

**S**ei anni fa ho imparato un'importante lezione sulla meteorologia in montagna da un insegnante d'eccezione: il cavallo noleggiatomi da un contadino. All'epoca, stavo studiando la geologia dell'antico regno di Mustang, che attualmente fa parte del territorio nepalese. Il Mustang si trova all'estremità occidentale dell'altopiano del Tibet, alle sorgenti del Kali Gandaki, uno straordinario fiume che intaglia una profonda valle tra due picchi superiori agli 8000 metri – l'Annapurna I e il Dhaulagiri – nel suo percorso verso sud fino alle colline pre-himalayane. Il contadino mi disse che il cavallo era perfettamente adatto per qualunque momento della giornata se volevo andare in giro per l'altopiano. Ma, con un'aria un po' misteriosa, mi avvertì pure che, se avessi voluto addentrarmi nella valle, il cavallo mi sarebbe stato di aiuto solo al mattino.

Non afferrai bene il significato dell'avvertimento fino a mezzogiorno e qualche minuto. All'improvviso, in un restringimento della valle, il cavallo e io ci trovammo di fronte a un vento quasi di tempesta sorto improvvisamente dal nulla. All'intensificarsi della bufera, il cavallo prese a procedere sempre più lentamente, finché alla fine si fermò, scosse la testa e fece dietro front. Ogni tentativo di spronarlo perché procedesse controvento con me sulla groppa fu inutile: riuscii a proseguire solo smontando di sella e conducendolo per le briglie. E così feci, riconoscendo in cuor mio che il cavallo potesse sapere qualcosa più di me sulle caratteristiche del tempo himalayano.

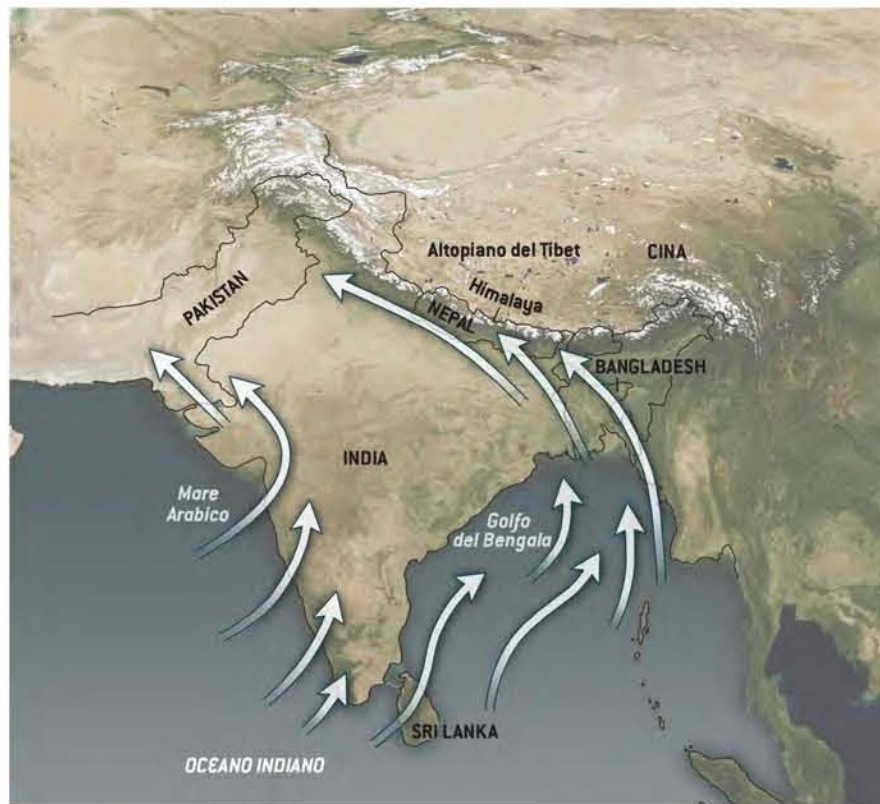
I venti della valle del Kali Gandaki, tra i più violenti venti di valle del pianeta, raggiungono regolarmente velocità costanti di 20 metri al secondo (più di 70 chilometri all'ora) e sono un evento quasi quotidiano. Dopo il sorgere del Sole, l'aria a contatto con il suolo si riscalda moltissimo, e con il passare delle ore tende a risalire lungo la valle. I venti del Kali Gandaki, così prevedibili, sono solo un esempio locale di come il clima possa essere condizionato dalla topografia delle montagne. A sua volta, poi, il clima influenza in misura significativa la forma della superficie terrestre.

# e Il clima l'evoluzione delle montagne

Nuovi studi sulla catena dell'Himalaya e l'altopiano del Tibet suggeriscono l'esistenza di un rapporto tra il clima e le attività geologiche profonde

di Kip Hodges





**LE CORRENTI DI ARIA UMIDA (freccie bianche)** provenienti dall'Oceano Indiano generano i monsoni annuali che si verificano durante l'estate in India. Quando le masse d'aria transitano al di sopra del Golfo del Bengala, raccolgono ulteriore umidità, e ciò causa la formazione di depressioni tropicali. Non riuscendo a salire a una quota sufficiente per scavalcare l'Himalaya, le tempeste imperversano sul territorio lungo il loro percorso; in alcuni luoghi si hanno precipitazioni paragonabili a quelle di un anno intero nella foresta pluviale amazzonica.

lentamente sull'Oceano Indiano. Di conseguenza i venti provenienti da sud-ovest portano un flusso di aria umida verso la terraferma. Nei pressi di Sri Lanka, una parte di quest'aria carica di umidità inizia a far rotta verso nord, attraverso l'India meridionale e occidentale, mentre un'altra parte si dirige verso est, nel Golfo del Bengala (si veda l'illustrazione a sinistra).

La massa d'aria diretta verso est raccoglie ulteriore umidità dalle acque del Golfo del Bengala, favorendo la formazione di depressioni tropicali al largo della costa nord-orientale del Subcontinente. Queste tempeste, attratte da un vortice di bassa pressione che si sviluppa nell'India settentrionale, si spostano rapidamente verso nord attraverso il Bangladesh e l'India, e infine colpiscono l'Himalaya. Le tempeste sono quindi deviate verso ovest, caratterizzando una stagione monsonica che inizia ai primi di giugno nell'India nord-orientale e in Bangladesh, a metà giugno in India occidentale. L'aria carica di umidità sale in quota incessantemente nelle celle atmosferiche di convezione, nel vano tentativo di superare l'alto muro costituito dalla catena himalayana. Via via che l'aria si solleva in queste celle, l'umidità condensa, scatenando piogge torrenziali.

In ogni stagione monsonica, le stazioni meteorologiche dell'Himalaya registrano precipitazioni dell'ordine di migliaia di millimetri (una quantità superiore al totale annuo di gran parte della foresta pluviale amazzonica), concentrate sulle colline pre-himalayane ad altitudini comprese tra 1000 e 3500 metri. La scarsa umidità residua dà luogo a scarse precipitazioni sulle creste della catena himalayana e sull'Altopiano del Tibet, per cui il contrasto climatico tra i due versanti dell'Himalaya è estremo. In alcune regioni, si può passa-

Beth Wald/Aurora Photos (pagina precedente); Jen Christiansen/Fonte: Kip Hodges/The Visible Earth/NASA (immagine da satellite di base)

**GLI EFFETTI DEI MONSONI SULLA SUPERFICIE** dell'Asia centrale sono chiaramente visibili in questa immagine del Subcontinente indiano ripresa da satellite. A sud dell'Himalaya, le piogge torrenziali favoriscono la crescita della vegetazione, dando al territorio una colorazione verde intenso. A nord dello sbarramento di montagne che intercetta il monzone, l'altopiano del Tibet è relativamente secco. Le aree bianche sono innevate.

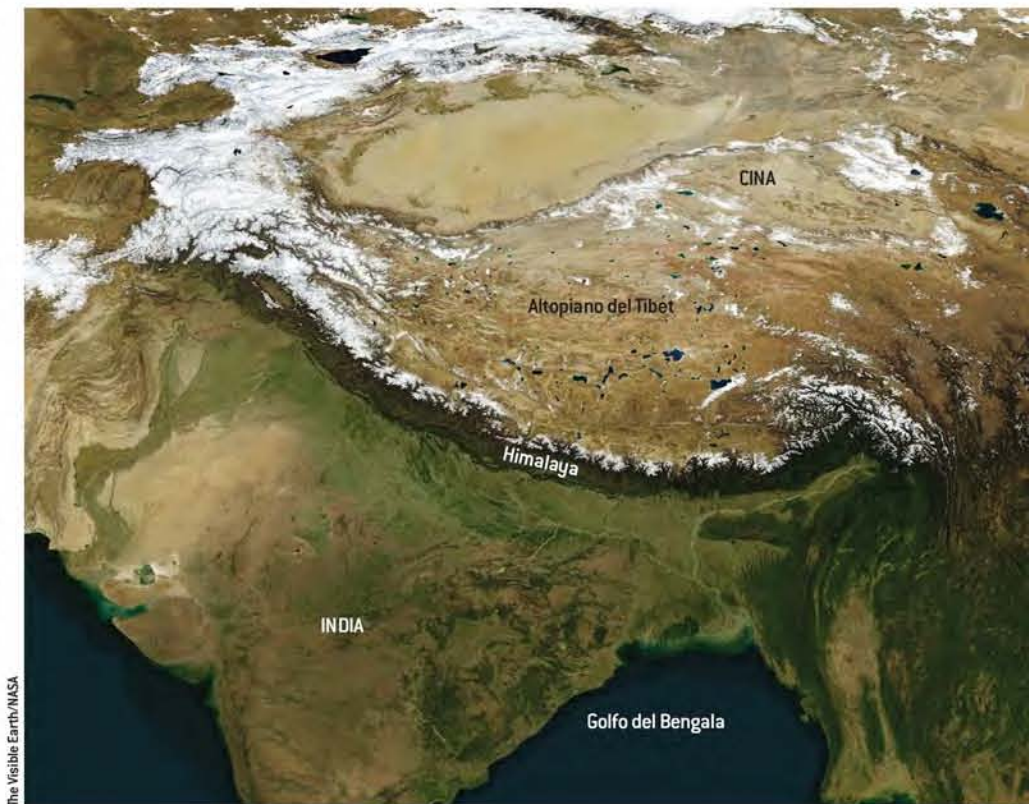
re in meno di 200 chilometri dalla foresta tropicale a un deserto di alta quota.

È ovvio che l'Himalaya, ergendosi a guardia dell'Altopiano del Tibet, influenzi il clima regionale. È molto meno ovvio che il clima condizioni anche ciò che accade in profondità sotto la superficie terrestre. Com'è possibile un effetto del genere? La risposta è emersa partendo dallo studio dei meccanismi di formazione delle catene montuose e di come queste catene interagiscono con ciò che le circonda.

## Le cento cime più alte

L'Altopiano del Tibet e la catena himalayana sono collettivamente chiamati dai geologi «sistema orogenetico himalayano-tibetano». In questa regione di trovano le 100 montagne più alte del pianeta. La teoria della tettonica a zolle offre una spiegazione parziale di come si sono generati questi rilievi. Le grandi catene montuose della Terra corrispondono a regioni in cui si ha, o si è avuta in passato, una collisione tra zolle litosferiche, ovvero quei lastroni rigidi che costituiscono l'involucro esterno del pianeta. La catena himalayana iniziò a formarsi quando la zolla indiana, andando alla deriva verso nord rispetto al supercontinente mesozoico Gondwana, finì per cozzare contro la zolla eurasiatica, circa 45 milioni di anni fa. Un treno merci può impiegare vari minuti per fermarsi una volta applicata l'azione dei freni, ma l'inerzia della zolla indiana era così immensa che ancora oggi continua a convergere con quella eurasiatica a una velocità di circa quattro centimetri all'anno.

La zolla indiana in avanzamento, agendo come un cuneo, ha continuamente costretto una parte della litosfera eurasiatica a uscire dal suo percorso. Come hanno



ipotizzato Paul Tapponnier e Peter Molnar negli anni settanta, il cuneo ha apparentemente spinto blocchi di litosfera relativamente rigidi, separati l'uno dall'altro da faglie curve, verso il Sudest asiatico.

Altre conseguenze della collisione delle zolle sono l'accorciamento e l'ispessimento della crosta terrestre. Lo spessore medio della crosta continentale è di circa 30 chilometri, ma sotto le catene montuose può essere molto più spessa. E il sistema orogenetico himalayano-tibetano ha la crosta più spessa del pianeta: in alcuni punti supera i 70 chilometri.

La correlazione tra la crosta più spessa e le montagne più alte è una manifestazione del principio di Archimede: un corpo immerso in un fluido riceve una spinta dal basso verso l'alto equivalente al peso del fluido spostato. Così come un iceberg spesso riceve una spinta di gal-

leggiamento maggiore di quella di un iceberg più sottile, dal momento che sposta una quantità maggiore di acqua di mare, una regione di crosta dallo spessore anormale come il sistema orogenetico himalayano-tibetano «galleggia» nel denso mantello sottostante più delle regioni vicine con una crosta più sottile.

## Costruire una montagna

La collisione tra zolle litosferiche aiuta a spiegare la genesi delle catene montuose. Ma anche altri processi, tra cui il trasferimento di energia, influenzano l'evoluzione delle montagne. La grande intuizione degli ultimi anni riguarda il fatto che le precipitazioni monsoniche sembrano influenzare il modo in cui avviene il trasferimento di energia in profondità, nel sistema himalayano-tibetano.

### L'AUTORE

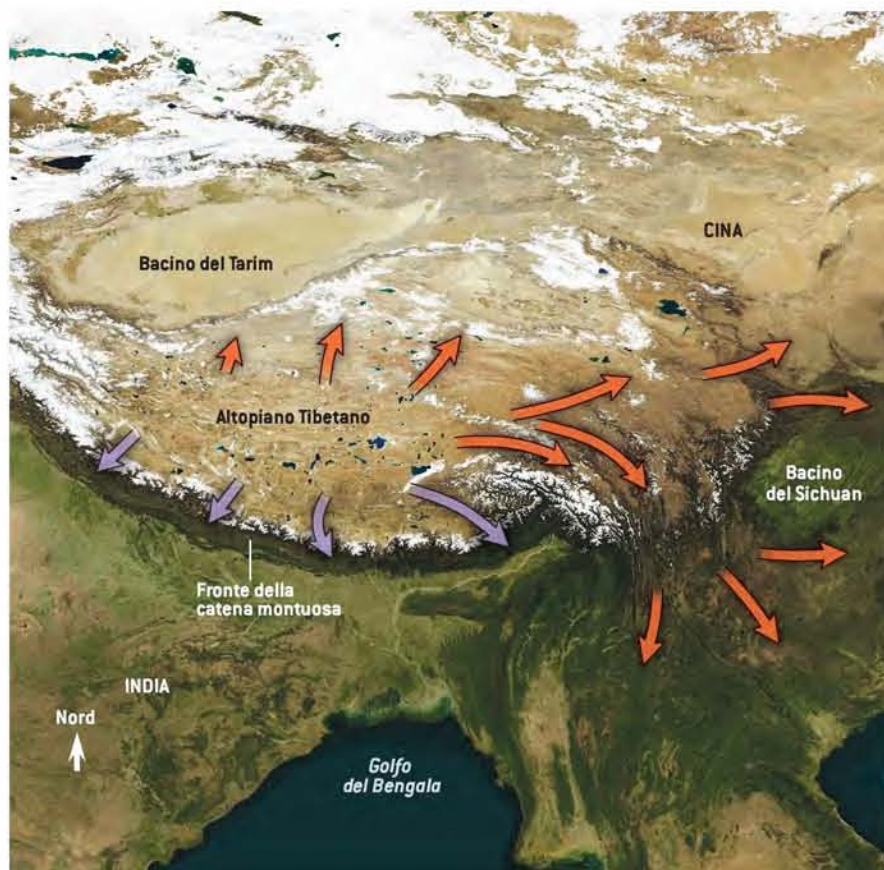
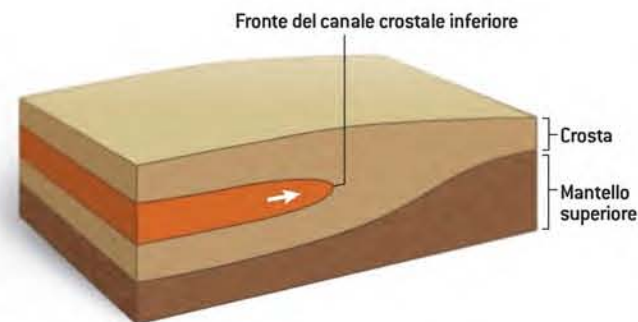
KIP HODGES studia lo sviluppo e l'evoluzione dei sistemi montuosi, integrando metodi teorici e di laboratorio con osservazioni sul campo. È stato professore al Dipartimento di scienze della Terra, dell'atmosfera e planetarie del Massachusetts Institute of Technology per 23 anni, e in luglio ha fondato la School of Earth and Space Exploration della Arizona State University. Ha conseguito il dottorato in geologia al MIT. Per quanto una buona parte del suo lavoro si sia concentrata sull'Himalaya e l'Altopiano del Tibet, ha anche svolto ricerche di tettonica in Scandinavia, in Groenlandia orientale, in Irlanda, nella Baja California e sulle Ande peruviane.

## In sintesi/L'impatto profondo del clima

- Anche se l'influenza del clima sul modellamento della superficie terrestre è riconosciuta da sempre, nuove ricerche mostrano che il clima è anche in grado di influenzare l'attività geologica che si svolge nelle profondità della crosta, e di svolgere un ruolo nella deformazione dei sistemi montuosi.
- Un esempio del rapporto tra clima e geologia è il meccanismo di retroazione tra l'Himalaya e il monzone annuale indiano. Precipitazioni di estrema intensità erodono il versante himalayano meridionale. L'erosione, come suggeriscono diversi indizi scoperti di recente, potrebbe causare un lento ma costante flusso di materiale crostale profondo da sotto l'Altopiano del Tibet al fronte della catena, contribuendo a sollevarla e quindi a far sì che intercetti il monzone con più efficacia.
- Un rapido e recente sollevamento dell'area che riceve le precipitazioni più intense conferma l'ipotesi che esista un flusso di materiale crostale profondo fino al fronte della catena. Le prove di questo sollevamento sono date da misurazioni geodetiche e anche dalle pendenze insolite dei versanti e dei canali di deflusso in tutto il fronte di catena. Anche gli alti tassi di erosione, accertati mediante studi termocronologici, vanno a conferma di questo scenario.



ALCUNI GEOLOGI ipotizzano l'esistenza di un flusso laterale di materiale fluido della crosta inferiore. Questo flusso dissiperebbe l'energia potenziale gravitazionale in eccesso nella regione dell'Altopiano.



IL CANALE CROSTALE CHE SCORRE IN MOLTE REGIONI (indicato dalle frecce arancioni sull'immagine da satellite qui sopra) non erompe in superficie, ma si limita a gonfiare la crosta via via che si sposta dall'interno dell'Altopiano (come mostrato nel diagramma in sezione trasversale in alto). Ma nelle regioni in cui le intense precipitazioni monsoniche causano un'erosione rapida (indicate da frecce viola), il canale può arrivare fino alla superficie (diagramma in sezione trasversale nella pagina a fronte).

Dal punto di vista fisico, un sistema orogenetico è un magazzino di energia, paragonabile a un bacino idrico trattenuto da una diga artificiale. Impedendo lo scorrere di un fiume, la diga di una centrale idroelettrica converte energia cinetica in energia potenziale gravitazionale conservata nella forma di un profondo lago. Data l'elevazione della superficie del lago rispetto al livello del fiume a valle della diga, c'è una fortissima differenza di energia potenziale tra un lato e l'altro del-

la diga stessa. Se ne avesse l'opportunità, il bacino dissiperebbe rapidamente la sua energia potenziale in eccesso nel tentativo di ristabilire l'equilibrio con le aree circostanti, facendo esplodere la diga.

L'unico ostacolo in grado di impedire la catastrofe è la resistenza fisica dello sbarramento. Allo stesso modo, il sistema orogenetico himalayano-tibetano ha una tendenza naturale a distendersi per dissipare l'energia potenziale in eccesso che ha in virtù della differenza tra il suo

spessore di crosta e quello delle pianure adiacenti.

La rigida crosta superiore, frammentata in blocchi da grandi faglie, scorre più o meno come fa la sabbia. A livelli più profondi della crosta, dove le temperature e le pressioni sono molto più alte, la roccia tende a scorrere invece come il dentifricio spremuto da un tubetto. Modelli teorici e osservazioni mostrano che questi canali fluidi nella crosta profonda possono persistere anche per milioni di anni. E quando trovano l'opportunità di dissipare l'energia potenziale si espandono lentamente. Un recente lavoro dei miei colleghi del MIT Marin Clark e Leigh Royden conferma l'idea che la dolce, costante diminuzione di quota dall'Altopiano del Tibet verso sud-est sia causata dal flusso verso l'esterno di crosta inferiore tibetana (si veda la figura a sinistra) molto al di sotto del margine orientale dell'altopiano.

Un recente sviluppo viene da studi che indicano come la crosta inferiore sotto l'Altopiano del Tibet stia anch'essa scorrendo verso sud, verso il fronte della catena himalayana. Per capire perché, si deve ricordare che l'acqua contenuta in un bacino artificiale tende naturalmente a infiltrarsi in qualsiasi crepa o fessura della diga. Analogamente, ci si potrebbe attendere che il canale crostale inferiore scorra più facilmente nella direzione di minima resistenza, verso il fronte della catena himalayana, dove l'erosione superficiale delle piogge monsoniche è più attiva.

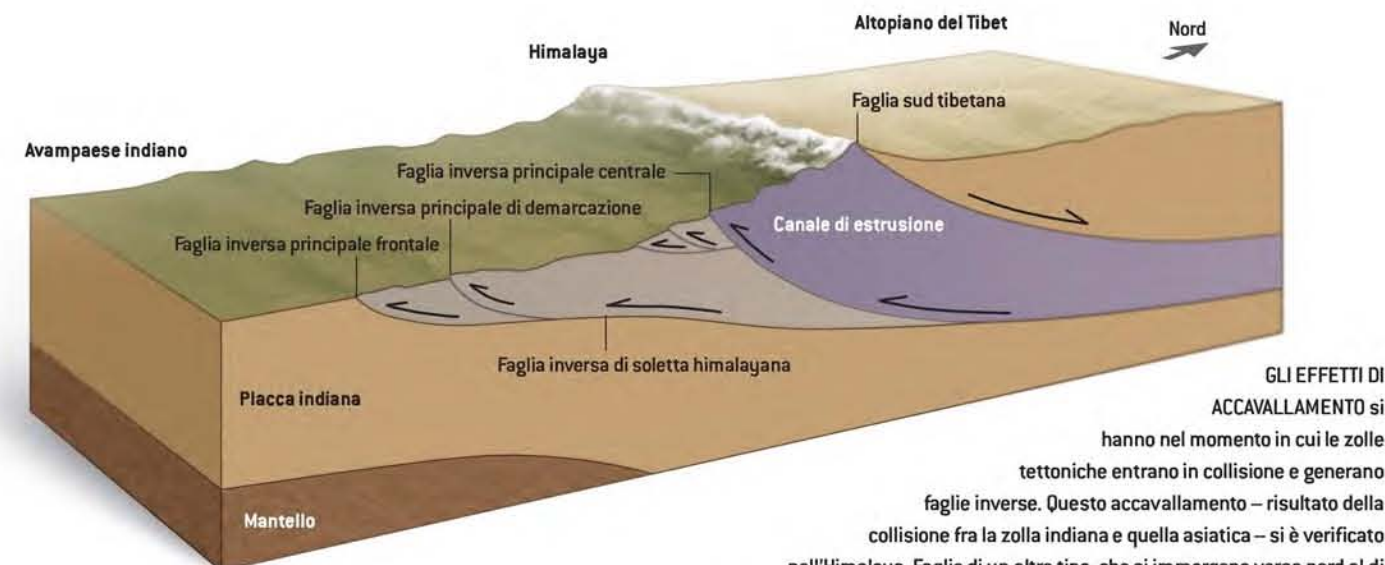
Questo flusso crostale è la chiave di volta delle teorie sulle relazioni tra monzone e montagne. Mentre le piogge provocano un'incessante erosione lungo il fronte della catena himalayana, il margine meridionale dell'Altopiano del Tibet dovrebbe migrare verso nord. Invece, con ogni evidenza, il materiale rimosso dall'erosione viene rimpiazzato da materiale del canale crostale inferiore che scorre verso sud e verso la superficie. E, per chiudere il ciclo, l'erosione del fronte della catena è ciò che in primo luogo attrae il canale verso la superficie.

## Anatomia del flusso

Questa interpretazione si basa sullo studio delle faglie principali dell'Himalaya. La maggior parte delle faglie principali nelle regioni montuose è data da fa-

Jen Christiansen/fonte: A synthesis of the channel flow-extrusion hypothesis as developed for the Himalayan-Tibetan orogenic system, di K.V. Hodges, in Channel flow, ductile extrusion, and exhumation of lower-middle crust in continental collision zones, a cura di R. Law, M. Searle e L. Godin, Geological Society Special Publication, Londra, in stampa. (in alto) Jen Christiansen/fonte: Kip Hodges/The Visible Earth/MASA (in basso)

Jen Christiansen/fonte: Southward extrusion of Tibetan crust and its effect on Himalayan tectonics, di K.V. Hodges, J.M. Hurlado e K.V. Whipple, in «Tectonics», Vol. 20, n. 6, pp. 799-809, 2001



GLI EFFETTI DI ACCAVALLAMENTO si hanno nel momento in cui le zolle tettoniche entrano in collisione e generano faglie inverse. Questo accavallamento – risultato della collisione fra la zolla indiana e quella asiatica – si è verificato nell'Himalaya. Faglie di un altro tipo, che si immergono verso nord al di sotto dell'Altopiano del Tibet, si riscontrano in prossimità della cresta himalayana.

Costituendo ciò che viene definito come sistema di faglie sud tibetane, queste faglie condividono alcune somiglianze geometriche con le faglie inverse, ma le rocce scorrono lungo questo sistema nel senso opposto. Questo sistema di faglie potrebbe anche corrispondere alla sommità del canale fluido di crosta inferiore al di sotto del Tibet. Nuovi elementi suggeriscono che lo scorrimento verso nord lungo il sistema di faglie sud-tibetane e il simultaneo scorrimento verso sud lungo le faglie meridionali permettano l'estruzione verso sud di questo canale verso il fronte di catena himalayana. (Le regioni in bruno rossiccio sono in spostamento verso nord. Quelle in viola e in grigio verso sud).

ge Province del Nord America, che copre l'area compresa tra l'altopiano del Colorado e la Sierra Nevada. Ma, almeno fino alla scoperta del sistema sud-tibetano, non si pensava che potessero esserci grandi sistemi di distacco in luoghi dove le zolle tettoniche sono in collisione frontale.

## Venti milioni di anni

I tentativi di incorporare il sistema di distacco nella dinamica complessiva del sistema orogenetico himalayano-tibetano ci hanno indotti a teorizzare che il flusso di crosta inferiore plastica rifornisca di continuo il fronte della catena himalayana: il materiale compreso tra il sistema di faglie principale frontale e quello sud-tibetano, e specialmente le rocce al di sopra del sistema di faglie principale centrale, si sposta verso sud sia rispetto al materiale al di sopra del sistema di faglie sud-tibetano, sia rispetto al materiale al di sotto delle faglie della soletta dell'Himalaya. Si ritiene che questa zona di estrusione verso sud rappresenti il canale inferiore duttile della crosta tibetana in procinto di farsi strada verso la superficie.

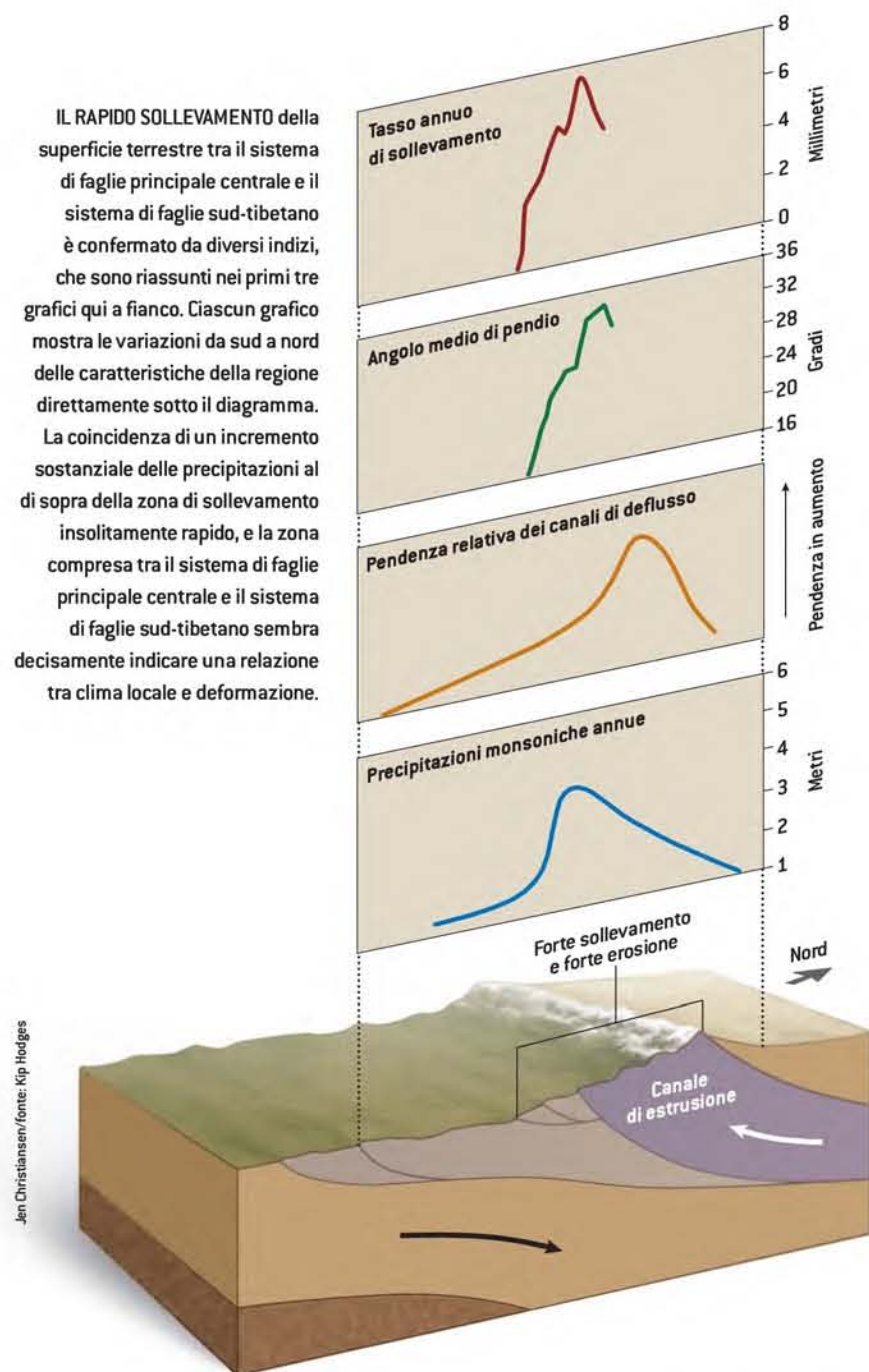
Ci sono prove che sia il sistema di faglie sud-tibetano sia quello principale centrale fossero attivi già nel Miocene inferiore,

tra 16 milioni e 22 milioni di anni fa. Alla fine degli anni ottanta io, Clark Burchfield e Leigh Royden del MIT, proponemmo un semplice modello secondo cui lo scorrimento coordinato su questi sistemi di faglie durante il Miocene inferiore conduceva a un movimento verso sud del canale di rocce compreso tra i due sistemi di faglie. Nella nostra prospettiva, questo processo veniva generato dal differenziale di pressione esistente tra l'Altopiano del Tibet, in corso di sollevamento, e l'India.

Da allora, vari studiosi hanno raffinato il cosiddetto modello a estrusione. Djordje Grujic, del Politecnico di Zurigo, ha dimostrato che i modelli di deformazione delle rocce nei due sistemi di faglie erano coerenti con la deformazione duttile, analoga al flusso di un fluido in una condotta. E K. Douglas Nelson, della Syracuse University, ipotizzò che una crosta inferiore fluida fosse esistita sotto il Tibet fin dal Miocene inferiore, e che le rocce affioranti tra i sistemi di faglie sud-tibetano e principale centrale rappresentassero il canale crostale inferiore duttile, fattosi più rigido nel raggiungere la superficie.

Gran parte delle varianti del modello a estrusione di canale (si veda l'illustrazione in alto) si sono concentrate sull'evoluzione miocenica del sistema himalayano-tibeta-





no, ma si accumulano prove che il processo sia ancora in corso. La ricostruzione storica dei movimenti dei maggiori sistemi di faglie himalayani mediante analisi del decadimento radioattivo di elementi contenuti nei minerali cristallizzati durante eventi di deformazione mostra che la fagliazione si è verificata in prossimità o appena a sud delle tracce superficiali del sistema di faglie principale centrale e del sistema sud-tibetano, a tempi diversi, negli ultimi 20 milioni di anni. E la deformazione più recente è estremamente giovane, per gli standard geologici: il mio gruppo ha mostrato come le strutture che potreb-

bero avere agito da limiti di un canale di estrusione erano attive nel Nepal centrale durante le ultime migliaia di anni. L'estrusione del canale potrebbe addirittura essere ancora in corso ai nostri giorni.

### L'evoluzione del paesaggio

Se l'estrusione di canale ha avuto un ruolo importante nel rimodellare l'Himalaya, si dovrebbero trovare le prove di un sollevamento insolitamente rapido della superficie terrestre nella zona compresa tra le tracce superficiali dei sistemi di faglie. In effetti, le misurazioni effettua-

te negli ultimi trent'anni, con attrezzature tradizionali di rilevamento prima, e con i satelliti più di recente, indicano che questa zona sta sollevandosi di alcuni millimetri all'anno rispetto alla regione a sud della traccia in superficie del sistema di faglie principale centrale.

Un'ulteriore prova del rapido sollevamento è il paesaggio stesso. Nei sistemi montuosi il sollevamento rapido è di norma correlato con un forte rilievo topografico, vale a dire un forte salto di elevazione su una breve distanza orizzontale, e da un ripido gradiente dei corsi d'acqua. I profili dei fiumi sono in effetti eccessivamente ripidi attraverso il fronte di catena himalayano in Nepal, dove i corsi d'acqua attraversano la zona dell'estrusione ipotizzata. L'analisi della topografia attraverso il fronte mostra anche un rilievo insolitamente spiccato in quella zona. Ma rimane il dilemma se questa fase di sollevamento rapido sia uno sviluppo recente degli ultimi decenni o se invece sia misurabile sulla scala dei tempi geologici.

Sappiamo che oggi l'erosione si verifica in risposta al monzone, ma ci sono varie tecniche per stimare i tassi di erosione su lunghi periodi. Uno dei più potenti metodi di valutazione dei tassi di erosione in sistemi orogenetici si basa sulla produzione naturale dei nuclidi cosmogenici (isotopi prodotti da raggi cosmici) dovuta all'esposizione delle rocce in superficie. La concentrazione di nuclidi cosmogenici in campioni superficiali è proporzionale al tempo trascorso dall'inizio dell'esposizione. Insieme ai miei colleghi del MIT Cameron Wobus e Kelin Whipple, e ad Arjun Heimsath del Dartmouth College, abbiamo usato questa tecnica nel Nepal centrale per dimostrare un incremento del tasso di erosione di oltre tre volte nella zona dell'estrusione ipotizzata rispetto alla regione più a sud.

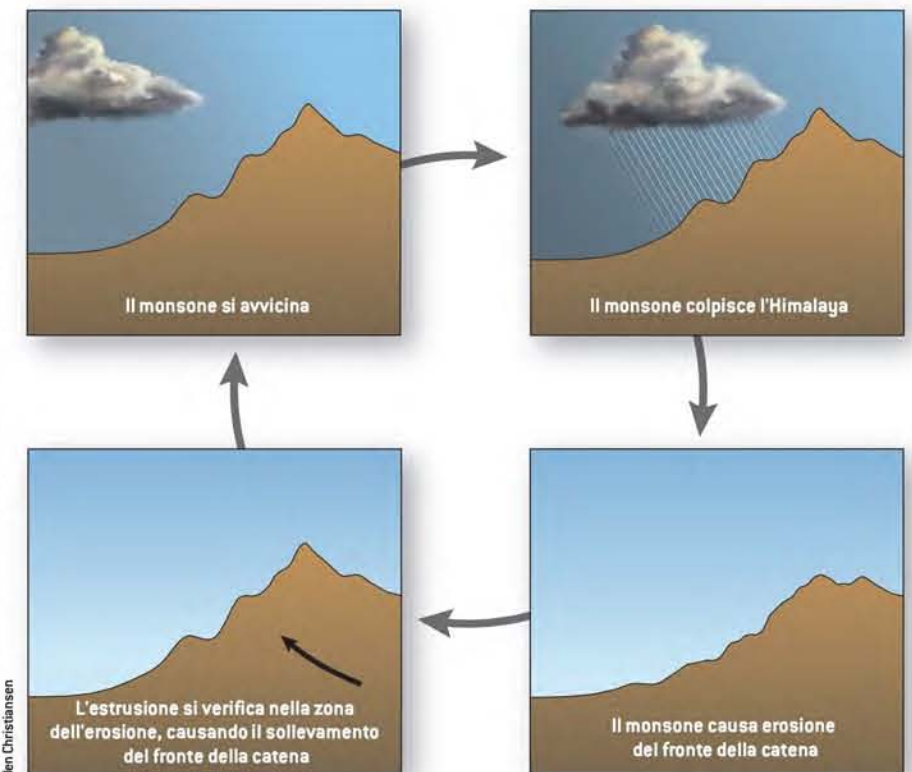
Per esplorare andamenti diversi dei processi di erosione anche su scale temporali più lunghe si possono impiegare altri metodi. Alcuni cronometri geologici indicano il momento in cui una roccia che inizialmente si era cristallizzata ad alta temperatura, a grande profondità, si è raffreddata passando attraverso una stretta finestra di temperatura mentre l'erosione consentiva al campione di raggiungere la superficie terrestre. Applicando questi termocronometri a campioni raccolti dal fronte hima-

layano nel massiccio dell'Annapurna, nel Nepal centrale, Ann Blythe della University of Southern California e la mia allieva Kate Huntington del MIT hanno mostrato che l'erosione è aumentata nella zona dell'estrusione ipotizzata per quanto riguarda almeno gli ultimi milioni di anni. Nel complesso, le prove derivanti dagli studi sul terreno, dal nuclidi cosmogenici e dalla termocronometria danno credito all'idea di un rapido sollevamento sostenuto su periodi di tempo assai protratti.

Il dilavamento operato dalle acque superficiali e l'abrasione dei ghiacci sono riconosciuti come i principali agenti di erosione fisica. Maggiori precipitazioni, come quelle associate ai monsoni, comportano tassi di erosione più elevati lungo il fronte della catena himalayana. Se il ciclo di retroazione ipotizzato tra l'erosione del fronte della catena e l'estrusione verso sud del canale crostale esiste davvero, la distribuzione delle precipitazioni monsoniche dovrebbe coincidere con l'andamento di sollevamento superficiale sostenuto. Vari gruppi di ricerca stanno definendo questi andamenti di precipitazione usando i dati dei satelliti e di una rete di stazioni meteorologiche.

Per esempio, Ana Barros della Duke University ha studiato l'andamento delle precipitazioni monsoniche nella catena dell'Annapurna dal 1999. E i risultati indicano che la precipitazione monsonica è massima nelle zone di erosione e sollevamento rapido definite da altri studi. Fatto più importante, l'ampia corrispondenza della regione di alte precipitazioni monsoniche con la zona dell'estrusione ipotizzata risponde bene all'ipotesi che l'estrusione di canale sia causata dall'erosione sul fronte di catena in risposta al monsonne indiano. L'estrusione attivata dalla rapida erosione sembra in effetti costruire la parete stessa che intercetta il monsonne nel suo percorso verso nord. L'intensa precipitazione lungo il fronte conduce all'aumento di erosione che attiva l'estrusione, chiudendo il cerchio.

Alcuni modelli teorici confermano che relazioni di questo tipo sono prevedibili nell'evoluzione dei sistemi orogenetici. Chris Beaumont e colleghi della Dalhousie University di Halifax, in Nova Scotia, usano questi modelli per studiare il possibile impatto dell'erosione su sistemi con canali della crosta inferiore meccanica-



IL CICLO DI RETROAZIONE TRA I MONSONI E L'HIMALAYA è qui mostrato in forma semplificata. I monsoni estivi sono diretti verso nord, ma sono bloccati dai versanti himalayani e scaricano enormi quantità di pioggia. La pioggia causa erosione, consentendo alla crosta inferiore fluida del Tibet di essere estrusa verso il fronte della catena. Un effetto di questa estrusione è il sollevamento, che controbilancia la tendenza dell'erosione rapida allo spianamento del fronte della catena. Mantenendo un fronte di catena molto ripido, il processo concentra le precipitazioni monsoniche, perpetuando il ciclo.

mente deboli. Con un modello costruito in modo da rappresentare la fisica essenziale del sistema himalayano-tibetano nel Miocene, hanno evidenziato che un canale crostale inferiore debole si insinua lateralmente in regioni con bassa erosione superficiale, ma si propaga verso la superficie in regioni di alta erosione, come l'attuale fronte della catena himalayana.

L'esistenza di meccanismi di retroazione tra i processi climatici e i meccanismi di deformazione geologica è un concetto del tutto nuovo. I ricercatori che finora

si sono occupati solo della loro disciplina specifica si ritrovano così a trattare con un mondo più profondamente interconnesso, e quindi, in fin dei conti, più interessante. E così come ora ricercatori di discipline diverse come le scienze della Terra, le scienze dell'atmosfera e l'idrologia stanno imparando a unire i propri sforzi, presto assisteremo all'integrazione degli studi biologici in questa «nuova» tettonica: se il clima può influenzare la crescita delle catene montuose, è plausibile che lo possano fare anche gli ecosistemi.

### PER APPROFONDIRE

BEAUMONT C., *Himalayan Tectonics Explained by Extrusion of a Low-Viscosity Crustal Channel Coupled of Focused Surface Denudation*, in «Nature», Vol. 414, pp. 738-742, 13 dicembre 2001.

HODGES K.V. e altri, *Southward Extrusion of Tibetan Crust and Its Effect on Himalayan Tectonics*, in «Tectonics», Vol. 20, n. 6, pp. 799-809, 2001.

WOBUS C.V. e altri, *Has Focused Denudation Sustained Active Thrusting at the Himalayan Topographic Front?*, in «Geology», Vol. 31, n. 10, pp. 861-864, ottobre 2003.

BARROS A.P. e LANG T.J., *Monitoring the Monsoon in the Himalayas: Observations in Central Nepal*, in «Monthly Weather Review», Vol. 131, n. 7, pp. 1408-1427, giugno 2001.