Sudalpino), mentre si verificava l'esumazione finale del settore assiale della catena, caratterizzato da unità oceaniche e continentali con metamorfismo di subduzione. Sismicità e misure GPS attestano che la convergenza tra Africa ed Europa è tuttora in atto.

La carta geologica (fig. 2a) ci indica che buona parte delle rocce che affiorano nelle Alpi orien-

tali sono di origine africana, mentre buona parte delle Alpi centro-occidentali sono modellate in unità continentali di origine europea e in unità oceaniche (ofioliti). Le une e le altre hanno subito enormi traslazioni durante l'orogenesi. Soffermandoci sulle Alpi Pennine e Graie, vediamo che il "nobile scoglio" del Cervino (figg. 3-4) è formato da rocce metamorfiche di origine africana, assieme alla dorsale Dent Blanche-Weisshorn, alla Valpelline, al M. Emilius e alla bassa Valle d'Aosta, riferite nella letteratura geologica alla Falda Dent Blanche e alla Zona Sesia-Lanzo. Europei sono i massicci del Monte Rosa, del Gran Paradiso, del Rutor e del Monte Bianco, mentre di origine oceanica sono le "rocce verdi" (ofioliti metamorfiche) del Polluce, Breithorn, Rocca di Verra, Testa Grigia, Gran Tournalin, Zerbion, Tersiva, Grivola e altre vette minori. Zumando su aree ristrette, vediamo i condotti che alimentavano alcuni vulcani di tipo esplosivo che erano attivi nell'Oligocene e che il successivo sollevamento della catena ha completamente eroso; sono presenti nella bassa Valle d'Aosta e nelle sue tributarie di destra e di sinistra, mentre nel vicino Canavese sono esposti alcuni corpi intrusivi della stessa età.

4. L'insieme di scisti, gneiss granitici e gabbri di età paleozoica che formano la dorsale Cervino-Dent d'Herin alla testata della Valtournanche costituisce un lembo di crosta continentale africana (Austroalpino, falda Dent Blanche) sovrascorsa, durante l'orogenesi alpina, sulle unità ofiolitiche sottostanti che costituiscono la sutura dell'oceano mesozoico. Il loro contatto tettonico è messo in evidenza dal contrasto morfologico tra le rocce africane, più resistenti e acclivi, e le successioni ofiolitiche, qui dominate da sedimenti metamorfici (calcescisti) molto erodibili

Passiamo ora ai processi sedimentari che hanno luogo sulla superficie terrestre. Essi sono controllati da eventi geodinamici globali, regionali o locali, che producono il sollevamento e l'abbassamento del rilievo a cui possono sommarsi o sottrarsi le variazioni del livello marino, in genere più modeste, legate a variazioni climatiche. Le rocce sedimentarie si formano per erosione dei rilievi montuosi (successioni clastiche) e per attività biologica nei vari ambienti marini, dalle barriere coralline alle scarpate continentali e alle piane abissali (dolomie, calcari, marne, argille, frane sottomarine). Li ricordiamo perché ai sedimenti sono associati i fossili, la traccia della vita vera esistita sulla Terra, le sue variazioni e le improvvise estinzioni. Essi consentono la datazione dei sedimenti che li contengono, fondamento della cronostratigrafia, e importanti ricostruzioni di carattere paleoecologico.

La geologia e la paleontologia sono diventate scienze moderne tra la fine del Settecento e i primi dell'Ottocento, superando definitivamente le visioni bibliche del Diluvio Universale e di una Terra dalla vita estremamente breve.

Il pianeta, inizialmente allo stato fuso, si è raffreddato gradualmente generando una litosfera e un mantello di rocce solide e un nucleo in parte fuso, mentre la condensazione del vapore atmosferico produceva l'acqua degli oceani. Una delle ipotesi sull'origine della vita è che essa sia nata in questi mari primordiali, favorita da sorgenti idrotermali sottomarine ricche di metalli che agivano da catalizzatori di reazioni chimiche che portarono alla formazione delle prime membrane cellulari. Altre ipotesi ricorrono alla caduta sulla terra di asteroidi di ghiaccio provenienti dallo spazio.

Studiando le rocce, i minerali e gli organismi fossili delle successioni sedimentarie presenti nei mari e nelle terre emerse, oggi sappiamo molte cose sulla storia della Terra e sulla sua cronologia, in particolare che: 1) tutti i pianeti del sistema

solare, Terra compresa, sono stati generati insieme, circa 4600 milioni di anni fa (datazioni isotopiche di meteoriti e di rocce lunari); 2) la vita ha fatto la sua comparsa circa 1000 milioni di anni dopo, nell'era più antica (Archeano), rappresentata da forme unicellulari semplici (procarioti) e, in seguito, da forme unicellulari con nucleo ben differenziato (eucarioti), apparse nel Proterozoico medio, 1400 milioni di anni fa; 3) i primi organismi pluricellulari sono proliferati nei mari nel Proterozoico superiore, 700 milioni di anni fa, data cruciale che segna l'inizio di una notevole accelerazione dei processi evolutivi. Nel Paleozoico compaiono i primi vertebrati marini (500 Ma), le prime piante terrestri (400 Ma), le prime foreste (350 Ma) e i primi rettili (300 Ma), seguiti nel Mesozoico dai primi mammiferi (200 Ma) e dai progenitori degli uccelli (150 Ma), derivati dai rettili, mentre l'uomo fa la sua comparsa solo 2-3 milioni di anni fa.

Tutto questo dovrebbe farci meditare sulla presunzione, forse eccessiva, delle visioni antropocentriche e sulle certezze del nostro avvenire, ricordando che vi sono stati numerosi eventi catastrofici non solo per la Terra solida, ma anche per gli abitanti della biosfera.

I cambiamenti climatici ne sono la causa passata, presente e futura, la norma nella storia del nostro pianeta. Essi sono prodotti da complesse cause astronomiche che provocano cicliche variazioni del grado di insolazione della Terra (curva di Milanković), con frequenze di decine di migliaia di anni, e da cause endogene, con particolare riferimento alle eruzioni vulcaniche con produzione di anidride carbonica e di finissime ceneri che rimangono a lungo nella troposfera riflettendo parte dei raggi solari; analogo effetto ha la polvere prodotta dall'impatto di grandi meteoriti, eventi peraltro più rari.

Oltre il 90% di tutti gli organismi che, a partire dall'Archeano, sono vissuti sulla Terra sono attualmente estinti, spariti dalla faccia della Ter-

ra perché incapaci di sopravvivere ai cambiamenti ambientali, mentre comparivano nuove specie capaci di evolversi per adattarsi alle variazioni dell'ecosistema. Si noti che le principali estinzioni sono avvenute in modo improvviso, quasi istantaneo se riferite al tempo geologico, con la scomparsa di una grande quantità di specie viventi sulla Terra (dal 50% a oltre il 90%). Queste estinzioni di massa, vere stragi, si sono verificate più volte negli ultimi 500 milioni di anni della storia della Terra e, come effetto positivo, hanno creato spazio per nuove forme di vita. I dinosauri sono apparsi dopo una delle maggiori estinzioni in massa di organismi viventi, avvenuta al limite tra il Permiano e il Triassico, circa 250 milioni di anni fa (fig. 5). A sua volta, l'estinzione dei dinosauri, avvenuta tra il Cretaceo e il Paleogene, circa 65 milioni di anni fa, aprì lo spazio allo sviluppo dei mammiferi che si diversificarono in rapida evoluzione. Per concludere, la Terra ha una vita geologica e biologica tutta sua da migliaia di milioni di anni e certamente continuerà ad averla dopo la scomparsa del genere umano, relativamente presto se continueremo ad abusare della sua tolleranza.



5. Ricostruzione della vita e dell'ambiente nel Giurassico (courtesy National Geographic, be5062-lw)

Finché ci sarà il sole e la Terra avrà una riserva di energia termica interna essa continuerà a essere viva e mobile indipendentemente da quello che l'uomo (sempre meno sapiens) vorrà e saprà fare per garantire alle generazioni future un ecosistema adatto alla loro sopravvivenza. Non è quindi la Terra a essere nelle mani dell'uomo, ma solo l'ecosistema in cui esso vive, un ambiente soggetto a eventi catastrofici (eruzioni, terremoti, impatto di meteoriti) e a cicliche variazioni naturali del clima (da caldo a glaciale) che l'uomo non potrà assolutamente impedire né mitigare, ma soltanto accelerare.

A. Bosellini, *Tettonica delle placche e geologia*, Bovolenta, Ferrara 1978.
 G.V. Dal Piaz, *La piramide misteriosa: il Cervino dei geologi*, "ALP", 137, Vivalda Ed., settembre 1996, pp. 80-87.
 G.V. Dal Piaz, *History of tectonic interpretations of the Alps*, in "Journal Geodynamics", 32, 2001, pp. 99-114.
 G.V. Dal Piaz, A. Bistacchi, M. Massironi, *Geological outline of the Alps*, in "Episodes", III, 26, settembre 2003, pp. 174-179.
 F. De Giusti, G.V. Dal Piaz, M. Massironi, A. Schiavo, *Carta geotettonica della Valle d'Aosta*, in "Memorie di Scienze Geologiche", 55, (2003) 2004, pp. 129-149.
 A. Hallam, *A revolution in the Earth Sciences. From continental*

drift to plate tectonics, Clarendon Press, Oxford 1973.
 G. Ranalli, *Plate Tectonics: the first twenty-five years*, Proceedings VIII Summer School Earth and Planetary Sciences, Siena 1995.
 F. Ricci Lucchi, *I ritmi del mare*, La Nuova Italia Scientifica, Roma 1992, p. 251.
 R. Trümpy, *Why plate tectonics was not invented in the Alps*, in "International Journal of Earth Sciences", 90, 2001, pp. 477-483.
 Società Geologica Italiana, *Guide Geologiche Regionali*, BE-MA Editrice, Milano 1990-2002 (vol. I, *Alpi e Prealpi Lombarde*, vol. II, *Alpi Liguri*, vol. III, *Alpi dal M. Bianco al Lago Maggiore*, vol. IX, *Alpi e Prealpi Carniche e Giulie*).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI