

Ocurrència i predicció de terratrèmols

Antoni M. Correig*

Introducció

La naturalesa es regeix per una dinàmica diversa que es manifesta de manera força complexa. La intensitat d'aquestes manifestacions és variable, tant a l'espai com en el temps, i a vegades presenta una gran violència. Pensem per exemple en l'acció dels huracans, els terratrèmols, les erupcions volcàniques, els esclavissaments de terres, els temporals de llevant, etc. Aquests processos naturals obeeixen unes lleis determinades, i estan originats per uns mecanismes que, lentament, anem identificant i entenent. No és acceptable de creure, per tant, que aquests fets violents, aquestes *catàstrofes naturals*, són imprevisibles i que estem mancats de recursos per defensar-nos-en. Ha passat ja, sortosament, l'època del fatalisme.

En aquest treball ens centrarem en l'estudi de l'origen i ocurrència de terratrèmols i la possibilitat de predir-los. Veurem que els haurem d'estudiar des d'un punt de vista general, en el sentit que són una conseqüència de l'activitat global de la Terra, especialment de la litosfera i el mantell. Malgrat l'extrema complexitat d'aquest sistema dinàmic, veurem també que, si més no com a punt de partida, el podem estudiar mitjançant models (fenomenològics) simples i que, tanmateix, ens reproduïxen bona part de les observacions. Aquests models seran el nostre laboratori d'experimentació i d'estudi de l'evolució del sistema sismogènic.

La Terra es va formar com a planeta del sistema solar fa uns 4.500 milions d'anys. No sabem ben bé si la Terra, en formar-se, adquirí una temperatura elevada o bé s'escalafà posteriorment a causa de la desintegració d'elements radioactius. Sigui quin sigui el mecanisme, és un fet ben establert que la distribució de temperatures al mantell és lleugerament superadiabàtica, i, per tant, capaç de sostenir corrents convectius. La part superior de les cel·les convectives (que tenen una temperatura d'uns 273 K) en refredar-se defineixen una capa límit coneguda com a *litosfera*, de gruix variable (de 0 km a 80 km als oceans i de 150 km a 200 km als continents), i que donen lloc a un reduït nombre de grans plaques. Aquestes plaques estan en moviment relatiu

les unes respecte a les altres, i en aquest moviment preserven l'àrea de la superfície de la Terra. La velocitat relativa de les plaques varia entre 2 cm/any i 10 cm/any. Aquest moviment continu provoca una deformació de la litosfera, especialment a les vores de les plaques, amb la consegüent variació de l'estat d'esforços. Quan la concentració d'esforços en una zona determinada supera la resistència del material es produeix una ruptura, i s'allibera de manera sobtada part de l'energia acumulada. Aquest alliberament sobtat d'energia el coneixem com a *terratrèmol*. Tanmateix, les plaques continuen movent-se, amb la qual cosa continuen deformant-se i originant terratrèmols successius. Podem considerar que hem arribat en un estat estacionari de deformació, concentració d'esforços i alliberament sobtat d'energia.

En el procés que hem descrit podem distingir dues escales temporals ben diferenciades. Una correspon a l'escala del moviment de les plaques i origina l'ocurrència de grans terratrèmols (alliberament de la major part de l'energia acumulada); és de l'ordre de 100-1.000 anys (durada mitjana de l'interval de temps transcorregut entre l'ocurrència de grans terratrèmols en una mateixa zona) i podem caracteritzar-la com de l'ordre de magnitud de $10^9 - 10^{10}$ s. L'altra escala correspon al temps que tarda a alliberar-se l'energia, la durada de la ruptura d'aquests terratrèmols grans, de l'ordre de magnitud de 10^2 s. Cal esmentar també, com a fet d'observació, que els terratrèmols superficials molt sovint originen rèpliques que poden durar fins a un any de mitjana, de l'ordre de magnitud de 10^7 s. Ens trobem, doncs, en un complex procés de relaxació d'esforços, regulat per tres escales temporals. Cal també tenir present que, a part de l'ocurrència de grans terratrèmols juntament amb les seves rèpliques, se'n produeixen d'altres de menor grandària i amb una distribució temporal aparentment aleatòria.

En les seccions que segueixen veurem amb més detall què és un terratrèmol i com caracteritzar-lo, quines són les pautes de la seva recurrència; presentarem un model global d'activitat sísmica i, finalment, discutirem quines són les possibilitats de predicció sísmica.

Terratrèmols i cicle sísmic

Com a resultat de l'estudi del terratrèmol de San Francisco de l'any 1906, Reid proposà un mecanisme, encara vigent, per explicar la generació d'un terratrèmol,

* Antoni M. Correig (Reus, 1947) és doctor en Física per la Universitat de Barcelona (1977), director del Laboratori d'Estudis Geofísics Eduard Fontserè de l'IEC i catedràtic de l'àrea de Física de la Terra, Astronomia i Astrofísica del Departament d'Astronomia i Meteorologia de la UB.

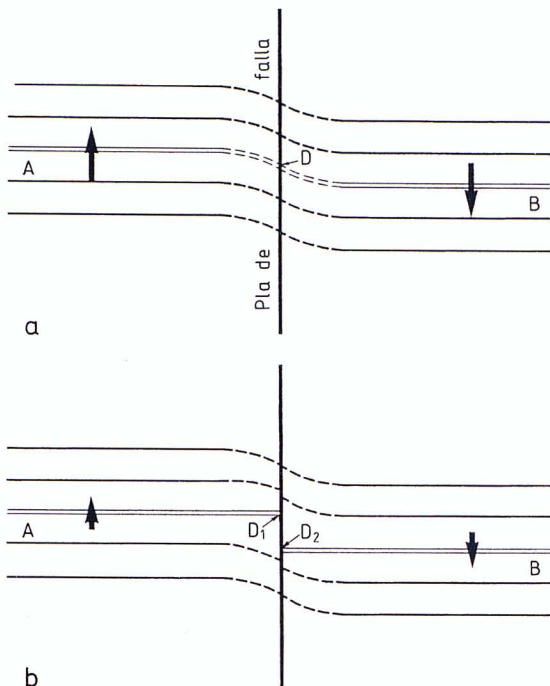


Figura 1: Model de Reid del rebotament elàstic

mecanisme que es coneix amb el nom de *rebotament elàstic*, basat en el concepte de procés de càrrega seguit d'una descàrrega sobtada. La figura 1 representa esquemàticament el model de Reid: a la figura 1a, a causa de l'acció de les forces A i B (originades pel moviment relatiu de les plaques tectòniques), el material es va deformant, i, per tant, es van acumulant esforços. A la figura 1b el material ha cedit (l'esforç acumulat ha sobrepassat la resistència del material) en forma d'un trencament segons una falla, mentre que s'allibera una part dels esforços acumulats.

D'acord amb el model de Reid, un terratrèmol és justament el trencament, que caracteritzem pel *lliscament* d definit com a $d = (D_1 - D_2)$, tal com hem representat a la figura 1b. Aquest lliscament ens dona compte de quant s'ha separat el material d'un costat de la falla respecte al material de l'altre costat. Altrament dit, és una mesura de la discontinuïtat en la posició de dos punts inicialment coincidents a través del pla de falla. És el que en cristallografia es coneix com a *dislocació*.

Des d'un punt de vista matemàtic, és poc convenient treballar amb discontinuïtats, i per això hom les substitueix per sistemes de forces equivalents, en el sentit que un sismògraf enregistrarà la mateixa pertorbació que en el cas d'un terratrèmol real. No és l'objectiu d'aquest article detallar la formulació matemàtica de la font sísmica (el lector interessat pot consultar, per exemple, el llibre d'Udias i Mezcuca, 1997), sinó que ens serà suficient donar el resultat: *el sistema de forces equivalent a la dislocació consisteix en un doble parell de forces sense moment resultant*. L'orientació del doble

parell de forces la podem donar en termes de dos elements simètrics d'un tensor simètric de segon ordre, on un dels subíndexs es refereix a l'eix en el qual descansa el braç de la força, i l'altre, a l'eix en el qual es dirigeix la força. Ja que estem modelant una falla de cisalla pura, els elements de la diagonal seran nuls. Els elements de la matriu $[A]$ del tensor seran tots nuls excepte, per exemple, $a_{12} = a_{21} = 1$. Pel que fa a la grandària del sistema de forces, aquesta ens ve donada pel moment de qualsevol dels dos parells de forces, i es coneix com a *moment sísmic* M (un escalar), definit com el producte de la rigidesa del medi per l'àrea de la superfície de la falla i per la dislocació. Com a resultat final, obtindrem un focus sísmic representat per un tensor simètric de segon ordre la matriu del qual ens ve donada per $M[A]$. El tensor és de traça nul·la i el seu determinant és zero, per tant només té quatre graus de llibertat: un grau per la norma M del tensor i tres per l'orientació del doble parell de forces, coneguda com a *mecanisme focal*. Podem determinar el mecanisme focal a partir del sentit del moviment del primer pols de l'ona P enregistrada pel sismògraf, i el moment sísmic, a partir de l'amplitud del pols. Aquests quatre paràmetres caracteritzen el focus sísmic, si bé per acabar de caracteritzar el terratrèmol ens cal donar-ne la localització (hipocentre) i el temps d'ocurrència. Aquests quatre paràmetres els determinarem a partir del temps d'arribada de les diverses ones sísmiques.

Cal fer notar que la grandària d'un terratrèmol ha estat usualment estimada en termes de la magnitud m , una mesura empírica de la mida del terratrèmol aproximadament proporcional al logaritme del moment sísmic M . Fóra ideal poder mesurar aquesta grandària a partir de l'energia alliberada, però aquest paràmetre no es pot avaluar directament. Per això, és preferible utilitzar el moment sísmic escalar (o, abreujadament, moment sísmic) per caracteritzar un terratrèmol.

En resum, un terratrèmol individual es caracteritza pels paràmetres següents: temps origen, localització hipocentral, moment sísmic i mecanisme focal, paràmetres que es poden determinar tots a partir dels sismogrames.

Reid també observà, i després ha estat àmpliament confirmat, que pràcticament tots els terratrèmols de magnitud superior a 6 (terratrèmols mitjans tirant a grans) ocorren en falles *preexistents*, és a dir, la majoria de terratrèmols representen una ruptura repetida d'una falla donada, ruptura que ve determinada per les forces de fricció locals. Així, la deformació s'acumula segons la falla a causa dels moviments relatius sobre cada costat. A causa de la fricció, la falla està "travada" i no es mou. Superada la fricció, l'esforç s'allibera. Com que els processos tectònics els podem considerar estacionaris, la deformació també la hi podem considerar, i això ens suggereix, doncs, que els terratrèmols ocorren en falles preexistents a intervals regulars, coneguts com a *inter-*

vals de recurrència. La figura 2, tret de Shimazaki i Nakata (1980), representa aquest procés. La figura 2a ens mostra el comportament predit d'una falla segons aquesta hipòtesi (model *predictible*), i l'esforç alliberat. T_1 representa la resistència de la falla; un cop aquest valor ha estat superat, la falla es destrava i llisca, i l'esforç cau fins a un mínim T_2 , que dependrà de la fricció local entre ambdós costats de la falla. El lliscament d serà el mateix per a cada episodi i l'interval de recurrència serà constant. Aquesta similitud de cada terratrèmol dona lloc al concepte de *terratrèmol característic*, segons el qual les falles estan segmentades i els distints segments individuals es comporten de manera predictable.

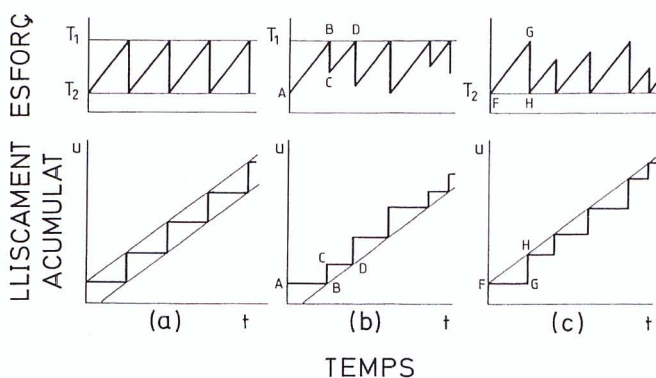


Figura 2: Comportament d'una falla segons el model de Reid

Malauradament, la recurrència predita a la figura 2a no s'observa. Les figures 2b i 2c presenten dos tipus de comportament més general, on hom permet la variació ja sigui de T_1 o de T_2 . Quan T_1 és constant i T_2 variable, el terratrèmol es comporta com a *predictible en el temps* (figura 2b). Durant l'interval de temps AB l'esforç es va acumulant (vegeu la part superior de la figura), i, en arribar al punt B (en assolir el límit de resistència del material), es produeix la falla amb una caiguda d'esforços BC. Aquesta caiguda d'esforços s'acompanya (part inferior de la figura) del lliscament BC. Continuant en la part inferior de la figura, si des de C tracem una paral·lela a l'eix del temps, la intersecció D ens proporciona el temps d'ocurrència del proper terratrèmol. Tanmateix, aquest model no pot predir la grandària del lliscament futur. En el segon model, el de *lliscament predictable* (figura 2c), T_1 és variable i T_2 és constant. L'esforç es va acumulant (part superior) i com més gran sigui el temps transcorregut F-G, més gran serà la caiguda d'esforços GH (o bé el lliscament, com es pot veure a la part inferior); el temps de l'ocurrència no es pot preveure. Comparant les prediccions dels tres models de la figura 2 amb observacions (amb dades instrumentals, històriques i paleosísmiques) es troba que, en general, el temps d'ocurrència mitjà està ben definit, si bé amb fluctuacions significatives. A la figura 3 presentem les dades d'una sèrie sísmica de Parkfield. Si

bé les dades són molt escasses (la naturalesa segueix les seves lleis), podem observar-ne clarament el comportament general. Si el temps de recurrència fos periòdic, tots els terratrèmols estarien sobre una recta. Tal com podem veure, els punts hi són molt propers, però a la vegada prou allunyats per perdre tota possibilitat de predicció. Hem d'abandonar, per tant, la idea de predicció determinista d'un terratrèmol a partir de l'observació de terratrèmols anteriors.

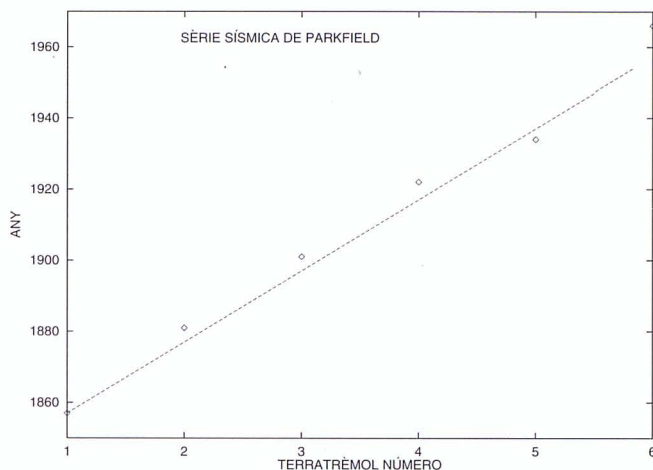


Figura 3: Sèrie sísmica de Parkfield i regressió lineal de les dades

Malgrat aquestes dificultats, podem fer encara unes generalitzacions bàsiques. En primer lloc, el lliscament total al llarg d'una falla ha d'equilibrar els moviments de les plaques: si una falla està segmentada, el lliscament total dels diversos segments, fetes les mitjanes sobre molts cicles, ha d'estar d'acord amb el lliscament esperat. I, en segon lloc, els processos que governen la tectònica de plaques són aproximadament estacionaris, i, per tant, hom pot estimar, si més no en principi, temps de recurrència mitjans. D'altra banda, ja hem dit que les falles actives estan segmentades, i cada episodi sísmic es produeix en un segment donat. Si coneixem la història sísmica d'una falla per a temps superiors al de recurrència, és possible detectar si algun segment encara no s'ha trencat; aquest segment no trencat es coneix com a *gap* ('buit') sísmic. Remarquem que aquest terme s'utilitza per a regions en les quals hom sap que hi han ocorregut terratrèmols (i per tant són zones actives), però que no han sofert encara cap esdeveniment en un període de temps que sigui una fracció significativa del temps de recurrència. Si hom pot detectar un buit sísmic, es pot assignar a aquesta zona un potencial sísmic relativament gran.

En els darrers anys s'ha investigat intensament sobre recurrència sísmica en termes de dinàmica no lineal, les solucions de la qual presenten moltes vegades un comportament caòtic. Un exemple clàssic d'aquest tipus

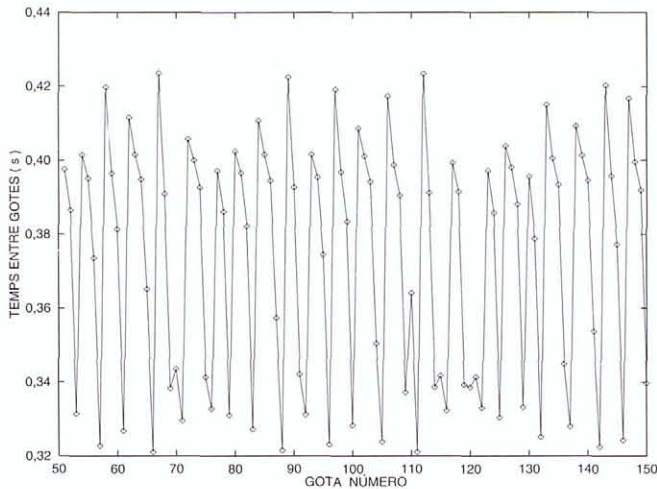


Figura 4: Exemple de l'interval de temps entre gotes pel model de l'aixeta mal tancada

de comportament, força representatiu per al cas de les sèries sísmiques, és el de l'aixeta mal tancada que goteja (Shaw, 1984). Si el cabal que raja és petit, l'interval de temps entre la caiguda de gotes consecutives presenta un comportament caòtic (notem que si substituïm l'expressió "gota d'aigua" per "caiguda d'esforços", o "gota d'esforços", l'analogia amb la sèrie sísmica és total). L'estudi de la formació i caiguda de la gota d'aigua, (en termes de la tensió superficial, cabal, fregament, temperatura i gravetat) és complicat. Tanmateix, hi ha una manera molt simple de simular la formació i caiguda de la gota: considerem una massa penjada d'una molla, amb fregament i sotmesa a la força de la gravetat, en la qual la massa creix a un ritme constant; en assolir la massa un desplaçament donat, una part de la massa (proporcional a la velocitat del sistema en el punt de desprendiment) es desprèn per tornar seguidament a començar a créixer. A la figura 4 presentem un gràfic del temps entre gotes consecutives respecte al número de la gota: el comportament és caòtic. Podem distingir, tanmateix, un temps mitjà (temps de recurrència) ben definit i uns temps màxim i mínim entre gotes consecutives, però qualsevol temps entre el màxim i el mínim és possible, i alhora imprevisible. A la figura 5 presentem un dibuix anàleg al de la sèrie sísmica de Parkfield per a unes quantes gotes de la sèrie, escollides a l'atzar. Podem adonar-nos de la gran analogia existent entre ambdues figures, clarament indicadora de la possibilitat que el cicle sísmic sigui caòtic. Aquests resultats poden ser interessants en una avaluació probabilista de la perillositat sísmica.

L'activitat sísmica

En la secció anterior hem abordat el problema de l'ocurrència de terratrèmols des del punt de vista de "l'expectació": quan es produirà el proper terratrèmol, i com

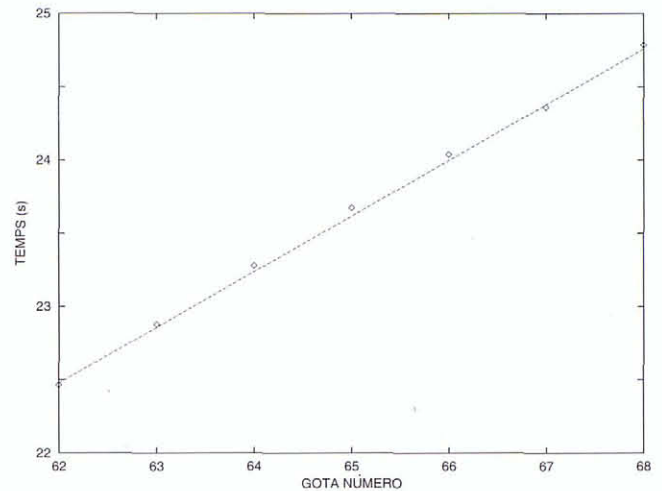


Figura 5: Simulació numèrica de la sèrie sísmica de Parkfield a partir del model de l'aixeta mal tancada

serà de gran? (Es tracta d'estar preparats, és clar...) Hem vist el paper fonamental que té el cicle sísmic i, associat amb ell, el període mitjà de recurrència. No disposem, però, de cap model físic per representar-lo, malgrat la seva extrema simplicitat: durant un interval donat de temps es van acumulant esforços, els quals s'alliberen de manera sobtada en traspasar un llindar determinat. L'evolució caòtica de l'aixeta gotejant pot ser una bona aproximació, però és un model purament fenomenològic; ens pot explicar els temps de recurrència del cicle sísmic i la grandària de l'esdeveniment (la massa de la gota), però no ens pot explicar el cicle sísmic com un fenomen de relaxació d'esforços. Potser els arbres (l'ocurrència de grans terratrèmols, els destructors), no ens deixen veure el bosc (l'ocurrència de sismicitat). Anem, doncs, a examinar amb més detall l'evolució temporal de l'activitat sísmica.

L'activitat sísmica, o sismicitat, queda enregistrada en el que es coneix com a *catàleg sísmic*. Una consulta al catàleg ens revela que no solament hi ha terratrèmols grans o característics, sinó que aquests, especialment els superficials, generalment van precedits i/o seguits d'altres de menys grandària: el més gran és conegut com a *esdeveniment principal* (el que ens defineix la sèrie sísmica), els precedents com a *precursors* i els que el segueixen, com a *rèpliques* (notem, tanmateix, que aquesta classificació és un conveni i, per tant, subjectiva). A més, entre dos esdeveniments principals es produeixen, de manera aparentment aleatòria, esdeveniments de grandària variable a intervals irregulars. En resum les característiques fenomenològiques de la sismicitat, tal com es reflecteixen en els catàlegs sísmics, i de la població de falles són les següents (Main, 1996):

1. La població de falles és invariant d'escala en més de set ordres de magnitud, i presenta una estructura geomètrica jerarquitzada.

2. L'estadística de la freqüència de terratrèmols respecte a la seva magnitud (o el moment sísmic) obeeix una llei potencial, coneguda com a llei de Gutenberg-Richter (establerta fa més de 60 anys!).
3. Els terratrèmols es caracteritzen per una caiguda d'esforços relativament constant (si bé amb una gran dispersió) i relativament petita en un ampli interval de magnituds (uns 3 MPa de mitjana, comparat amb l'esforç tectònic i litostàtic de l'escorça d'entre 10 MPa i 100 MPa).
4. Les falles i les fractures no són llises, i tenen escales autoafins o bé autosimilars.
5. La població de terratrèmols a diferents zones tectòniques manifesten variabilitat espacial, agrupació (*clustering*) i intermitència, quantitativament consistent amb escales multifractals.
6. La distribució espacial de les localitzacions hipocentrics de terratrèmols i emissions acústiques a les roques ve representada per lleis potencials, tant espacials com temporals.
7. Les sèries de precursors i de rèpliques decauen a un ritme $r(t) \approx t^{-p}$, on p és l'índex d'una llei potencial de l'ordre $p \simeq 1$ i t el temps relatiu al ters relatiu al terratrèmol principal.
8. La sismicitat pot ser induïda, des de punts allunyats, per pertorbacions d'esforços menors que la caiguda d'esforços dels terratrèmols individuals. Podem parlar, per tant, d'acció a distància.

La simple enumeració de les característiques de la sismicitat ens fa adonar que la complexitat que mostra no podrà ser modelada mitjançant un procés determinista d'uns quants graus de llibertat. Aquest últim podrà donar-nos informació parcial sobre algun aspecte concret (com és ara el cas de l'aixeta gotejant, que ens dona compte del temps i la grandària dels terratrèmols més grans de la sèrie), però no de la globalitat del procés físic. A la vista de les característiques de les dades observades, sembla clar que estem tractant amb un sistema físic amb molts graus de llibertat, i que n'haurem d'abordar l'estudi de manera formalment anàloga a l'estudi d'un fenomen macroscòpic a partir d'un gran nombre d'elements. Dit d'una altra manera, ens trobem davant d'un problema formal de física estadística i, per tant, podrem utilitzar les eines i la metodologia ben establertes ja en aquest camp.

L'escenari físic en el qual ens movem és el següent: es tracta d'un procés de relaxació que es dona en un sistema físic obert, en el qual l'entrada (l'acumulació d'esforços) la podem considerar com a contínua (originada pel moviment de les plaques tectòniques) i la sortida consisteix en l'alliberament sobtat dels esforços acumulats (terratrèmols), que a vegades es produeix escalonadament (precursors i rèpliques). Aquest procés

de relaxació està caracteritzat pels vuit fets d'observació esmentats abans, avalats per més de cent anys d'observació continuada.

Aquest procés és anàleg al que segueixen els sistemes físics prop del punt crític, els fenòmens crítics, i, més concretament, a una transició de fase ordre-desordre. Com a exemples ben coneguts de fenòmens crítics tenim els sistemes aigua-vapor i el material magnètic. En el cas aigua (ordre) - vapor (desordre), la transició de fase es produirà a una temperatura donada, que dependrà de la pressió, i comportarà un canvi en la densitat del fluid; tanmateix, a una temperatura i pressió específiques (punt crític aigua-vapor) les dues fases coexisteixen amb una mateixa densitat. En el cas del material magnètic, per sota d'una temperatura crítica, la temperatura de Curie, els dipòls estan orientats en una mateixa direcció (ordre), mentre que per sobre de la temperatura de Curie els dipòls poden presentar qualsevol direcció (desordre). En el cas dels terratrèmols, la transició de fase correspon al pas del material sotmès a esforços (ordre) a un material lliure d'esforços (desordre), i el punt crític vindrà definit per la igualtat entre l'esforç acumulat i la fricció.

En termes generals, i de manera qualitativa, podem definir un punt crític (Bruce i Wallace, 1989) com el final d'una línia definida a l'espai de propietats (per exemple la temperatura) que controla l'estat del sistema, i que separa dues (o més) fases distintes. Que aquesta línia de coexistència de fases acabi en un punt crític vol dir que, en aquest punt, la distinció entre les dues fases s'esvaeix. El comportament del sistema prop del punt crític el podem caracteritzar mitjançant dos paràmetres: el *paràmetre d'ordre* i la *longitud de correlació*. El paràmetre d'ordre és una mesura quantitativa de la diferència entre les fases que es fondran en un punt crític. Definit d'aquesta manera, el paràmetre d'ordre s'esvaeix en assolir-se el punt crític segons la línia de coexistència de fases, i pot interpretar-se com una mesura de l'ordre-desordre que es genera en allunyar-nos del punt crític. La longitud de correlació és una mesura de l'extensió de l'estructura espacial del sistema, i dona compte de la distància típica a la qual el comportament d'una variable es correlaciona amb (o bé està influïda per) el comportament d'una altra variable, i hom pot entendre-la com una mesura de la porció més gran de l'estructura espacial correlacionada. La longitud de correlació L ve expressada en termes d'una llei potencial

$$L \propto (p - p_c)^{-\alpha},$$

on p és el paràmetre que fem variar, p_c el seu valor crític i α un paràmetre crític. Quan $p \rightarrow p_c$, la longitud característica L divergeix, cosa que implica, d'una banda, que no existeix cap longitud característica (per tant, són possibles totes les longituds), i, de l'altra, l'acció a distància.

Propietat	Pila de sorra	Terratrèmol
condició de contorn	flux constant de grans de sorra	flux constant de deformació
paràmetre crític	angle de repòs θ_c	esforç tectònic σ_c
fluctuació dinàmica	petites fluctuacions de l'angle $\delta\theta \ll \theta_c$	caiguda d'esforços petita $\delta\sigma \ll \sigma_c$
lleï potencial	volum d'esllavissament o energia	longitud del focus, moment sísmic, energia (lleï de Gutenberg i Richter)

Taula 1: Característiques de la criticalitat autoorganitzada

En l'analogia entre els fenòmens crítics (per exemple el sistema aigua-vapor) i l'ocurrència de terratrèmols, la concentració d'esforços és l'anàleg del camp de pressions, i els lliscaments sobre la falla tenen un paper similar al del camp de densitats. El pas d'una regió de la falla en l'estat travat a una altra amb lliscaments és comparable a una transició de fase. El paràmetre d'ordre constitueix una mesura de l'amplada de la distribució de lliscaments locals sobre la falla, i la longitud de correlació es pot interpretar com la dimensió característica del terratrèmol. Fixem-nos que la teoria dels fenòmens crítics és capaç d'explicar-nos el conjunt d'observacions sísmiques esmentades abans. Podem concloure, doncs, que l'analogia entre l'ocurrència de terratrèmols i els fenòmens crítics pot ser un bon punt de partida per aprofundir en la física de la sismogènesi.

La teoria de fenòmens crítics, doncs, pot explicar-nos les propietats d'invariància observades en l'ocurrència de terratrèmols. Tanmateix, cal tenir en compte que els fenòmens crítics estan referits al laboratori: ens cal sintonitzar (variar) un o més paràmetres externs per assolir un punt crític (per exemple la pressió i la temperatura en el sistema aigua-vapor, o la temperatura en els materials magnètics). Aquest fet implica també que els fenòmens crítics no depenen del temps, no s'hi manifesta cap escala temporal característica. Aquest últim aspecte no s'ajusta a les observacions, ja que hem dit abans que l'ocurrència de terratrèmols es caracteritza per dues escales temporals d'ordre de magnitud molt diferent, la que ens defineix el període de recurrència o temps característic d'evolució del sistema, i la de la durada de la ruptura; si incloem les rèpliques, tenim una tercera escala temporal. I d'altra banda, com se fa la sintonització del paràmetre (l'esforç) que provocarà la ruptura o discontinuïtat (aspecte comú a tots els fenòmens naturals). Clarament aquesta sintonització haurà de venir donada per agents externs.

Bak *et al.* (1988) proposaren un model per donar compte d'aquest comportament conegut com *criticalitat autoorganitzada*. Segons aquest model, el sistema s'autoorganitza no solament a partir d'una estructura, procés que dura des de fa alguns milers de milions d'anys, sinó també en l'estructura concreta del punt crític on es queda, a part de poder experimentar petites fluctuacions dinàmiques. En un cert sentit, podem dir

que l'estat autoorganitzat en el punt crític representa l'atractor del sistema dinàmic. Aquest model, intrínsecament no lineal i no conservatiu, necessita un flux constant d'energia, la qual s'allibera posteriorment de manera discontinua; fent la mitjana sobre un interval de temps suficientment gran, podem considerar el comportament del sistema com a estacionari, sempre al voltant del punt crític. Com a exemple paradigmàtic d'un sistema que presenta criticalitat autoorganitzada, Bak *et al.* (1988) presentaren el model d'una pila de sorra. Considerem una taula circular sobre la qual anem tirant grans de sorra, de manera lenta i continuada. De primer s'anirà formant una piràmide de sorra que anirà creixent excepte pel que fa a esllavissades esporàdiques; si la sorra arriba a la vorera de la taula, cau i es perd. Arribarà un moment en el qual s'haurà assolit un punt crític (el pendent crític de repòs de la pila) i allà es queda el sistema excepte per petites fluctuacions (esllavissades o allaus) que es produiran en superar-se el pendent crític. A partir d'aquest moment, independentment de petites excursions allunyant-nos del pendent d'equilibri, de mitjana hem assolit l'estat estacionari: hem arribat a un equilibri entre el flux d'energia d'entrada (els grans de sorra) i el de sortida (els grans que episòdicament cauen de la taula). La distribució de mides de les esllavissades segueix una lleï potencial, cosa que ens indica que petits episodis en la dinàmica del sistema poden originar una reacció en cadena que afecti a un gran número d'elements: efecte disparador per acció a distància. Basat en el model d'Ising del magnetisme, l'evolució temporal de la pila de sorra es pot simular mitjançant autòmats cel·lulars: una xarxa regular d'elements que interaccionen mitjançant simples regles locals. Una característica comuna dels autòmats cel·lulars, amb distintes regles locals, és que generen ordre dins de grans intervals espacials, el qual emergeix espontàniament mitjançant retroalimentació dinàmica i autoorganització. Les característiques essencials que ens defineixen la similitud entre l'ocurrència de terratrèmols i la pila de sorra les hem representades a la taula 1 (Main, 1966).

Un altre model àmpliament utilitzat per simular l'ocurrència de terratrèmols, i que s'ha vist que evoluciona a un estat de criticalitat autoorganitzada, fou introduït per Burridge i Knopoff (1967). En aquest model, conegut com a *model de blocs i molles*, la

litosfera es representa per mitjà d'una malla de blocs, units els uns als altres per molles "entrepanades" entre dues plaques rígides, fixa la de sota i movent-se a una velocitat constant V la de dalt, que està unida als blocs

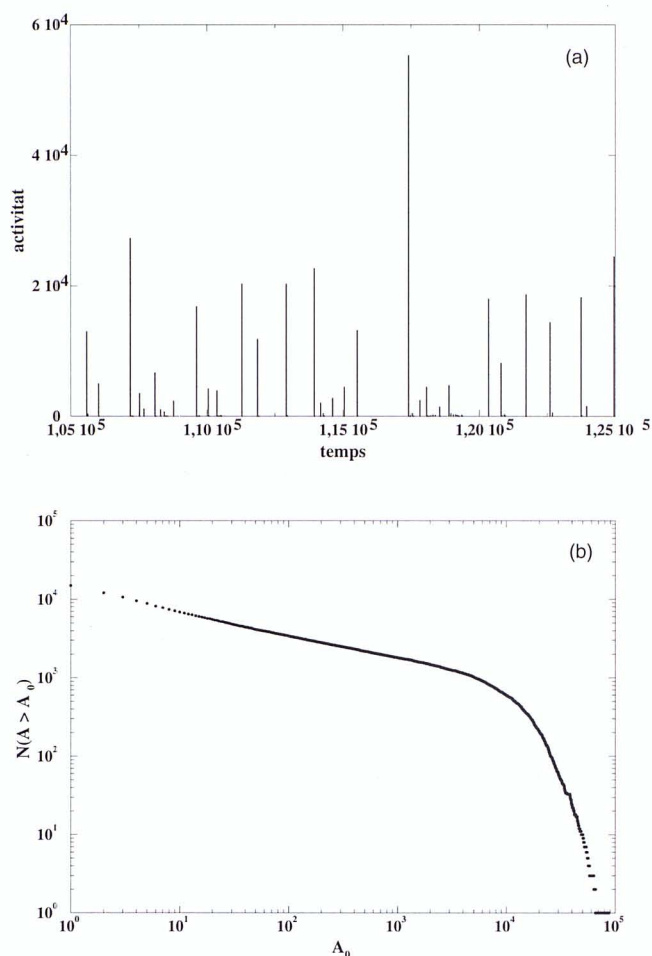


Figura 6: Exemple de catàleg sísmic, generat a partir d'un model de criticalitat autoorganitzada (fig. 6a), i distribució de mides (fig. 6b)

mitjançant altres molles. Els blocs estan simplement col·locats sobre la placa inferior, i estan sotmesos a una llei de fricció que hom ha d'especificar. Quan l'energia acumulada per una molla determinada supera la fricció, el bloc es desplaça i l'energia alliberada es reparteix entre els blocs veïns més propers. L'evolució temporal del sistema de blocs i molles es pot estudiar ja sigui resolent directament l'equació del moviment simultàniament pel conjunt de tots els blocs, o bé mitjançant autòmats cel·lulars. Pot demostrar-se que en determinades condicions, molt generals, ambdós sistemes, el de la pila de sorra i el de blocs i molles, són equivalents, i generen, per tant, el mateix *catàleg sísmic*. En ambdós casos, també, la no-linearitat del sistema és deguda a la forta interacció local i a l'existència d'un llindar (per sota del qual no es produeixen esllavissades o no es mouen els blocs), cosa que es tradueix en

condicions inicials variables. A la figura 6 presentem un catàleg sísmic generat mitjançant una pila de sorra (figura 6a), en el qual l'activitat correspon al nombre de grans de sorra, i la distribució d'amplituds (figura 6b), que segueix clarament una llei potencial en gairebé tres ordres de magnitud. Cap d'aquests dos models, però, pot generar rèpliques.

No tot són, però, flors i violes, ja que els models estan basats en unes hipòtesis clau molt simples (i la Terra és molt complexa!): hom supeix energia al sistema a un ritme constant i s'allibera de manera intermitent, de manera que en resulten terratrèmols. Un paràmetre clau el constitueix, doncs, el ritme d'entrada d'energia, que es tradueix en la velocitat de la placa superior, o bé en el flux de grans de sorra, i hom ha pogut constatar que, depenent del seu valor, el sistema pot assolir un estat subcrític o supercrític, i, en conseqüència, no definir un veritable estat de criticalitat autoorganitzada. Efectes similars poden ser deguts a la inhomogeneïtat que sabem que presenten les falles, i que encara no han estat reflectits en els models. Un altre problema és el de la coexistència de criticalitat autoorganitzada i criticalitat. Hom creu que la naturalesa crítica dels terratrèmols grans sorgeix de la interacció entre correlacions esforç-esforç de gran abast i l'estructura jeràrquica del sistema de falles: un nivell donat de la ruptura per a un nivell jeràrquic determinat és com un punt crític per a tots els nivells inferiors. Des d'un altre punt de vista, podem dir que la coexistència entre criticalitat autoorganitzada i criticalitat és possible a causa del fet que ambdós fenòmens es corresponen a dues escales temporals diferents: temps molt grans per a la criticalitat autoorganitzada (escala temporal de la concentració d'esforços) i molt petita per a la criticalitat (escala temporal de l'ordre de la ruptura). Novament, però, les rèpliques no es tenen en compte: constitueixen un problema encara no resolt. Aquestes dificultats són il·lustratives en el sentit que el model d'ocurrència de terratrèmols encara no està pas establert ni molt menys, al contrari, està encara a les beceroles. Tanmateix, el camí emprès és molt prometedor.

Predicció de terratrèmols i estimació de la perillositat sísmica

Diem que un sistema físic és previsible si, dins uns estrets marges d'incertesa, podem avançar amb antelació suficient *on, quan i com*, és a dir, en quin lloc és produirà el terratrèmol, quant de temps falta perquè es produeixi i com serà de gran (quina magnitud tindrà). Fins ara ens hem concentrat en la construcció d'un model que ens expliqui la fenomenologia dels terratrèmols i les falles sismogèniques en un ampli ventall d'escales, i hem vist que l'escorça de la Terra es troba en un estat de, o proper a, criticalitat autoorganitzada, és a dir, un estat vorejant el caos. Vegem les implicacions d'aquests re-

sultats amb vista als problemes pràctics de predicció de terratrèmols i d'estimació de la perillositat sísmica.

El tema de la predicció està basat en la correcta identificació de precursors sísmics. Se n'ha proposat una llarga llista, que va des del comportament dels animals fins a variacions electromagnètiques a la ionosfera. Com que el problema és seriós i de conseqüències importants, una comissió creada *ad hoc* ja fa anys els ha passat per un sedàs molt fi, acceptant-ne finalment tres com a "llista preliminar de precursors sísmics significatius" (Wyss, 1991). Aquests precursors són: 1) quiescència sísmica prèvia als grans terratrèmols, 2) sismes precursors, i 3) decreixement de la concentració de gas radó. L'únic significat d'aquesta llista és que ha passat pel sedàs de la comissió, però malauradament no pel de l'estadística, ja que cap dels tres precursors és estadísticament significatiu. Dit d'una altra manera, des del punt de vista de l'anàlisi de les observacions no s'ha trobat encara cap precursor realment significatiu. Hi ha tres possibles explicacions per a aquesta falta de precursors: 1) simplement no n'hi ha, 2) n'hi ha però encara no els hem descobert, 3) n'hi ha, però no en el tipus de dades que hom examina normalment.

Des del punt de vista dels models d'ocurrència de terratrèmols, hi ha el convenciment cada vegada més generalitzat que, ja d'entrada, la predicció fiable d'un terratrèmol particular no és possible, a causa d'una combinació de tres factors: 1) una dinàmica no lineal que involucra efectes disparadors o processos d'esllavissament, 2) un mostreig de dades incomplet i/o imperfecte, i 3) un sistema que es troba sempre en un estat d'estabilitat marginal, procés en el qual són inherents les fluctuacions físiques.

Donades aquestes condicions (falta de precursors i impediments teòrics), les línies de recerca encaminades a l'estudi d'una predicció determinista (l'on, el quan i el com) tenen poques esperances d'èxit, si més no en l'estat actual de coneixements.

Tanmateix, no tot és negatiu, no estem indefensos davant les catàstrofes naturals, tal com ja dèiem a la introducció. Tenim ben encaminats models d'ocurrència de terratrèmols, i podem aprofundir en un coneixement millor de la sismogènesi com a procés dinàmic. Pel que hem vist en la secció precedent, l'escorça terrestre es troba en un estat de criticalitat autoorganitzada, o com a mínim en un estat estacionari mantingut prop de l'estat crític. Aquest fet implica que l'alliberament de l'energia de deformació emmagatzemada és intermitent i impredecible per episodis concrets, però cal esperar que l'alliberament mitjà d'energia d'una població de terratrèmols serà constant sobre llargs períodes de temps. D'altra banda, tenim dades instrumentals des de fa 10^2 anys, històriques des de fa 10^3 anys i comencem a disposar de dades de paleosismicitat que ens permetran ampliar l'interval d'observacions a, com a mínim, 10^4

anys. Acceptant l'estacionarietat del procés sísmic, la unió de teoria i observacions ens condueix a poder efectuar una previsió probabilista de la perillositat sísmica, en la qual dels tres paràmetres que ens defineixen la predicció determinista (on, quan i com) en podem fixar dos, i normalment s'escull *on* i *com* per un *interval de temps* fixat. Cal que fem notar, per acabar, que com més puguem aprofundir en el coneixement de la sismogènesi i disposar de dades de més qualitat, més precisió podrem donar a l'assignació de la probabilitat d'ocurrència.

Cloenda

Acabat ja aquest breu resum, i d'acord amb el seu contingut, sembla oportú de recordar la controvèrsia existent, aquí i fora d'aquí, sobre si la geofísica és o no és física. Per això no ens cal sinó recordar les paraules de Leon Knopoff en la seva contesta en l'acte de nominació i entrega de la medalla de la Seismological Society of America, el 1990: "En el segle XIX, la física i la geofísica estaven estretament acoblades, però en el segle XX ambdós camps divergiren. La física tendí cada cop més a la física 'moderna' de partícules i matèria condensada. La sismologia, com a avantguarda de la geofísica, tendí a emfatitzar la primera síl·laba de la paraula geofísica, altrament dit, cap a l'exploració de l'interior de la terra mitjançant la utilització de l'equació lineal d'ones. En les dues últimes dècades d'aquest segle, físics i geofísics convergeixen de nou a partir de l'exploració de problemes no lineals derivats de la geofísica, bàsicament en la dinàmica de fluids i més recentment a partir de problemes sísmics. La sismologia, d'altra banda, està redescobrint la física a partir de la no-linealitat dels problemes de la font sísmica i de l'ocurrència de terratrèmols".

Bibliografia

- BAK, P., TANG, C. i WIESENFELD, K., Self-Organized Criticality, *Phys. Rev. A*, **38**, 364-374 (1988).
- BRUCE, A. i WALLACE D., Critical point phenomena: Universal physics at large length scales, 236-267, DAVIES, P. (ed.), *The New Physics*, Cambridge University Press (New York, 1989).
- BURRIDGE, R. i KNOPOFF, L., Model and theoretical seismology, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **57**, 341-371 (1967).
- MAIN, I., Statistical physics, seismogenesis and seismic hazard, *Rev. Geophys.*, **34**, 433-462 (1996).
- SHAW, R., *The Dripping Faucet as a Model Chaotic System*, Aerial Press (Santa Cruz, CA, 1984).
- SHIMAZAKI, K. i NAKATA, T., Time-predictable recurrence model for large earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, **7**, 2679-282 (1980).
- WYSS, M. (ed.), *Evaluation of Proposed Earthquake Precursors*, AGU (Washington, D. C., 1991).