

Geologia dell'Ambiente

Periodico trimestrale della SIGEA
Società Italiana di Geologia Ambientale



Supplemento al n. 1/2018
ISSN 1591-5352

Rischio sismico in Italia: analisi e prospettive per una prevenzione efficace in un Paese fragile



A cura di
Antonello Fiore e Vincent Ottaviani

Società Italiana di Geologia Ambientale

Associazione di protezione ambientale a carattere nazionale riconosciuta dal Ministero dell'ambiente, della tutela del territorio e del mare con D.M. 24/5/2007 e con successivo D.M. 11/10/2017

PRESIDENTE
Antonello Fiore

CONSIGLIO DIRETTIVO NAZIONALE
Danilo Belli, Lorenzo Cadrobbi, Franco D'Anastasio (*Segretario*), Daria Duranti (*Vicepresidente*), Antonello Fiore (*Presidente*), Sara Frumento, Fabio Garbin, Enrico Gennari, Giuseppe Gisotti (*Presidente onorario*), Gioacchino Lena (*Vicepresidente*), Luciano Masciocco, Michele Orifici, Vincent Ottaviani (*Tesoriere*), Angelo Sanzò, Livia Soliani

Geologia dell'Ambiente
Periodico trimestrale della SIGEA

Supplemento al n. 1/2018
Anno XXVI - gennaio-marzo 2018

Iscritto al Registro Nazionale della Stampa n. 06352
Autorizzazione del Tribunale di Roma n. 229
del 31 maggio 1994

DIRETTORE RESPONSABILE
Giuseppe Gisotti

COMITATO SCIENTIFICO
Mario Bentivenga, Aldino Bondesan, Giancarlo Bortolami, Giovanni Bruno, Giuseppe Gisotti, Giancarlo Guado, Gioacchino Lena, Giacomo Prosser, Giuseppe Spilotro

COMITATO DI REDAZIONE
Fatima Alagna, Federico Boccalaro, Giorgio Cardinali, Francesco Cancellieri, Valeria De Gennaro, Fabio Garbin, Gioacchino Lena, Maurizio Scardella

REDAZIONE
SIGEA: tel. 06 5943344
Casella Postale 2449 U.P. Roma 158
info@sigeaweb.it

PROCEDURA PER L'ACCETTAZIONE DEGLI ARTICOLI
I lavori sottomessi alla rivista dell'Associazione, dopo che sia stata verificata la loro pertinenza con i temi di interesse della Rivista, saranno sottoposti ad un giudizio di uno o più Referees

UFFICIO GRAFICO
Pino Zarbo (Fralerighe Book Farm)
www.fralerighe.it

STAMPA
Industria grafica Sagraf Srl, Capurso (BA)

Stampato con il contributo di Fralerighe Book Farm e ABE0 srl Siracusa

Questo numero è stato redatto sulla base delle informazioni disponibili al 15 giugno 2018

La quota di iscrizione alla SIGEA per il 2018 è di € 30 e dà diritto a ricevere la rivista "Geologia dell'Ambiente". Per ulteriori informazioni consulta il sito web all'indirizzo **www.sigeaweb.it**

Sommario

Premessa	
CLAUDIO CAMPOBASSO	5
Presentazione	
ANTONELLO FIORE E VINCENT OTTAVIANI	6
1. TERREMOTI E SOCIETÀ	
I disastri sismici in Italia: una riflessione sulle risposte sociali e culturali nel lungo periodo	
EMANUELA GUIDOBONI	11
La "prevenzione del giorno dopo" e quella per il nuovo secolo	
ROBERTO DE MARCO	19
La prevedibilità dei disastri sismici fra sismologia e storia	
GIANLUCA VALENSISE	24
Moderni sistemi per la prevenzione sismica	
ALESSANDRO MARTELLI	31
Vulnerabilità sismica e meccanismi resistenti alla scala urbana	
GIOVANNI CANGI	40
La gestione emergenziale dei fenomeni sismoindotti: i casi dei terremoti avvenuti in Abruzzo (2009), in Emilia-Romagna (2012) e nel Centro Italia (2016-2017)	
PAOLO MARSAN, ANGELO CORAZZA	45
Quando la scienza incontra il diritto: le responsabilità legate alla gestione del rischio tsunami	
CECILIA VALBONESI	58
Il ruolo delle assicurazioni nella prevenzione dei rischi: il caso dei terremoti	
DONATELLA PORRINI	64

In copertina: Carta della pericolosità sismica dell'Italia (Fonte: INGV) e *ex-voto* relativo al terremoto di Foligno del 13 gennaio 1832, conservato nel santuario di Santa Maria delle Grazie, a Cesena. (da E-Guidoboni e J. P. Poirier, *Quand la terre tramblait*, Paris, 2004).

Strumenti didattici per l'analisi dei fenomeni sismici FRANCESCA CIFELLI	69
Il terremoto nella mente DONATELLA GALLIANO, LUIGI RANZATO	75
Come i media raccontano un'emergenza LUCA CALZOLARI	80
2. IL RUOLO DELLE ISTITUZIONI	
Il monitoraggio sismico del territorio Italiano GAETANO DE LUCA, NICOLA VENISTI	85
Il Centro Allerta Tsunami (CAT) dell'Ingv ALESSANDRO AMATO E IL TEAM DEL CAT	91
Pericolosità sismica, normativa e classificazione sismica in Italia CARLO MELETTI, MASSIMILIANO STUCCHI, GIAN MICHELE CALVI	98
Evoluzione delle normative sismiche in Italia dal punto di vista geologico MAURIZIO LANZINI	107
La Microzonazione Sismica: prospettive e applicazioni nella pianificazione e progettazione SERGIO CASTENETTO, GIUSEPPE NASO	113
Le attività del Servizio Geologico d'Italia (ISPRA) a seguito della sequenza sismica del 2016-2017 in Italia Centrale GRUPPO DI LAVORO SGI SU EMERGENZA TERREMOTO	117
3. LA RICERCA SUI TERREMOTI IN ITALIA: METODI E PROSPETTIVE	
I caratteri della sismotettonica in Italia: osservazioni e modelli PAOLA VANNOLI, PIERFRANCESCO BURRATO	139
La sismicità del Veneto tra eventi storici e recenti JACOPO BOAGA	148
Il rischio sismico in Toscana e la microzonazione sismica MASSIMO BAGLIONE	154
La prevenzione del rischio sismico nella pianificazione urbanistica: la carta di pericolosità sismica della regione Lazio EUGENIO DI LORETO	160

Pericolosità sismica e memoria storica dei terremoti in Puglia VINCENZO DEL GAUDIO	167
Storia sismica della Basilicata con particolare riguardo ai secoli XIX e XX FABRIZIO TERENCE GIZZI, MARIA ROSARIA POTENZA	174
La sequenza sismica del Sannio-Matese 2013-2014: un esempio di intrusione attiva in Appennino meridionale FRANCESCA DI LUCCIO, GIOVANNI CHIODINI, STEFANO CALIRO, CARLO CARDELLINI, VINCENZO CONVERTITO, NICOLA ALESSANDRO PINO, CRISTIANO TOLOMEI, GUIDO VENTURA	185
4. TERREMOTI E MAREMOTI IN ITALIA: CASI DI STUDIO	
Evidenze geologiche ed archeologiche di terremoti storici in Trentino-Alto Adige ALFIO VIGANÒ, STEFANO DI STEFANO, ANDREA FRANCESCHINI, CLAUDIO CARRARO, CATRIN MARZOLI, LORENZO CADROBBI	195
Il terremoto del 28 dicembre 1908: 110 anni di analisi sismologiche NICOLA ALESSANDRO PINO, VINCENZO CONVERTITO	204
Sismicità della Calabria Centro-Meridionale: dalla storia alle osservazioni strumentali e di campagna ANNA GERVAZI, VINCENZO TRIPODI, MARIO LA ROCCA, FRANCESCO MUTO, IGNAZIO GUERRA	209
Evidenze geomorfologiche di tsunami in Italia Meridionale GIOVANNI SCARDINO, PAOLA FAGO, ARCANGELO PISCITELLI, MAURILIO MILELLA, PAOLO SANSÒ, GIUSEPPE MASTRONUZZI	217
Mitigazione del rischio sismico e vulcanico nell'area Napoletana: un piano operativo per la messa in sicurezza di Ischia GIUSEPPE DE NATALE, STEFANO PETRAZZUOLI, CLAUDIA TROISE, RENATO SOMMA	224
I terremoti di Amatrice, Visso e Norcia del 2016-2017 nel contesto sismotettonico dell'Italia Centrale: stato delle conoscenze e problemi aperti ALESSANDRO AMATO, MASSIMILIANO BARCHI, LAURO CHIARALUCE	230

Effetti geomorfologici e variazioni idrogeologiche indotti dai terremoti: esempi nell'area epicentrale della sequenza sismica 2016-2017 del centro Italia DOMENICO ARINGOLI, MARGHERITA BUFALINI, PIERO FARABOLLINI, MARCO GIACOPETTI, MARCO MATERAZZI, GILBERTO PAMBIANCHI, GIANNI SCALELLA	239
La rete accelerometrica urbana nel centro storico della città di Catania (OSU-CT) DOMENICO PATANÈ, GRUPPO DI LAVORO OSU-CT	249
5. DALLA GESTIONE DELLE EMERGENZE ALLA RICOSTRUZIONE	
Earth Observation Systems: dall'emergenza alla proposta di un progetto integrato per la gestione del territorio ELENA CANDIGLIOTA, FRANCESCO IMMORDINO	261
Il ruolo del Volontariato di protezione civile per una attività di prevenzione efficace MASSIMO LA PIETRA	272
I terremoti dell'estate-autunno 2016 in Italia centrale: nuove prospettive per la valutazione della pericolosità sismica EMANUELE TONDI, TIZIANO VOLATILI, PIETRO PAOLO PIERANTONI	276
Emergenza e ricostruzione ALFIERO MORETTI	283
Dal danneggiamento delle chiese di Amatrice spunti per prevenzione, conservazione e sicurezza del patrimonio storico-architettonico CONCETTA TRIPEPI, ELENA CANDIGLIOTA, GIACOMO BUFFARINI, GIOVANNI CARELLI, LAURA DONATI, FERNANDO SAITTA	288
La ricostruzione dei beni culturali danneggiati dal sisma: il miglioramento ANTONIO BORRI	301
Venzone: utopia o futuro? Una metodologia per la salvaguardia del nostro patrimonio FRANCESCA SARTOGO	308
Rischio liquefazione: studi e iniziative per la ricostruzione e la pianificazione urbanistica post sisma Emilia 2012 LUCA MARTELLI	318
La gestione dei rifiuti da disastro FRANCESCA LUCIGNANO, ROBERTO PIZZI	326

La prevedibilità dei disastri sismici fra sismologia e storia

Forecasting earthquake disasters: a journey between seismology and history

GIANLUCA VALENSISE

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia,
Roma

E-mail: gianluca.valensise@ingv.it

Parole chiave (*key words*): pericolosità sismica (*seismic hazard*), rischio sismico (*seismic risk*), previsione dei terremoti (*earthquake forecast*), sismicità italiana (*Italian seismicity*), DISS, CFTI

1. PREVEDERE O PREVENIRE?

Che cosa significa “prevedere”? Il verbo deriva dal latino *praevidere*, composto di *prae-* e *videre*, che si può tradurre semplicemente come “vedere prima”. Così la pensavano i nostri avi duemila e più anni fa.

E oggi? Secondo un noto dizionario *on-line* questo verbo transitivo ha due significati indipendenti e per certi versi opposti, almeno per quanto concerne le loro implicazioni pratiche:

- 1) *conoscere in anticipo o annunciare quanto accadrà in futuro sulla base di presunte doti divinatorie; predire: prevedere il futuro; + che e ind. o cond.: “l'indovino ha previsto che presto ci sarà la fine del mondo”; con prop. interr. indir. “un mago ha previsto chi vincerà il campionato”;*
- 2) *congetturare sulla base di considerazioni logiche, dati tecnici o scientifici; ipotizzare: “prevedere i rischi di un'operazione”; anche con prop. interr. indir. “prevedere chi vincerà le elezioni”.*

I terremoti sicuramente non si prevedono, almeno non nell'accezione più restrittiva di questo verbo (la prima); ma quali e quante sono le grandezze che possono essere “congetturate sulla base di considerazioni logiche, dati tecnici o scientifici” (la seconda)? Tra le grandezze prevedibili rientrano certamente:

- dove avverranno la gran parte dei terremoti potenzialmente distruttivi (M 5.5+), con incertezze di qualche chilometro, e dove invece sono altamente improbabili;
- la cinematica attesa, ovvero il tipo di movimento al fuoco del terremoto;
- la magnitudo massima attesa;
- la distribuzione dello scuotimento atteso, incluse le eventuali amplificazioni di sito, per diversi periodi di oscillazione;
- la natura e distribuzione dei possibili effetti indotti sull'ambiente (fagliazione superficiale, frane, liquefazione).

Tra le grandezze certamente non prevedibili, almeno ad oggi, rientrano:

- l'istante esatto di accadimento;
- la magnitudo esatta del terremoto;
- l'eventuale innesco di scosse su faglie adiacenti;

- i caratteri di dettaglio della rottura, come l'eventuale eterogeneità della dislocazione sul piano di faglia, la direttività ecc.

Qualunque processo di stima della pericolosità sismica, sia che si tratti di stime probabilistiche, sia che si preferisca ragionare in modo deterministico, richiede di *prevedere* le caratteristiche salienti della sismicità del futuro, ovvero di identificare le potenziali sorgenti dei futuri terremoti, di capirne le caratteristiche spaziali e geometriche e di caratterizzarne le proprietà di ricorrenza. Ma in questo percorso logico c'è una possibile trappola lessicale, che va evitata a tutti i costi. Sempre più spesso si sentono i sismologi affermare che il vero problema di tutti i paesi soggetti ai rischi naturali, e se vogliamo di molte delle civiltà che si sono succedute attraverso i millenni, non è *prevedere* i disastri – sismici, ma anche vulcanici o idrogeologici – ma *prevenirne* gli effetti. I tanti colleghi che affermano questo – incluso il sottoscritto – intendono sostenere che prevenire gli effetti dei terremoti deve necessariamente venire prima di qualunque previsione in senso stretto, ovvero della previsione di cui all'accezione (1) tra le due discusse in precedenza. Ma allo stesso tempo per prevenire gli effetti dei terremoti, e quindi mitigare il rischio che essi causano, è necessario prevedere i terremoti nell'accezione (2), ovvero essere in grado di prevederne la distribuzione, l'impatto territoriale e le caratteristiche di ricorrenza, anche in funzione della geologia delle diverse aree colpite. Dunque non c'è una vera alternativa tra queste due espressioni: *prevedere* è un passaggio irrinunciabile per poter *prevenire*.

Prevedere e *prevenire* sono quindi due facce della stessa medaglia. Si deve però fare attenzione: il problema a cui stiamo accennando non è solo il frutto della limitatezza della nostra conoscenza e delle nostre capacità scientifiche, che oggi non ci consentono di prevedere l'istante esatto in cui accadrà un forte terremoto e la sua magnitudo. C'è un tema più generale, del quale si parla raramente perché fino a pochi anni fa considerato in subordine rispetto alla semplice tutela della vita umana: il tema è quello di proteggere le

nostre infrastrutture, e quindi di salvaguardare l'economia che le ha finanziate e che tali infrastrutture servono su base quotidiana. Per rendere meglio questo concetto basterà pensare al Ponte sullo Stretto di Messina, che probabilmente non si farà mai, o al MOSE, che invece è attualmente in costruzione, o a qualunque viadotto o grande diga o infrastruttura speciale che viene progettata in Italia. In tutti questi casi il problema del progettista non è mai quello di sapere quando un forte terremoto potrà mettere alla prova quella struttura, ma piuttosto quello di sapere qual è la sollecitazione massima che quella struttura quasi certamente dovrà sopportare durante l'arco della sua vita utile, che normalmente per opere di questo tipo è di 100 anni. Come è facile capire, è del tutto irrilevante se quella sollecitazione avrà luogo dopo un quarto di



Figura 1 – Sintesi grafica degli elementi che determinano il Rischio Sismico

quella vita utile, o alla fine del periodo considerato, perché l'obiettivo del progettista è quello di fare in modo che la struttura resista comunque alla sollecitazione massima *prevista* dagli esperti di pericolosità sismica, in qualunque istante essa si manifesti, senza danni o con danni non strutturali riparabili, e in ogni caso salvaguardando la vita umana.

2. LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO SISMICO: UNO SGUARDO AL FUTURO

In una disamina del dualismo prevenzione-previsione che tenga conto anche della evoluzione più recente delle politiche di mitigazione del rischio sismico vanno inseriti altri elementi poco noti ai più. Ma prima di entrare nello specifico è opportuno fare un passo indietro e definire in modo formale cosa è il rischio sismico e quali sono le sue componenti (Fig. 1). Infatti, anche se può sembrare paradossale, la mancata comprensione della terminologia pesa talora più della mancanza di conoscenza. Termini astratti quali pericolosità, sismicità, rischio vengono a volte usati in maniera intercambiabile, finendo spesso per accrescere la confusione di chi legge o ascolta. Va detto poi che i ricercatori e i professionisti utilizzano sovente espressioni del loro gergo senza aver accertato preventivamente se chi ascolta sia in grado di discriminare tra un termine e l'altro.

Le quattro espressioni fondamentali da conoscere sono **pericolosità**, **rischio**, **esposizione** e **vulnerabilità**. Nel seguito esse verranno usate con riferimento ai terremoti, ma lo stesso formalismo viene comunemente utilizzato con riferimento a fenomeni avversi di qualunque tipo, dalle alluvioni all'attività vulcanica ai maremoti.

- La **Pericolosità** definisce la capacità intrinseca di un territorio di generare terremoti, o più precisamente di causare scuotimento sismico. È solitamente espressa in termini di probabilità che all'interno di un intervallo di tempo prefissato e convenzionale si verifichi uno specifico terremoto, o che venga superato un valore prefissato di scuotimento sismico.
- L'**Esposizione** quantifica in termini economici e sociali quanto un territorio o una comunità sono letteralmente esposti al terremoto, ed è data dalla combinazione della densità abitativa con l'eventuale presenza di un patrimonio monumentale e di infrastrutture critiche.
- La **Vulnerabilità** quantifica la propensione di una rete insediativa – o anche di una singola struttura – a subire danni come effetto di un dato livello di scuotimento sismico.
- Infine il **Rischio** è rappresentato dalla combinazione dei tre parametri già descritti, e quantifica la perdita economica

e sociale attesa in una specifica area in un determinato intervallo di tempo.

Dunque Pericolosità e Rischio non sono affatto sinonimi, ma sono due termini all'estremità di un percorso logico in mezzo al quale c'è l'uomo, con la sua presenza, con i suoi insediamenti e con le relative infrastrutture. Si dice spesso che sul nostro pianeta esistono luoghi in cui la pericolosità è altissima ma il rischio è comunque nullo, perché totalmente deserti o in mare aperto, dunque non vi è nulla di esposto e tantomeno di vulnerabile. La pericolosità è una caratteristica intrinseca dei sistemi naturali del nostro pianeta, e quindi può essere compresa e valutata ma non ridotta, mentre i nostri sforzi dovranno concentrarsi sulla mitigazione del rischio, che dipende esclusivamente da noi.

Fatte queste doverose premesse possiamo tornare al punto da cui eravamo partiti, ovvero il dualismo prevenzione-previsione. Come ci ricorda Emanuela Guidoboni¹, studiosa della storia dei terremoti, dopo essere stato testi-

storia. La tecnologia oggi disponibile porta i governi e gli abitanti di questi paesi – tipico è il caso del Giappone – a ritenere che ormai gli effetti dei terremoti sul patrimonio abitativo possano e debbano essere ridotti al minimo; questo dovrebbe conseguentemente ridurre al minimo – se non azzerare – le perdite di vite umane, almeno relativamente alla popolazione che al momento del terremoto si trova in edifici residenziali, commerciali o di culto. Semplificando al massimo, questo equivale a dire che in prospettiva noi potremo vivere l'esperienza di un terremoto anche forte con la stessa predisposizione con cui oggi viviamo quella di un forte temporale, che di certo non ci induce a lasciare casa ma al massimo a chiudere bene le finestre. Non a caso nelle società più avanzate – ma anche l'Italia è in prima fila in questo campo – si stanno fortemente incoraggiando gli studi sul cosiddetto *early-warning* dei terremoti: quel complesso di strumentazione, tecniche di elaborazione e prassi operative che consente di avvertire



Figura 2 – L'arrivo dell'onda di tsunami causata dal terremoto di Honshu dell'11 marzo 2011. L'evento ha avuto una magnitudo pari a 9.0 e ha causato un'onda di tsunami che localmente ha raggiunto una altezza di 40 m

mone dei guasti causati dal terremoto di Ferrara del 1570 l'architetto di origini napoletane Pirro Ligorio sostenne che *"Difendersi dai terremoti è un dovere dell'intelletto umano"*. Sono stati necessari quattro secoli e mezzo, ma oggi è un fatto che nei paesi in cui la cultura sismologica è più avanzata e in cui il patrimonio edilizio e infrastrutturale è meno fragile la previsione in senso stretto sta perdendo importanza proprio perché si è fatto tesoro di questa fondamentale lezione che arriva dalla

la popolazione dell'imminenza dell'arrivo delle onde sismiche generate da un forte terremoto, e soprattutto di attivare procedure automatiche per fermare treni, bloccare centrali, chiudere l'accesso a ponti e viadotti. In breve, l'*early-warning* consente di prevenire tutti quegli effetti collaterali di un terremoto che sono caratteristici di una società evoluta e che possono andare molto oltre il crollo di un normale edificio residenziale. L'idea sottostante, con la quale non si può che essere d'accordo, è che nel 2018 le singole abitazioni e gli uffici non dovrebbero più crollare, e quindi ci si può e deve concentrare sulle perdite, umane ed economiche, derivanti da tutte le altre criticità che è decisamente più difficile ingegnerizzare. Un concetto che potremmo

¹ E. Guidoboni, 1997, "An early project for an anti-seismic house in Italy: Pirro Ligorio's Manuscript Treatise of 1570-74. European Earthquake Engineering, rivista della European Association for Earthquake Engineering, 2, 15-20.

esemplificare con un solo nome, altamente evocativo: *Fukushima*².

Va osservato che questo nuovo approccio alla prevenzione degli effetti dei terremoti non è più appannaggio del solo Giappone, dove a onor del vero la più che opportuna scelta di fare soprattutto dell'ottima prevenzione è stata azzoppata da una previsione sbagliata; quella relativa alla massima magnitudo che avrebbe potuto avere un terremoto che avvenisse di fronte alla costa nord-orientale dell'isola di Honshu. Quel valore di magnitudo a sua volta permetteva di stimare quale sarebbe stata l'altezza dell'onda di tsunami che questo terremoto avrebbe certamente provocato (Fig. 2). Il terremoto di Maule (Cile) del 27 febbraio 2010, con una magnitudo pari a 8.8 e circa 500 vittime, e il recente terremoto del Messico del 19 settembre 2017, un evento di magnitudo 7.1 avvenuto pericolosamente vicino alla capitale federale e il cui tributo in vite umane si è fermato a 369 vittime, sono esempi virtuosi di nazioni non ricchissime ma che hanno preso molto sul serio il tema della prevenzione. Come hanno ben documentato le televisioni di tutto il mondo, il recente terremoto del Messico non ha impensierito i più alti edifici di Città del Messico, nei quali vivono molti milioni di persone e che quindi portano a livelli altissimi l'*esposizione* che caratterizza quella immensa conurbazione. Questo perché molti di questi edifici sono stati ricostruiti o rinforzati dopo il devastante terremoto del 19 settembre 1985, un cataclisma di magnitudo 8.1 che aveva causato oltre 5.000 vittime. Al contrario, il recente terremoto del 2017 ha selettivamente distrutto gli edifici più antichi e *vulnerabili*, ovvero quelli presumibilmente costruiti in assenza di norme sismiche efficaci e con tecniche costruttive obsolete e comunque inadeguate alla sismicità dell'area. Conoscere nel dettaglio la *pericolosità* consente quindi di ridurre enormemente il *rischio*, cioè le perdite di vite umane e materiali, anche in contesti in cui l'*esposizione* è altissima, come avviene in tante megalopoli del XXI secolo, agendo energicamente sulla riduzione della *vulnerabilità* del costruito.

3. DALLA CONOSCENZA ALLA PREVENZIONE

Dunque *conoscere* per *capire*, *capire* per *prevedere*, e *prevedere* per *prevenire*. E come

2 Tutti ricordiamo il nome della città vicino alla quale sorge la centrale nucleare che ha quasi causato una catastrofe globale a seguito del terremoto di magnitudo 9.0 che l'11 marzo 2011 ha colpito il Giappone settentrionale. L'incidente della centrale di Fukushima è stato causato dal fatto che le protezioni poste a riparo della centrale contro l'arrivo di un'ondata di *tsunami* erano state dimensionate sulla base di una previsione, rivelatasi tragicamente errata, che un terremoto in quella zona non avrebbe potuto superare una magnitudo pari a 8.0 circa.

insegnano i padri della Geologia – primo fra tutti Charles Lyell³ – i forti terremoti di oggi sono indubbiamente la chiave per capire e interpretare anche quelli del passato nella loro distribuzione spaziale e in termini di energia rilasciata; una volta compiuto questo passaggio logico i forti terremoti del passato, molto più numerosi di quelli per i quali abbiamo dati strumentali, e soprattutto molto più diffusi sul territorio, possono essere utilizzati per ribaltare il passato sul futuro, che è quello che qualunque geologo chiamato a valutare l'incidenza dei fenomeni naturali avversi del futuro è chiamato a fare nel suo percorso professionale.

Il percorso che stiamo per intraprendere parte dalla Storia, o più precisamente dalla Sismologia Storica; passa quindi per la Geologia, o meglio per la Geologia dei Terremoti, e infine approda a delle previsioni sulla sismicità del futuro, avendo sempre a portata di mano i principi basilari della Sismologia moderna. È un percorso che somiglia un po' a una indagine di polizia, in cui i diversi tasselli delle prove disponibili devono essere fatti combaciare con attenzione.

Il lavoro non è semplice perché si scontra con almeno due ordini di problemi. Il primo consiste nella difficoltà intrinseca della interazione tra sismologi strumentali, sismologi storici ed esperti di geologia dei terremoti; figure professionali formate in ambiti disciplinari molto diversi, che tendono a parlare linguaggi propri e che fino a pochi anni fa non avevano sentito – né sviluppato autonomamente – la necessità di dialogare intorno allo stesso tavolo. Il secondo problema consiste nella scarsa attitudine del mondo scientifico, che si riflette poi nei meccanismi di finanziamento della ricerca, a capire quanto sia importante l'esperimento che è stato condotto in Italia in questi ultimi due decenni nel campo della sismologia, in un contesto culturale e decisionale che spesso identifica la ricerca di successo solo con le grandi infrastrutture e con la super-specializzazione tipiche, ad esempio, della fisica delle particelle.

4. TERREMOTI: LA STORIA INSEGNA

È arrivato il momento di introdurre il grande tema di cosa è possibile imparare dal *record* storico della sismicità, un dato spesso considerato con sufficienza da chi opera nel campo della sismologia strumentale, ma che in effetti è solidamente alla base di quasi tutte le elaborazioni di pericolosità sismica che esistono nel mondo. L'Italia vanta una

lunga tradizione in questo particolare settore disciplinare, che è quasi del tutto sconosciuto alla tradizionale formazione accademica, e si è spesso posta in una condizione di leadership mondiale sul tema⁴. La disciplina che indaga sui terremoti del passato – la Sismologia storica – integra elementi di storia in senso stretto, di demografia storica e di storia delle tecniche edilizie, rigorosamente basati su fonti scritte di diversa natura, con elementi di sismologia e di geodinamica. L'obiettivo ultimo è quello di documentare e quantificare i forti terremoti del passato, attraverso l'esame sistematico dei loro effetti.

Torniamo ora all'*esperimento* di cui si è parlato poco sopra. Per la precisione, torniamo per un attimo al 1995, quando ha visto la luce la prima versione del *Catalogo dei Forti Terremoti in Italia* o CFTI⁵ (Fig. 3), un vasto elaborato finanziato dall'allora Istituto Nazionale di Geofisica (ING; dal 1999 Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, INGV). Si trattava di una svolta decisa che in fasi successive, fino al 2007⁶, ha messo a disposizione decine e decine di migliaia di dati sui forti terremoti italiani (e di area euro-mediterranea), organizzati su base geografica con modalità tali da consentire un'analisi automatica attraverso opportuni codici di calcolo. Le ricerche erano cominciate nel 1983 per iniziativa dell'ENEA e dell'ENEL, nel quadro del programma nucleare italiano, in seguito annullato come conseguenza dell'incidente di Chernobyl del 1986.

La vera novità introdotta con il CFTI era nella logica con cui i dati venivano reperiti, presentati e discussi, e nelle nuove possibilità di elaborazione che ne scaturivano. La principale tra queste era certamente quella che utilizzava il complesso dei dati sugli effetti di ogni terremoto, località per località, per ricavarne la **localizzazione epicentrale**, la **magnitudo** e, quando possibile, l'**orientazione della sorgente sismica**. La magnitudo veniva poi convertita in una lunghezza media della faglia responsabile del terremoto, che a

4 E. Guidoboni e J. E. Ebel (2009). *Earthquakes and Tsunamis in the Past, A Guide to Techniques in «Historical Seismology»*, Cambridge University Press, 2009, isbn-13: 9780521837958.

5 Boschi E., Ferrari G., Gasperini P., Guidoboni E., Smriglio G. e Valensise G. (1995). *Catalogo dei Forti Terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1980*. I.N.G. e S.G.A. editori, Bologna, 973 pp., con CD-ROM.

6 Nel 2007 ha visto la luce la versione attualmente consultabile *on-line* del CFTI, denominata CFTI4Med per via della sua estensione al resto del Mediterraneo: Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Valensise G. (2007). *CFTI4Med, Catalogue of Strong Earthquakes in Italy (461 B.C.-1997) and Mediterranean Area (760 B.C.-1500)*, INGV-SGA, <http://storing.ingv.it/cfti4med/>.

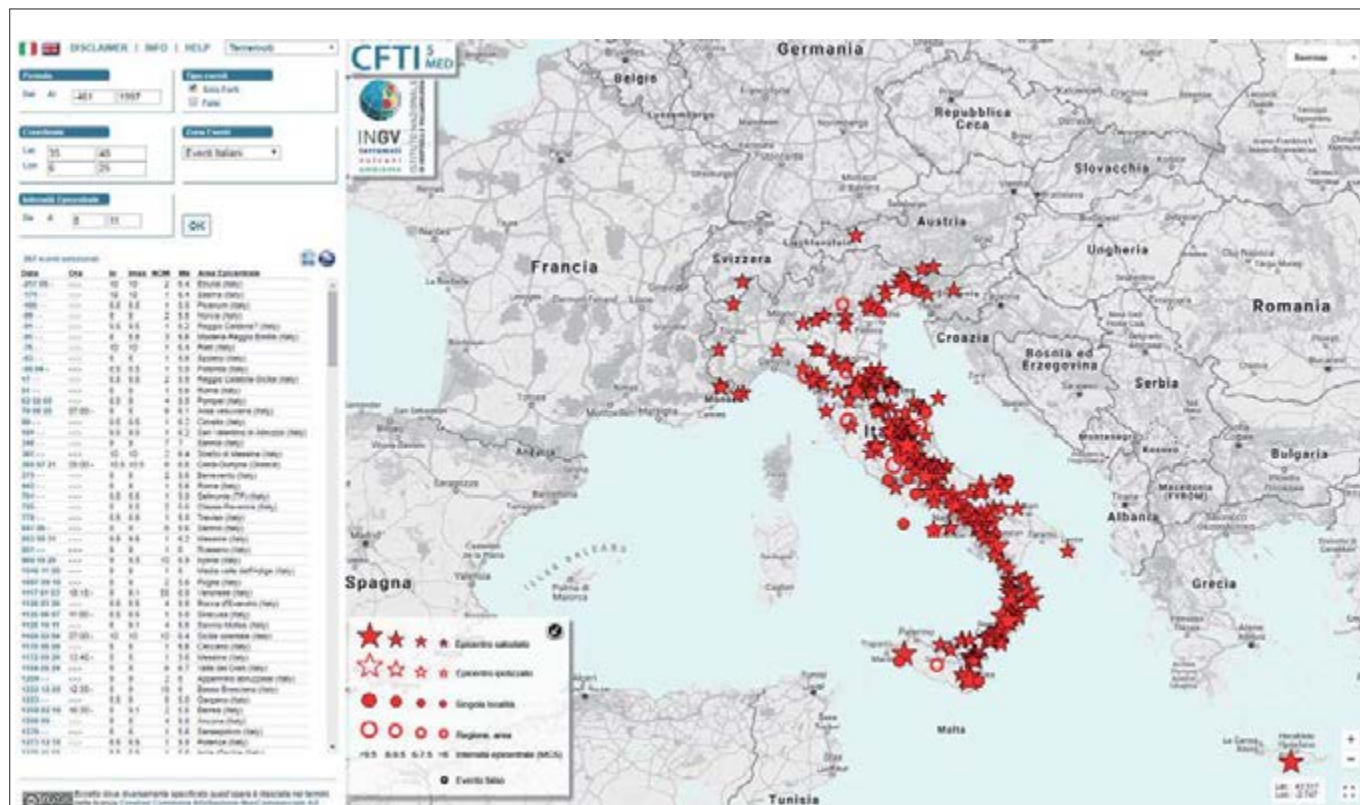


Figura 3 – Pagina iniziale della Versione 5 del Catalogo dei Forti Terremoti in Italia, pubblicato nel maggio del 2018. Nell'immagine appaiono selezionati solo gli oltre 250 forti terremoti italiani. <http://storing.ingv.it/cfti/cfti5/>

sua volta veniva mostrata nella relativa cartografia tematica come un rettangolo orientato nello spazio; una rappresentazione virtuale ma spesso piuttosto fedele della proiezione in superficie della faglia sismogenetica profonda (Fig. 4).

Questa tecnica consentiva dunque di ottenere delle "faglie equivalenti" a partire dai dati di terremoti anche molto antichi, il che consentiva di recuperare diversi secoli di storia sismica che in precedenza era stata utilizzata solo in modo molto qualitativo, ad esempio valutare la vocazione sismica di una regione rispetto alle altre.

Negli anni seguenti questo approccio concettuale è stato affinato ed esteso a tutta l'Italia, divenendo un riferimento per l'analisi dei dati di Sismologia storica a livello internazionale.

Le sorgenti sismogenetiche virtuali così ottenute sono state rappresentate insieme alla sismicità strumentale registrata dalla rete nazionale dell'ING e insieme alle sorgenti ottenute con strumenti geologici, che in quegli anni formavano l'embrione di quello che sarebbe diventato il *Database of Individual Seismogenic Sources* (DISS), del quale si parlerà nella sezione successiva. Si trattava di un approccio tutto italiano, ma portato da subito nelle sedi internazionali per un opportuno confronto. Ad esempio, nel luglio 1999 un gruppo di ricercatori dell'ING partecipò a una conferenza sui terremoti presso il Centro Ettore Majorana di Erice. Presentavano i loro risultati più recenti in un poster nel quale,

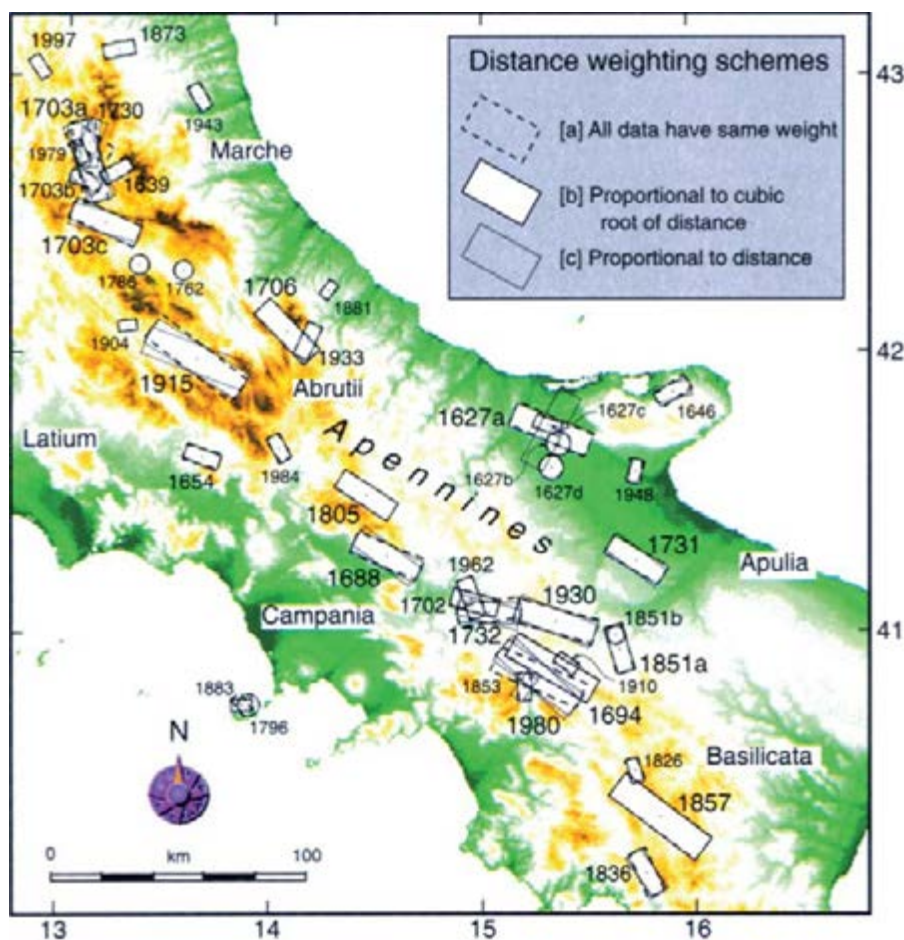


Figura 4 – Sorgenti sismogenetiche virtuali ottenute dall'elaborazione dei dati di intensità pubblicati nel Catalogo dei Forti Terremoti in Italia tramite il codice denominato Boxer (La figura è tratta da: P. Gasperini, F. Bernardini, G. Valensise e E. Boschi (1999). Defining seismogenic sources from historical earthquake felt reports. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, 94-110). I rettangoli rappresentano la presumibile proiezione in superficie della sorgente posta a profondità crostale. Pur essendo basate esclusivamente su dati storici, le sorgenti delineano chiaramente le aree a maggior sismicità della penisola, coerentemente con i principali trend geodinamici noti

dopo aver giustapposto tutte le informazioni sismologiche, geologiche e storiche allora disponibili, venivano abbastanza provvolutamente identificate un certo numero di aree in cui era più probabile il verificarsi di un terremoto distruttivo nei primi decenni del XXI secolo (Fig. 5).

Tra le aree individuate c'erano l'Abruzzo centrale, poi colpito dal terremoto del 6 aprile 2009 e in parte dai terremoti della sequenza dell'Appennino centrale del 2016-2017, l'area del confine calabro-lucano, colpita nel 2010 da una sequenza con scosse che hanno superato magnitudo 5.0, e l'area della Pianura Padana meridionale, colpita dai terremoti del maggio 2012. Altre zone colpite da terremoti significativi di questi anni erano evidenziate come "aree di attenzione". Si era trattato di una *previsione*, probabilmente un po' temeraria, anche in virtù della relativamente limitata esperienza di coloro che l'avevano formulata, ma pur sempre una previsione, quantomeno nell'accezione (2) discussa in apertura di questo articolo.

4. CAPIRE I TERREMOTI DALLA GEOLOGIA

Molti si chiedono – e io stesso mi sono chiesto varie volte quando ero studente: ma se la Geologia si esprime in migliaia e milioni di anni mentre un terremoto è per sua natura istantaneo, cosa ne può capire il geologo del terremoto come fenomeno? La risposta è complessa e ovvia allo stesso tempo. Il terremoto non fa altro che "accelerare" i processi geologici, restituendoci un'istantanea di fenomeni che hanno una gestazione millenaria: in altre parole, il terremoto è Geologia in azione sotto i nostri occhi. Ne consegue che la conoscenza dei terremoti – recenti e storici – da un lato, e la comprensione globale dell'evoluzione della geologia recente e del paesaggio – dall'altro, possono consentirci di *prevedere* efficacemente le caratteristiche dei terremoti futuri.

Gli schemi riportati in Fig. 6 mostrano come in effetti il geologo sia una figura centrale in tutte le manifestazioni di un terremoto, a tutte le scale spaziali e cronologiche. Lo *scuotimento* (schema in alto) crea le premesse per una registrazione

storica o archeologica dell'evento, ma chiama in causa la Geologia con riferimento (a) agli effetti sull'ambiente dello scuotimento stesso, come frane e liquefazioni, e (b) alla eventuale disomogeneità della risposta sismica causata dalla variabilità delle caratteristiche dei terreni di fondazione e del loro assetto geomorfologico. All'estremo opposto troviamo la **fagliazione superficiale** (schema in basso), che potrà essere osservata dal geologo per migliaia di anni dopo l'evento, anche se va ricordato che i terremoti che arrivano a interessare la superficie topografica sono un sottoinsieme di tutti quelli che avvengono. Tutti i terremoti causano invece **deformazione superficiale**, ovvero una alterazione della topografia con lunghezza d'onda di molti km e con ampiezza variabile tra qualche centimetro e alcuni metri (schema al centro): questa, sommandosi evento dopo evento lascia una firma indelebile sulla geologia e sul paesaggio della regione sovrastante la sorgente sismogenetica.

Per il geologo lo strumento principe per identificare le faglie attive è l'osservazione diretta sul terreno. Questo approccio è in armonia con il carattere descrittivo della geologia tradizionale, ma comporta un percorso di osservazioni e inferenze che purtroppo contiene una forte componente di soggettività. In pratica, un esperto può considerare attiva una faglia che per un altro esperto non è attiva, o addirittura non è neppure una faglia. Questa non-oggettività delle stime degli esperti, che somiglia a una non-riproducibilità delle osservazioni effettuate nell'ambito delle discipline definite come esatte, dà una misura delle difficoltà insite nella ricerca delle faglie attive. La sola identificazione di faglie attive costituisce inoltre un approccio fortemente inadeguato per le ricerche a carattere applicativo per due ragioni fondamentali ma distinte:

a) rimanendo nel campo della pericolosità sismica, e quindi della *previsione* delle caratteristiche della sismicità del futuro, bisogna ricordare che un forte terremoto è generato da una sorgente sismogenetica posta a una profondità minima di 2-3 km e massima di centinaia di km, anche se i terremoti più insidiosi sono quelli che avvengono tra 3 e 20 km. Il problema che si pone quindi è quello di identificare faglie poste ad una profondità tale da renderle difficilmente identificabili dai soli elementi che si osservano in superficie. Fatte le dovute eccezioni, come le grandi faglie trascorrenti lunghe centinaia o migliaia di km (es. la Faglia di San Andreas in California e la Faglia Nord-anatolica in Turchia settentrionale), tutte le altre potenziali sorgenti di grandi terremoti sono rappresentate da sistemi



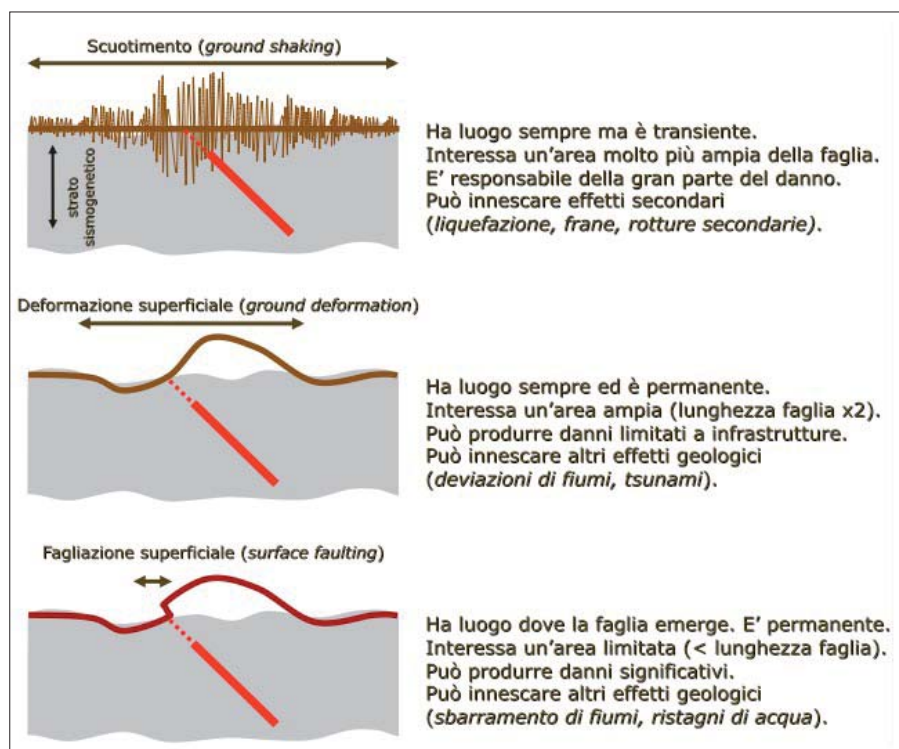


Figura 6 – Sintesi degli effetti in superficie di un forte terremoto, ovvero dei diversi osservabili di cui il geologo può avvalersi per identificare sul terreno le sorgenti dei terremoti passati, presenti e futuri

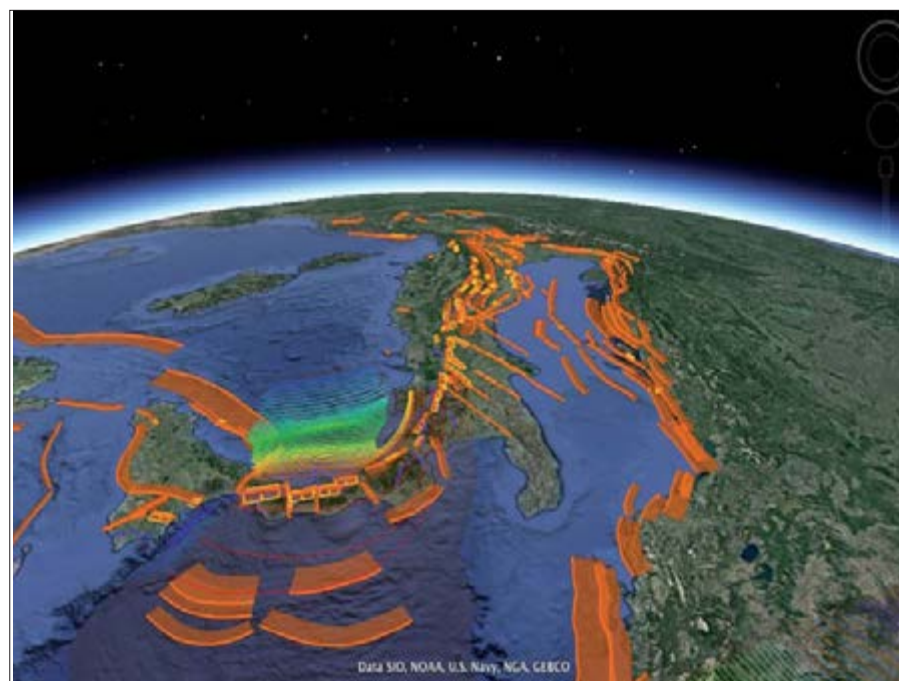


Figura 7 – Il Database of Individual Seismogenic Sources, o DISS (<http://diss.rm.ingv.it/diss/>), nella sua versione 3.2.0, rilasciata nel 2015. È stata recentemente rilasciata la nuova versione 3.2.1

complessi di faglie gerarchizzate, tema sul quale torneremo nel seguito;

b) in quasi tutte le applicazioni pratiche della geologia più che descrivere i fenomeni esistenti, quali frane, giacimenti di varia natura e – appunto – faglie attive, diventa cruciale poterne accertare la presenza o, al contrario, escluderla. Tutti siamo consapevoli dei risvolti emotivi e pratici associati all'identificazione di una grande faglia presumibilmente attiva in una zona urbanizzata, o in prossimità di una infrastruttura a rischio, tanto che negli ultimi due decenni

questo tema compare sempre più spesso nelle cronache e nei titoli dei giornali. Ma identificare le faglie attive sul terreno è anche e soprattutto difficile, a causa di un intreccio di situazioni anche spinose e controverse che talora non sono del tutto evidenti persino agli addetti ai lavori, e che possiamo così sintetizzare⁷:

- 1) molte faglie sismogenetiche sono cieche, ovvero sono del tutto prive di espressione superficiale diretta. Questa circostanza, che è molto diffusa in tutto il mondo e in particolar modo in Italia, è strettamente legata alla magnitudo dei terremoti attesi; faglie capaci di generare terremoti di magnitudo fino a 6.0, molto numerose in Italia, hanno una probabilità bassa o bassissima di essere espresse in superficie, ma anche faglie capaci di terremoti molto più grandi, come quello che ha colpito il Nepal il 12 maggio 2015, con una magnitudo pari a 7.8, non hanno una espressione superficiale diretta. L'assenza di evidenza di superficie rende la faglia invisibile alle normali tecniche di indagine diretta;
- 2) molte faglie sismogenetiche si trovano al di sotto dei fondali marini. È facile comprendere che anche questa circostanza rende la loro indagine diretta molto più difficile;
- 3) l'identificabilità di una faglia dotata di espressione superficiale è legata al fatto che la faglia stessa abbia dislocato depositi sufficientemente giovani da consentire di ipotizzare che la sua attività sia proseguita fino al presente, e dunque presumibilmente proseguirà nel futuro. È molto difficile, se non impossibile, identificare con certezza lo stato di attività di faglie che dislocano solo rocce molto antiche, perché questa condizione non consente di datare l'età del movimento; si rischia quindi di considerare attiva una faglia che non lo è più, con la conseguente alterazione delle valutazioni di pericolosità sismica;
- 4) la realtà geologica è spesso frutto di processi che si sovrappongono nello spazio e nel tempo, e non è sempre semplice identificare con certezza una faglia – e ancor meno una faglia attiva – partendo dalla sola indagine di terreno. Altri processi geologici, legati solo indirettamente all'attività geodinamica o addirittura del tutto indipendenti da essa, possono dar luogo a forme che simulano la presenza di una faglia attiva, o che fanno apparire attiva una faglia che non lo è più⁸, introducendo nell'analisi quelli che in statistica potrebbero essere definiti dei *falsi positivi*;
- 5) come si accennava in precedenza, i sistemi di faglia sono per loro natura

sources in peninsular Italy: a review. Journal of Seismology, 5, 287-306.

⁸ Si veda ad esempio: V. Kastelic, P. Burrato, M. M. C. Carafa e R. Basili (2017). *Repeated surveys reveal non-tectonic exposure of supposedly active normal faults in the Central Apennines, Italy.* J. Geophys. Res. Earth Surf., 121, doi: 10.1002/2016JF003953.

⁷ Per un'ampia sintesi di queste problematiche il lettore può fare riferimento a: G. Valentini, D. Pantosti (2001). *The investigation of potential earthquake*

complessi, anche per la stratificazione di faglie di recente formazione, faglie antiche riattivate nel campo di sforzi attuale e faglie antiche non riattivabili ma che rappresentano barriere passive per la propagazione delle faglie attive. L'osservazione degli effetti geologici dei forti terremoti mostra spesso la riattivazione di una pluralità di faglie di superficie, con modalità che spesso rendono possibile gerarchizzarle – ovvero capire quali sono quelle primarie e quali invece quelle riattivate solo passivamente – solo a posteriori⁹. Questo rende difficile *prevedere* quante e quali faglie sono capaci di generare autonomamente un forte terremoto e quali invece sono solo spettatori passivi nel processo.

Il Database of Individual Seismogenic Sources, o DISS (<http://diss.rm.ingv.it/diss/>) Fig. 7, che raccoglie l'eredità dell'esperimento descritto in precedenza (si veda la Fig. 5 e la relativa discussione), rappresenta una sintesi di tutti i principi descritti in questo capitolo. Il Database utilizza informazioni di natura diversa – dati storici, dati strumentali, osservazioni di terreno, dati di sottosuolo forniti dalla geofisica di esplorazione, elaborazioni modellistiche – per delineare le sorgenti sismogenetiche che vengono ritenute in grado di generare terremoti di magnitudo 5.5 e superiore. L'esperienza del DISS, iniziata con prototipi già nel 1997, è stata da alcuni anni esportata al resto d'Europa (<http://diss.rm.ingv.it/share-edsf/>) nel quadro della realizzazione del modello di pericolosità europeo denominato European Seismic Hazard Model (ESHM13: <http://www.efehr.org>).

5. I TERREMOTI DEL FUTURO: STORIA E GEOLOGIA SI INTERPELLANO

Da quanto asserito discende che è difficile sapere in ogni istante se le faglie attive che conosciamo sono tutte quelle che esistono nell'area di nostro interesse e che sono in grado di generare forti terremoti, e dunque se il nostro insieme di dati è *completo*. Ma c'è un altro elemento che riduce la perceibilità macroscopica del fenomeno sismico in vista di una sua prevedibilità: la lacunosità del record sismologico, sia strumentale sia storico, ovvero quella circostanza per cui abbiamo notizie o dati su alcuni terremoti ma non su altri, semplicemente perché avvenuti prima dell'inizio delle osservazioni di cui di-

sponiamo. Nel caso del dato strumentale vale il principio che la durata dei cataloghi della sismicità di cui possiamo avvalerci, che di solito non supera i 30 o 40 anni – anche qui con significativi problemi di *completezza* – è assolutamente insufficiente a illustrare in modo completo il ciclo sismico caratteristico di una determinata faglia o gruppo di faglie.

Le limitazioni appena discusse prescindono del tutto dalla qualità e densità delle moderne reti di sorveglianza perché in questo caso il problema è rappresentato dai terremoti che non avvengono, e dei quali quindi non abbiamo cognizione, ma che potrebbero avvenire in futuro. I numerosissimi piccoli terremoti registrati dalle reti di sorveglianza, anche molte decine al giorno, sono la testimonianza vivente dell'esistenza di un sottoinsieme delle strutture tettoniche attive sul territorio, e in particolare di quelle attive nel periodo storico in cui stiamo vivendo, ma dicono poco o nulla su tutte le altre. I dati strumentali peraltro portano informazioni sulla struttura delle aree sismogenetiche, ma non sul loro comportamento atteso. Anche in questo caso resta evidentemente aperta una questione di *completezza*, per le ragioni sopra espresse.

A sua volta anche la Sismologia storica è soggetta alla lacunosità tipica della ricerca in campo storico, particolarmente per le epoche più remote e per certe aree del nostro paese in cui le fonti scritte seriali sono disponibili solo per pochi secoli. Dunque si pone nuovamente un problema di *completezza*, reso più acuto dal fatto che i grandi terremoti italiani sono (fortunatamente) anche piuttosto rari, e quindi esiste una elevata probabilità che le faglie di cui vorremmo conoscere il potenziale siano state semplicemente quiescenti durante il periodo per il quale è disponibile l'informazione storica; una condizione che necessariamente le rende ancora più pericolose, perché potrebbero trovarsi in una fase avanzata rispetto al loro ciclo caratteristico di produzione di terremoti.

La percezione della rarità dei forti terremoti italiani è in effetti un'acquisizione piuttosto recente. Fino alla fine degli anni '80 del secolo scorso la frequenza dei terremoti era vista soprattutto in chiave ingegneristica, con riferimento a "quante volte" in una data area era stato superato un prefissato valore di scuotimento; a questo parametro, che è alla base della elaborazione delle moderne mappe di pericolosità sismica, è dato il nome di *tempo di ritorno*. Il grande sviluppo delle ricerche in campo sismotettonico avviate dopo il terremoto dell'Irpinia del 1980 ha completamente cambiato questo paradigma, sottolineando l'opportunità di utilizzare come parametro-chiave anche il *tempo di ricorrenza*, ovvero il tempo che intercorre tra due eventi successivi di attivazione della stessa faglia sismogene-

tica. In una zona in cui esistono molte faglie, come in ampi settori dell'Appennino centrale e meridionale e della Calabria, l'attivazione a cascata di faglie adiacenti – un fatto osservato sperimentalmente e ben giustificato dalle sismologia moderna – può dare l'impressione che i terremoti non siano così rari: ma si tratta appunto di una condizione apparente, dovuta all'attivazione in tempi ravvicinati di faglie diverse, ognuna delle quali può avere un "tempo di incubazione" anche dell'ordine dei 1.000-2.000 anni, nell'ambito di periodi sismici che potrebbero poi aprire la strada a periodi di totale quiescenza estesi per secoli.

Sulla base di quanto affermato dunque la partita della ricorrenza dei forti terremoti si gioca – in Italia e altrove – in una sorta di rimbalzo tra quello che ci aspettiamo che debba succedere, sulla base dell'evidenza geologica e geodinamica, e quello che è già successo, così come ci viene documentato sia dalla storia sia dal *record* strumentale, preziosissimo ma assolutamente breve per questi scopi. Come ha suggerito recentemente Francesco Mulargia in un articolo significativamente intitolato *Perché il prossimo forte terremoto sarà verosimilmente una grossa sorpresa*¹⁰, il risultato di questo stato delle cose è che né l'informazione geologica né quella storica possono da sole aiutarci a identificare – dunque a *prevedere* – tutti i probabili terremoti prossimi venturi.

È quindi inevitabile usare congiuntamente e con saggezza le informazioni che ci arrivano dalla storia sismica e quelle che ci arrivano dalla storia geologica: in fondo la Geologia è la narrazione della vita del pianeta così come la Storia è la narrazione della vita di coloro che lo abitano. Ma a sua volta la storia dell'uomo è troppo breve – appena qualche migliaio di anni – e la "geologia delle rocce dure" che formano le catene montuose troppo lunga – si misura in milioni di anni – per catturare tutti i processi evolutivi del pianeta che minacciano il genere umano, come il susseguirsi delle catastrofi naturali. Questa differenza nelle scale cronologiche caratteristiche della Geologia e della nostra presenza sul pianeta resta l'ostacolo principale per la nostra capacità di *prevedere* efficacemente i terremoti del futuro.

9 Si veda ad esempio: L. Bonini, D. Di Bucci, G. Toscani, S. Seno e G. Valensise (2014). On the complexity of surface ruptures during normal faulting earthquakes: excerpts from the 6 April 2009 L'Aquila (central Italy) earthquake (M-w 6.3). *Solid Earth*, 5, 389-408, ISSN: 1869-9510, doi: 10.5194/se-5-389-2014.

10 F. Mulargia (2013). *Why the next large earthquake is likely to be a big surprise*. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 103, pp. 2946-2952.