

lungo la faglia trasversale attiva del Savio; quelle di Porretta sono in corrispondenza del fronte riattivato dell'alto Appennino bolognese; la sorgente di Miano si trova sull'alto del M. Cervellino-M. Caio, in corrispondenza dell'incrocio tra il sovrascorrimento attivo del basamento e la prosecuzione verso sud-ovest di un sovrascorrimento sepolto attivo; le sorgenti di Bobbio sono ubicate nell'omonima e assai nota "finestra tettonica" ed esattamente al di sopra del fronte attivo riconosciuto nel basamento.

Anche la distribuzione delle sorgenti termominerali, pur essendo molto più numerose, mostra un'ottima corrispondenza con strutture attive o con evidenze di attività recente. La maggior parte sono localizzate lungo la fascia del margine. In particolare risultano localizzate in corrispondenza di strutture attive le sorgenti più famose quali quelle di Salsomaggiore e Tabiano (PR), a ovest di Parma, e di Castrocaro (FC) a sud-ovest di Forlì. Altre sorgenti termominerali ubicate in prossimità o al di sopra di strutture attive sono quelle di Monticelli Terme (PR), a sud-est di Parma, e di Bologna. Le sorgenti di Castel S. Pietro Terme, lungo il margine tra Bologna e Forlì, sono localizzate al di sopra di un fronte attivo che disloca la successione carbonatica mesozoica. Anche le Terme della Salvarola, a sud di Sassuolo (MO), sono in corrispondenza di una faglia attiva e al di sopra di un fronte attivo nei carbonati. Le Terme di S. Lucia, nell'Alto Appennino reggiano, tra Castelnuovo ne' Monti e il M. Ventasso, sono localizzate sul prolungamento delle strutture attive dell'alta Val Secchia e al di sopra del fronte attivo del basamento. Così avviene in Romagna, oltre che per le già citate sorgenti di Castrocaro, anche per le sorgenti a est di Brisighella (RA), localizzate in corrispondenza del *back-thrust* attivo del fronte e al di sopra del fronte attivo del basamento.

Lungo la costa, sorgenti termo-minerali sono presenti a Riccione (RN), a Rimini e poco a nord (Viserba) e a Punta Marina (RA). È interessante notare che anche in questi casi sono state riconosciute strutture attive nel sottosuolo. In particolare, nell'immediato entroterra di Riccione è stata cartografata un'anticlinale attiva mentre Punta Marina è localizzata sul proseguimento verso sud-est della dorsale ferrarese.

Anche le salse, o vulcani di fango, mostrano un'ottima corrispondenza con strutture tettoniche attive o recenti (fig. 8.1). Si tratta di risalite di acqua e gas in pressione che nella risalita fluidificano i sedimenti attraversati trasportandoli verso la superficie e ridepositandoli all'intorno della sorgente. Si formano così coni di argilla, limo e sabbia, talora alti parecchi metri, con una bocca alla sommità da cui si dipartono colate concentriche di fango. Nell'insieme i coni e le colate ricordano molto le forme e le colate laviche dei vulcani da cui il nome "vulcani di fango" (Ferrari & Vianello, 1985; Gorgoni, 2003).

Attualmente, queste salse si concentrano soprattutto lungo il margine tra le valli del Panaro (MO) e del Parma (PR). Salse in corrispondenza di strutture attive riconosciute in superficie sono quelle di Rivalta, a sud di Parma, di Regnano a sud di Reggio Emilia e quelle di Nirano, a sud-ovest di Modena. Queste ultime sono anche molto vicine alle Terme di Salvarola.

Altre salse si trovano al di sopra di strutture attive profonde, come la salsa di Macognano, nell'alto Appennino modenese, localizzata al di sopra del fronte attivo del basamento in corrispondenza della "finestra" tettonica dell'alta Val Dolo, e le salse di Levizzano, a sud di Modena, localizzate al di sopra del *thrust* attivo del margine che taglia i carbonati.

Infine è interessante notare che anche le rimanenti salse dell'Appennino modenese, quella a sud-est di Bologna e quella a sud di Imola (BO) ricadono in corrispondenza di faglie quaternarie.

È risaputo che le faglie sono vie preferenziali di risalita in superficie di idrocarburi. Tuttavia anche le manifestazioni superficiali, specialmente quelle di gas metano, sembrano più frequenti in corrispondenza delle faglie recenti e attive. Ciò risulta evidente dalla figura 8.2 dove sono riportate le manifestazioni superficiali di idrocarburi tratte dalla Carta delle Manifestazioni (Emilia occidentale, Emilia orientale e Romagna) redatte da L. Mosca (cortesia ENI SpA - Exploration & Production Division).

È probabile che alcune di queste manifestazioni gassose siano dovute ad esalazioni di metano di origine superficiale anziché risalite da livelli profondi. Tuttavia, è evidente che le manifestazioni superficiali sono frequenti soprattutto nell'alto Appennino, lungo tutto il margine, sul fronte delle pieghe emiliane a ovest di Parma e al di sopra della dorsale ferrarese tra Reggio Emilia e le valli di Comacchio (FE).

In particolare le manifestazioni dell'alto Appennino risultano in corrispondenza delle principali strutture attive dell'Appennino romagnolo e della struttura attiva del basamento, soprattutto quando al di sopra di tale struttura profonda sono presenti importanti strutture attive anche in superficie come nell'area dell'alto Appennino modenese e bolognese.

Anche nel basso Appennino romagnolo le manifestazioni superficiali di idrocarburi sono più frequenti al di sopra della struttura attiva del basamento e in corrispondenza di strutture superficiali attive.

Lungo il margine le manifestazioni di idrocarburi sono più frequenti tra Salsomaggiore e Modena, proprio nel tratto dove il *thrust* pede-appenninico presenta le maggiori evidenze di attività recente sia in superficie che in profondità, a livello della successione carbonatica.

Altro settore del margine in cui le manifestazioni di gas risultano correlate con faglie attive e recenti è il tratto compreso tra Faenza e Cesena.

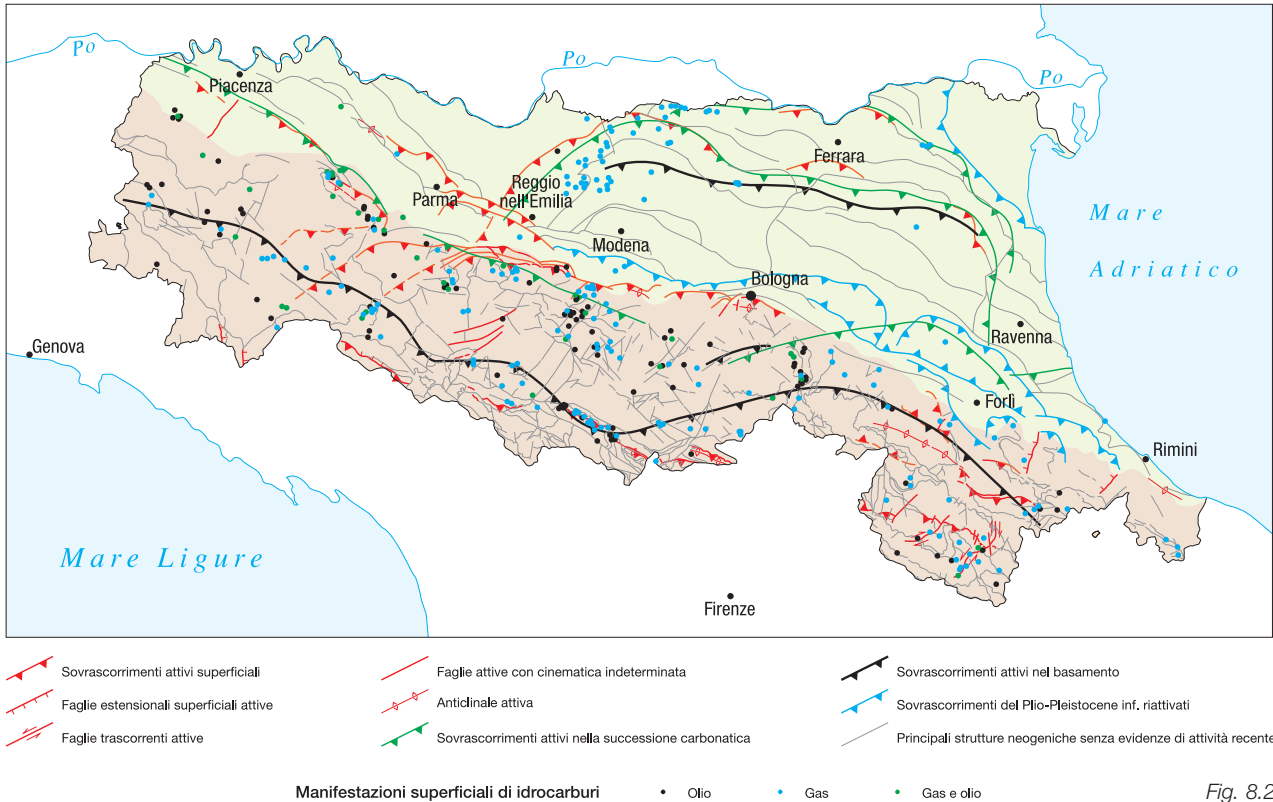
In pianura, le manifestazioni superficiali di idrocarburi, quasi esclusivamente gassose, sono localizzate nel settore occidentale della dorsale ferrarese, tra Reggio Emilia e Mirandola (MO), e sul fronte delle pieghe emiliane, tra Modena e Cortemaggiore (PC), proprio nei tratti in cui queste importanti strutture sepolte presentano, nei profili sismici, i principali indizi di attività recente.

## 8.2 - CONFRONTO CON LA DISTRIBUZIONE DI ALCUNE AREE A RISCHIO GEOLOGICO

Alcuni fenomeni geologici che possono determinare rischi per la salute umana, danni e costi anche notevoli nella gestione del territorio dipendono anche dall'attività recente e attuale delle strutture tettoniche. È il caso delle frane, della subsidenza della pianura e delle emissioni di radon.

Per l'Emilia-Romagna è disponibile una banca dati dei fenomeni franosi, antichi e recenti, riconosciuti e cartografati nelle varie carte geologiche che ha reso possibile la cartografia alla scala 1:25.000 di tutto il territorio appenninico della regione (Carta dell'Inventario del Dissesto) e ha permesso una stima percentuale del territorio in frana sia per comuni che per formazioni.

È ovvio che la distribuzione a scala regionale della franosità è governata per lo più dalle litologie affioranti. È infatti



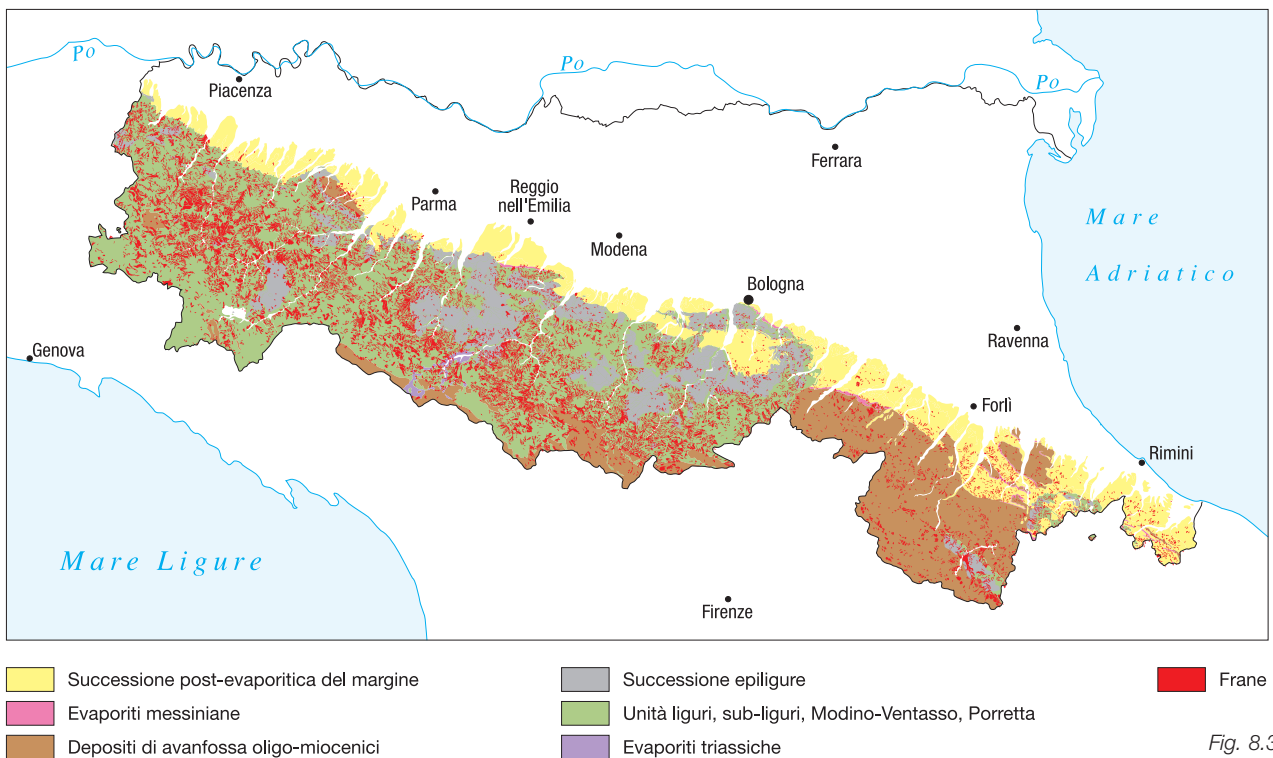
ti evidente una maggiore concentrazione delle frane nell'Appennino emiliano e nel Montefeltro dove prevalgono le rocce argillose dei domini liguri e subliguri (fig. 8.3).

A parità di litologia affiorante, emerge però una concentrazione delle frane in corrispondenza delle principali strutture tettoniche.

Ciò è particolarmente evidente nell'Appennino Romagnolo dove affiora estesamente la Marnoso-Arenacea, formazione caratterizzata dalla tipica alternanza

di arenarie, mediamente ben cementate, e marne, che non presenta una particolare predisposizione a dissesti di versante. Dalla semplice osservazione delle carte geologiche risulta comunque evidente che le frane sono più frequenti in corrispondenza delle principali strutture, in particolare quelle di accavallamento (fig. 8.4).

Il confronto frane/strutture nell'Appennino emiliano è invece meno immediato. È però interessante notare che anche in questo settore, a parità di litotipi affioranti, esi-



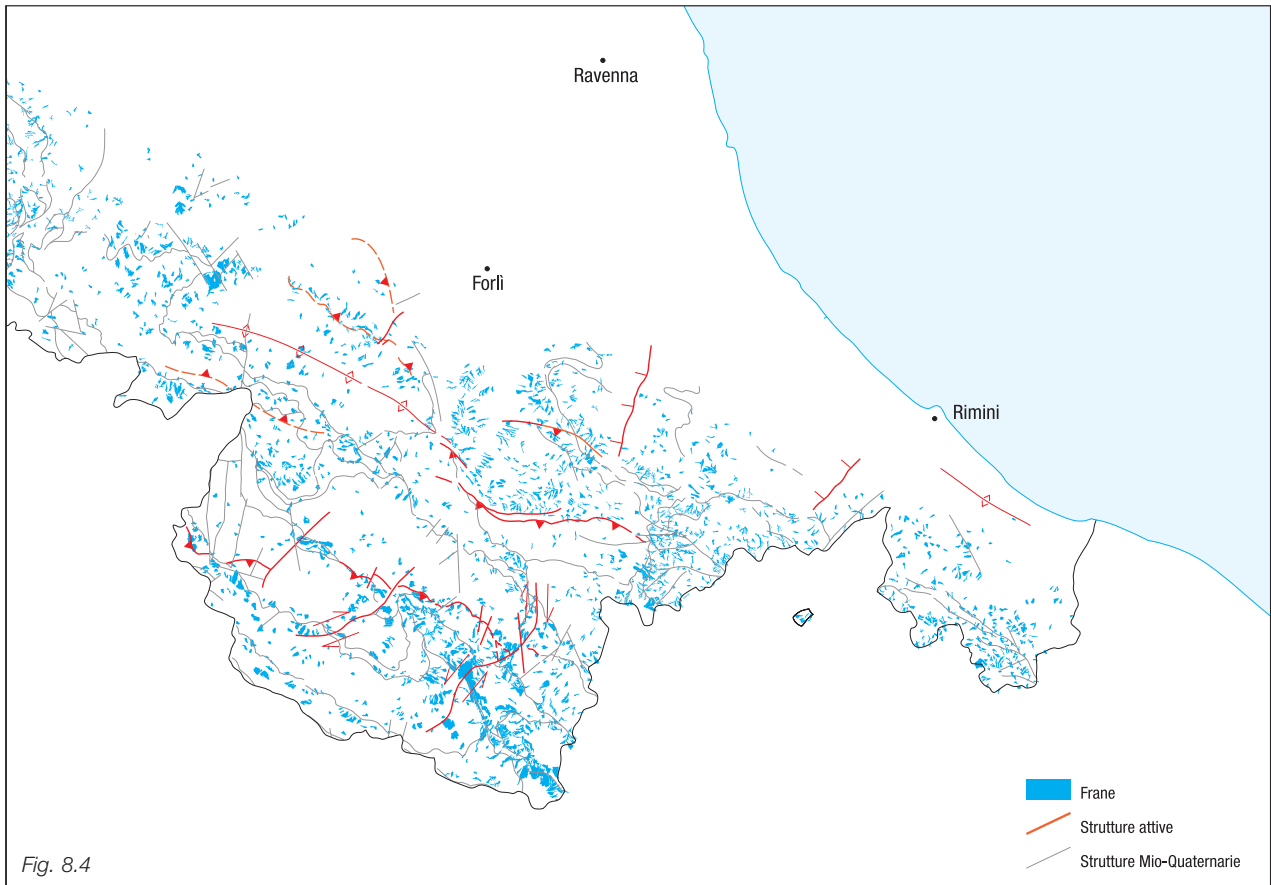


Fig. 8.4

stano differenze di concentrazione dei dissesti di versante. I comuni con percentuale del territorio in frana maggiore del 30% (RER, 1999) si concentrano nel medio Appennino (fig. 8.5), in corrispondenza dell'alto strutturale determinato dal raddoppio attivo del basamento, interpretato come uno dei settori dell'Appennino attualmente soggetti a maggiore sollevamento.

Uno dei maggiori problemi di natura geologica che riguardano la pianura è la subsidenza. Tra le cause dell'at-

tuale abbassamento del suolo, l'estrazione di fluidi (acqua, gas) dal sottosuolo gioca senz'altro un ruolo primario. In figura 8.6 sono riportati i prelievi di acqua dalla falda per comune in valori in milioni di m<sup>3</sup> (ARPA, 2003a e dati inediti, cortesia ARPA); si noti come i massimi emungimenti dalla falda si hanno in corrispondenza dei maggiori centri urbani lungo la via Emilia, in particolare nei comuni di Parma, Modena e Bologna.

Sulla base dei dati di ARPA (2003b) è possibile indivi-

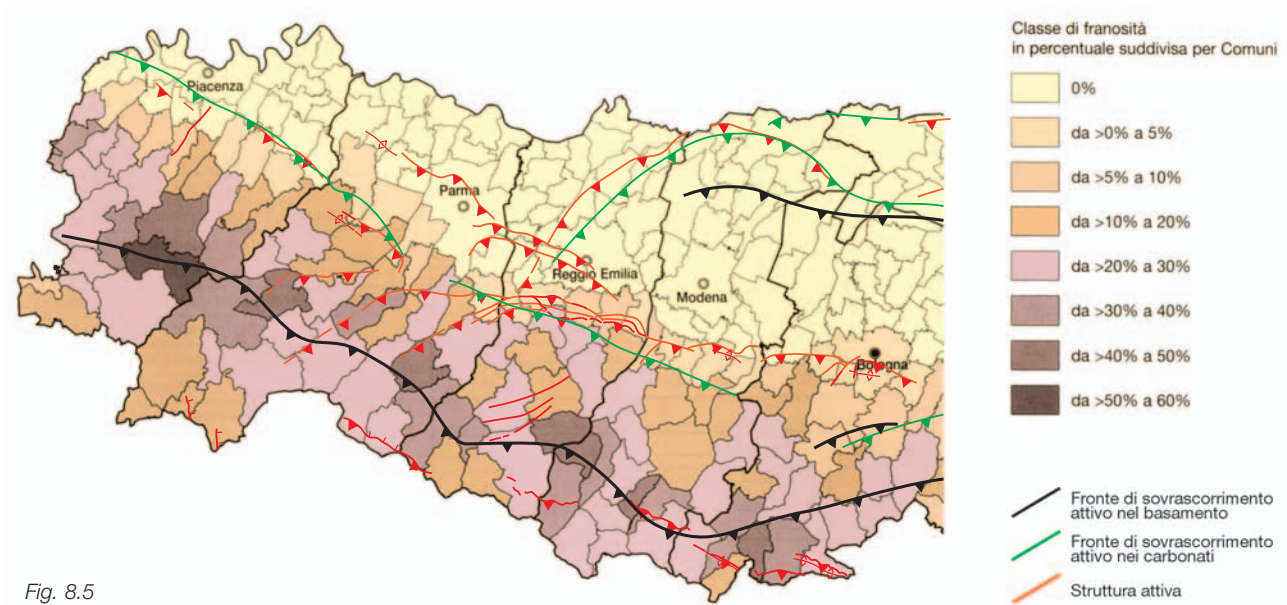


Fig. 8.5

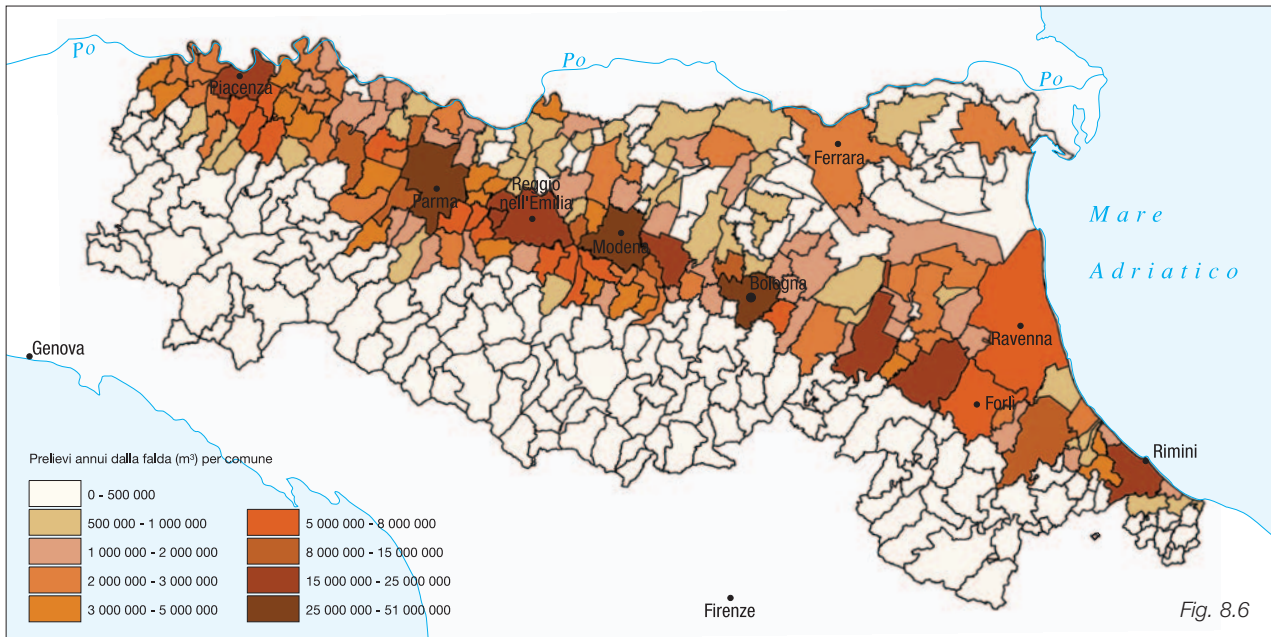


Fig. 8.6

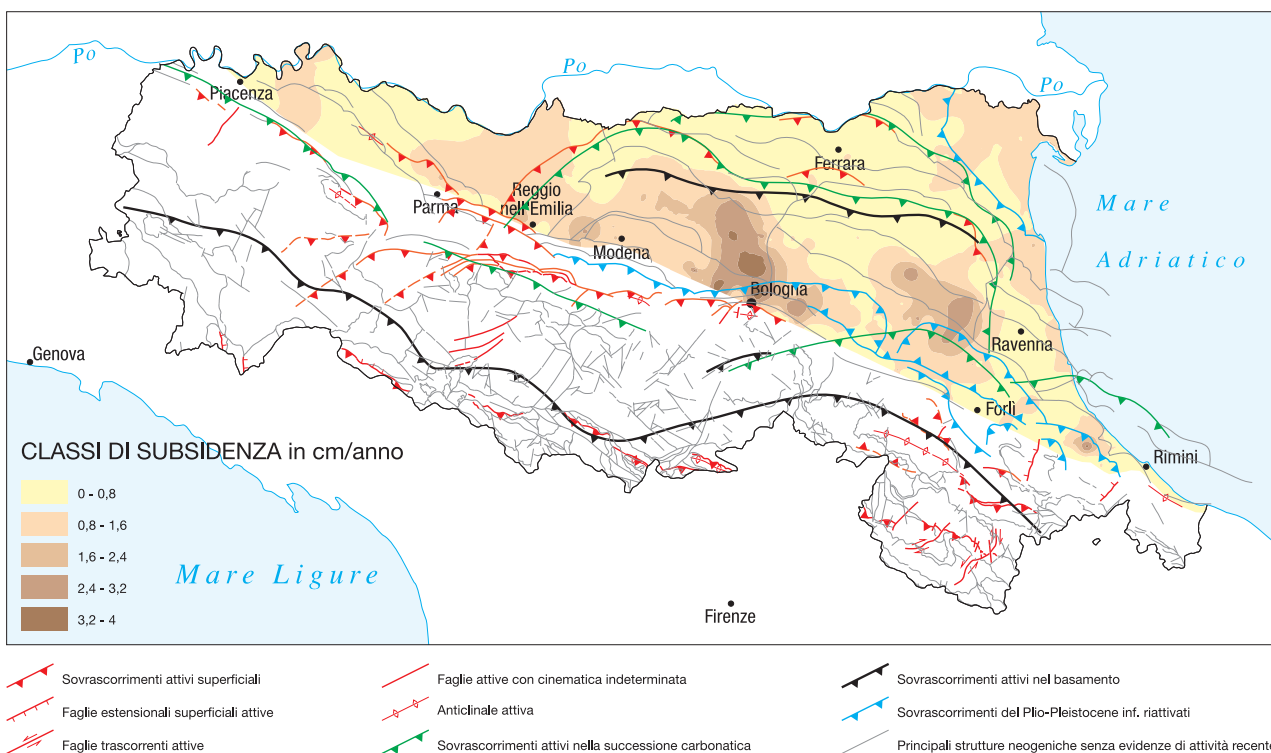


Fig. 8.7

duare nella pianura emiliano-romagnola fasce caratterizzate da diversi valori di subsidenza e suddividere la pianura in classi di abbassamento del suolo in cm/anno. Risultano subito evidenti due settori con forte abbassamento (> 2,4 cm/anno): uno immediatamente a nord di Bologna e l'altro ad ovest di Ravenna.

Confrontando le figure 8.6 e 8.7, si nota tuttavia che non sempre c'è corrispondenza tra i massimi emungimenti e i massimi abbassamenti del suolo. In particolare si noti come al massimo prelievo idrico dalle falde nel comune di Parma corrisponde un minimo di subsidenza e come i massimi di

subsidenza a nord di Bologna e ad ovest di Ravenna non ricadano in comuni con forti prelievi dalla falda.

È dunque evidente che la subsidenza nella pianura emiliano-romagnola non è spiegabile solamente con il forte sfruttamento delle falde. Occorre infatti considerare anche altri fattori:

1) i prelievi idrici in Pianura Padana avvengono da diversi acquiferi e quindi le differenze nell'abbassamento del suolo risentono anche dei diversi tempi e modalità di ricarica a seconda degli acquiferi sfruttati (RER & ENI - Agip, 1998);

2) l'abbassamento del suolo è dovuto anche alla naturale compattazione dei sedimenti alluvionali;

3) in un sistema catena-pianura regolato da sovrascorrimenti attivi, come l'Appennino, le aree a valle dei sovrascorrimenti sono soggette a subsidenza per la naturale evoluzione tettonica del sistema.

Relativamente al punto 3) è perciò interessante il confronto tra i dati sull'abbassamento del suolo (ARPA, 2003b) le principali strutture attive e recenti (fig. 8.7) e la carta sismotettonica.

Risulta subito evidente che i due massimi di subsidenza corrispondono a zone di basso strutturale in cui la base del SERS è a profondità maggiori di -250 m s.l.m.; viceversa le zone con subsidenza minima o nulla (< 0,8 cm/anno) corrispondono tutte ad alti strutturali.

In particolare, la zona fortemente subsidente a nord di Bologna risulta compresa tra il fronte attivo del margine bolognese e l'alto di Mirandola e Finale Emilia, parte considerata attiva della dorsale ad ovest di Ferrara, mentre la zona più subsidente ad ovest di Ravenna è compresa tra il fronte del margine romagnolo, che mostra evidenze di riattivazione tardo-pleistocenica, e la parte della dorsale ferrarese compresa tra Ferrara e Ravenna, anch'essa in parte considerata attiva. Questi due massimi di subsidenza ricadono nel settore della sinclinale interposta tra il *thrust* pede-appenninico e le Pieghe Ferraresi.

Risulta una buona corrispondenza anche della distribuzione dei massimi secondari di abbassamento con le altre porzioni delle strutture del margine e degli archi delle Pieghe Emiliane e Ferraresi, in particolare ancora nella pianura modenese, nella pianura tra Reggio Emilia e Parma e lungo la costa adriatica.

Viceversa gli abbassamenti minori si registrano in corrispondenza della dorsale ferrarese, della dorsale delle pieghe emiliane tra Parma e Piacenza e lungo alcuni tratti del margine appenninico-padano.

Inoltre, secondo la "Carta altimetrica e dei movimenti verticali del suolo della Pianura Padana" (Castiglioni *et alii*, 1997), livellazioni I.G.M. effettuate nel 1980 in Emilia hanno evidenziato sollevamenti rispetto alle livellazioni effettuate nel 1974 lungo i tratti Reggio Emilia-Rubiera e Modena-Castelfranco Emilia della SS 9 via Emilia mentre livellazioni effettuate negli anni 1970-72 in Romagna hanno evidenziato sollevamenti, rispetto alle livellazioni degli anni 1949-53, nei tratti Castel S. Pietro-Fortì ovest e Forlimpopoli-Cesena est della SS 9 via Emilia.

Altro rischio naturale legato alla presenza di faglie è l'emissione di radon naturale dal sottosuolo. Il radon è un gas che si forma naturalmente nelle rocce grazie all'attività di alcuni elementi presenti soprattutto in vulcaniti e rocce metamorfiche ed è considerato uno dei principali gas utili per il riconoscimento di aree interessate da faglie attive in aree vulcaniche e metamorfiche (King, 1986; Huixian & Zuhuang, 1986). In Emilia-Romagna rocce vulcaniche e metamorfiche sono presenti solo in profondità; pertanto eventuali manifestazioni importanti di radon sono senz'altro da mettere in relazione con una risalita di gas dal sottosuolo e quindi con la presenza di faglie.

Questo gas è considerato dannoso in quanto ritenuto uno dei principali responsabili di alcune gravi malattie dell'apparato respiratorio. Per la prevenzione del "rischio radon", il Ministero della Sanità e le Regioni hanno avviato campagne di monitoraggio per individuare eventuali zone a rischio.

I dati disponibili per l'Emilia-Romagna (Regione Emilia-Romagna, Servizio Sanità Pubblica, dati inediti) sono stati raccolti grazie ad una campagna di monitoraggio effettuata nella prima metà degli anni '90 che ha interessato quasi 1000 edifici, tra abitazioni e scuole, di tutta la regione. Dalle misure effettuate risultano 7 valori oltre la soglia considerata di attenzione ( $Rn \geq 200 \text{ Bq/m}^3$ ) e 2 valori prossimi alla soglia considerata di rischio ( $Rn \geq 400 \text{ Bq/m}^3$ ). Il basso numero di valori "anomali" è in accordo

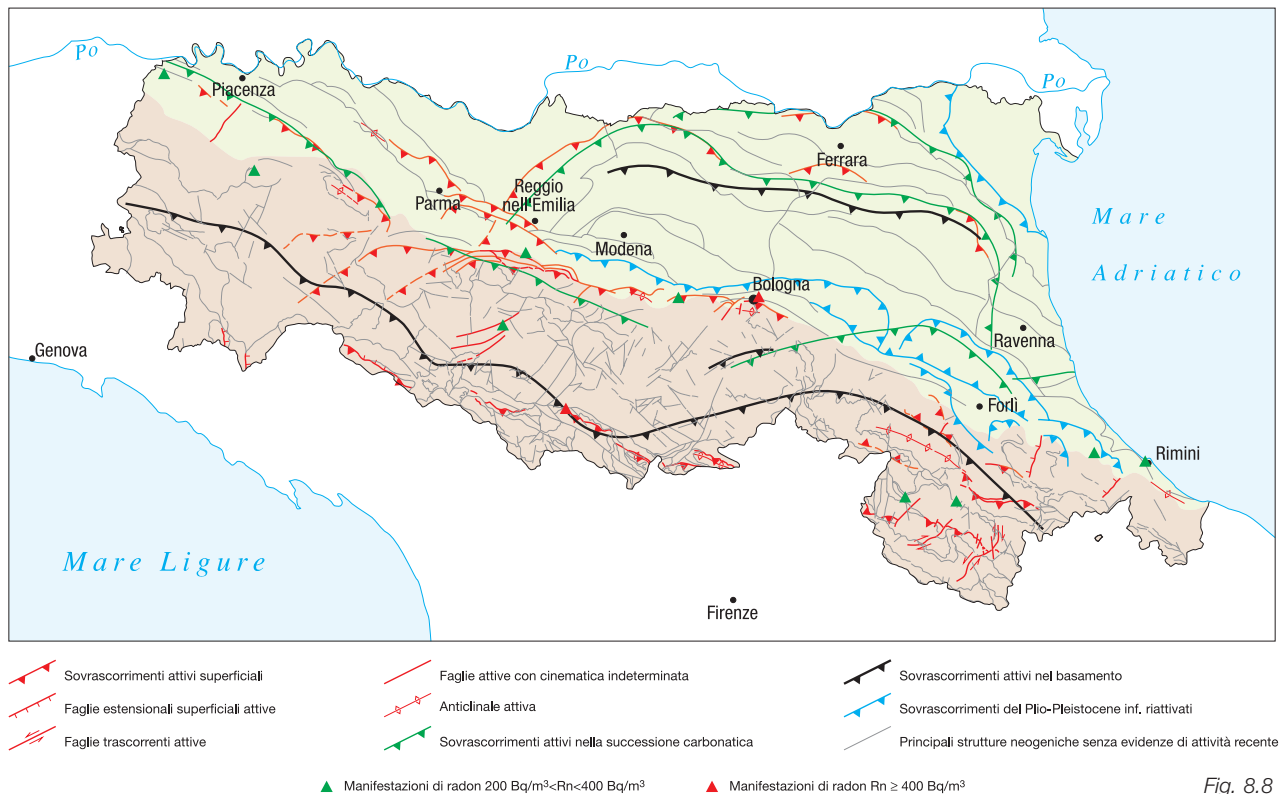


Fig. 8.8

con la natura sedimentaria dei terreni affioranti in Emilia-Romagna. Considerando solo le "anomalie", cioè i 7 valori  $>200 \text{ Bq/m}^3$  e i 2 valori  $>400 \text{ Bq/m}^3$ , è evidente la relazione con le faglie, in particolare con quelle attive (fig. 8.8). Infatti, i 2 valori più alti ricadono entrambi su strutture attive affioranti e le altre 7 misure sono tutte localizzate in corrispondenza di faglie affioranti, alcune delle quali attive, come le faglie della Val Secchia o le strutture del margine a ovest di Bologna e a sud di Reggio Emilia.

## 9 - CONCLUSIONI

L'analisi comparata della sismicità e delle strutture attive, evidenti per la loro espressione sia morfologica che geologica, unitamente ad una riconsiderazione dei dati disponibili sui movimenti verticali del suolo (sollevamento dei terrazzi alluvionali, subsidenza, evoluzione del reticolo idrografico) e alla ricostruzione delle isobate delle 2 principali e più recenti superfici di discontinuità del sottosuolo (rispettivamente 450.000 anni, base del SERS, e 10.000 anni, base dell'Olocene), ha permesso di ottenere un quadro neotettonico e sismotettonico della Regione Emilia-Romagna ben definito e del tutto nuovo, in cui ben si inquadrano tutti gli aspetti considerati.

Questo quadro inoltre spiega anche coerentemente la distribuzione di alcune manifestazioni naturali (termalismo e gas metano) e alcuni rischi geologici (franosità, radon, subsidenza).

Confrontando le figure 7.1 e 7.2 si ottiene la figura 9.1 che può essere considerata lo schema di sintesi sull'attività neotettonica in Emilia-Romagna.

Emerge che le zone a maggiore sollevamento, con tassi  $>1 \text{ mm/anno}$ , sono individuabili nella parte alta della catena, corrispondente al settore a monte del principale raddoppio

crostale a conferma dell'attività di questa struttura.

L'area a sollevamento intermedio, con tassi mediamente  $\geq 1 \text{ mm/anno}$ , corrisponde al settore immediatamente retrostante la struttura superficiale del margine che da Bologna si estende verso NW fino alla valle del Taro.

Le aree a minore sollevamento ( $<1 \text{ mm/anno}$ ) si collocano immediatamente a valle della struttura crostale. È interessante notare che l'area di minore sollevamento del medio Appennino modenese si colloca in posizione intermedia tra la struttura crostale e la struttura pede-appenninica orientate circa WNW-ESE ed ha una forma a losanga con asse circa E-W. Il quadro che emerge è tipico di strutture di un sistema transpressivo sinistro e la zona meno sollevata assume il significato di un *thrust-top basin*.

Anche in pianura le zone di minore abbassamento, con tassi  $<1 \text{ mm/anno}$ , corrispondono alle aree maggiormente interessate dalle strutture attive. Le strutture di questo settore sono sepolte e non mostrano, generalmente, evidenze in superficie.

La zona di minore abbassamento tra Bologna e Rimini è localizzata al di sopra di strutture attive soprattutto nella successione carbonatica, mentre l'area corrispondente all'arco della dorsale ferrarese si colloca al di sopra di strutture attive sia crostali che superficiali.

Il sistema attivo delle Pieghie Emiliane a nord di Parma corrisponde al limite tra la zona in minore sollevamento della catena con la zona di minore abbassamento della pianura.

La sismicità legata alle strutture superficiali, con ipocentri mediamente ad una profondità inferiore a 15 km, risulta molto diffusa in catena e più localizzata in pianura, soprattutto in corrispondenza della dorsale ferrarese. I meccanismi focali calcolati risultano compressivi e trascorrenti indicando direzioni di compressione sia NE-SW che NW-SE. I meccanismi focali distensivi sono nettamente secondari. Ciò è in totale accordo con quanto emerso dal-

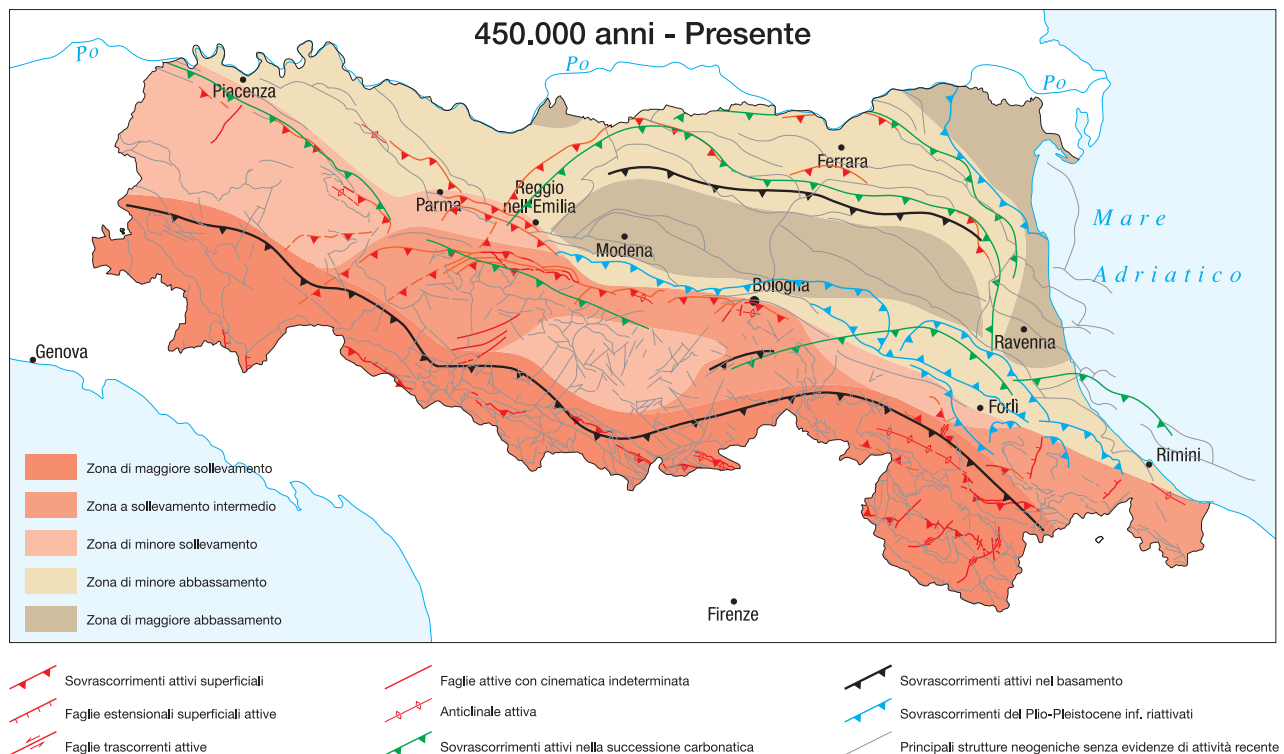


Fig. 9.1

l'analisi dei campi di stress recenti e attivi (cap. 6 e fig. 6.1). Risulta quindi che la cinematica delle principali strutture attive superficiali è di tipo transpressivo.

La sismicità crostale, con ipocentri mediamente compresi tra 15 e 35 km, mostra una distribuzione simile a quella più superficiale ma con una densità inferiore. Anche in questo caso i meccanismi focali risultano compressivi e trascorrenti con direzioni di compressione sia NW-SE che NE-SW ed i meccanismi distensivi sono rari e ben localizzati.

La sismicità più profonda, con ipocentri oltre i 35 km, fino ad oltre 50 km, è sempre diffusa nel settore di catena e in corrispondenza del margine appenninico-padano, e decisamente minore in pianura. I terremoti profondi risultano quasi tutti di bassa magnitudo, probabilmente per la maggiore presenza di fluidi nel mantello, per cui pochi sono i meccanismi focali calcolati. Ciò nonostante questi sono in accordo con quanto riscontrato nei livelli strutturali superiori.

Risulta così un modello geodinamico attivo in cui le strutture superficiali della copertura, quelle crostali nonché quelle del mantello, sebbene tra loro distinte, sono tutte coerenti e inquadrabili in un sistema transpressivo che rispetto alle zone esterne dell'avampaese padano, relativamente stabili, assume il significato di un sistema di ordine inferiore all'interno di una zona di trascorrenza destra.

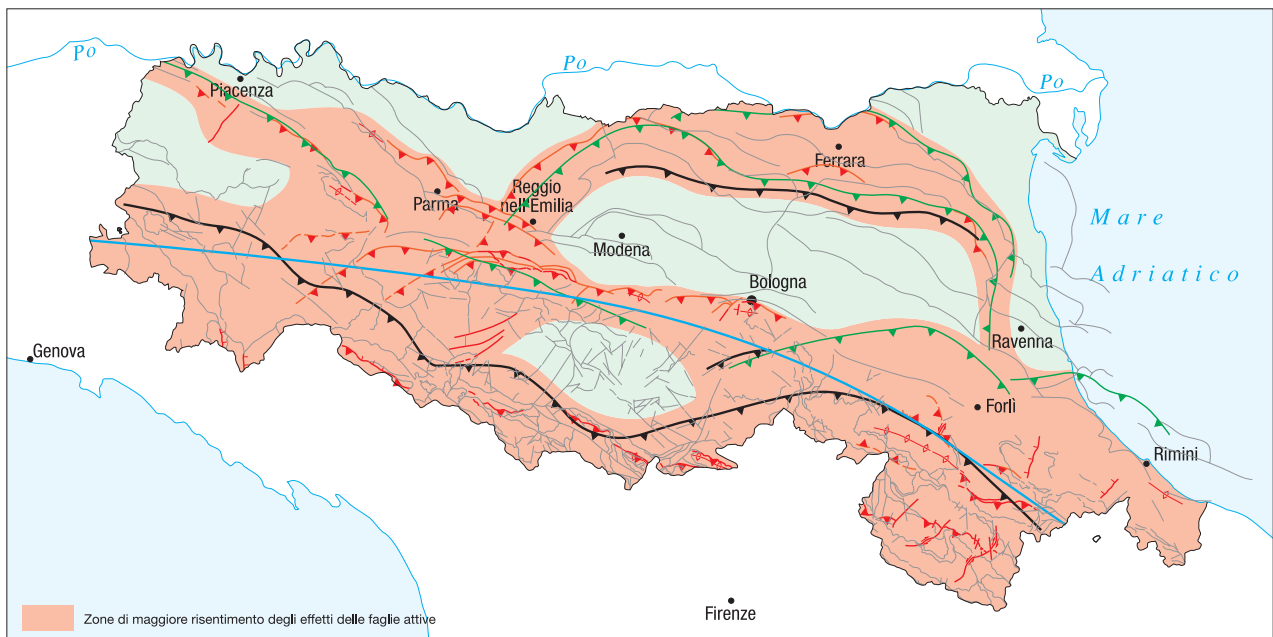
Nel definire le strutture sismogenetiche non si può prescindere dal considerare che esistono strutture attive, e

potenzialmente sismogenetiche, almeno a 3 livelli (copertura, crosta e mantello) anche se tra loro coerenti. In figura 9.2 viene riportata la distribuzione delle strutture attive rispettivamente della copertura, della crosta e del mantello con una zonazione delle aree che maggiormente risentono della loro attività. Per questa zonazione si è tenuto conto anche degli effetti superficiali quali le aree di maggiore sollevamento in catena e di minore abbassamento in pianura, come pure della distribuzione delle aree a maggiore frequenza di fenomeni franosi. Le zone di maggiore risentimento corrispondono anche alle aree dove sono più frequenti le manifestazioni superficiali di idrocarburi e le sorgenti termo-minerali.

**Ringraziamenti**

Si ringrazia ENI SpA - Exploration & Production Division, per avere concesso la consultazione di profili sismici e delle carte delle manifestazioni superficiali di idrocarburi.

Si ringrazia anche il Prof. Marco Pieri per le utili discussioni ed i preziosi suggerimenti.



- Sovrascorrimenti attivi superficiali
- Faglie estensionali superficiali attive
- Faglie trascorrenti attive
- Faglie attive con cinematica indeterminata
- Anticlinale attiva
- Sovrascorrimenti attivi nella successione carbonatica
- Sovrascorrimenti attivi nel basamento
- Sovrascorrimenti del Plio-Pleistocene inf. riattivati
- Principali strutture neogeniche senza evidenze di attività recente
- Struttura della Moho

Fig. 9.2

## 10 - THE SEISMOTECTONIC MAP OF THE EMILIA-ROMAGNA REGION

The Northern Apennines are a thrust belt which formed principally during the Neogene but which displays extremely young morphologies, evidence of recent uplift and constant seismicity, indicating that the formation process of the chain is still ongoing.

The level of seismicity in Emilia-Romagna can be categorized as average in relation to seismic activity nationally, with the maximum recorded magnitude of earthquakes between 5.5 and 6 on the Richter scale, with an intensity of IX-X on the MCS scale. The biggest earthquakes ( $M \geq 5.5$ ) have been felt in the south-east, in particular in the Romagna Apennines and along the Rimini coastline. Other areas affected by frequent seismic activity, although generally of lesser intensity ( $M < 5.5$ ), include the Po Plain-Apenninic margin between the Arda valley and Bologna, the arch of the Ferrara ridge and the Apennine watershed. The latter is also affected by the seismicity of two major seismogenetic areas in Tuscany, namely the Mugello and the Garfagnana, which have registered earthquakes of a magnitude above 6.

To improve the knowledge of the territory, and in particular to gain an insight into recent and ongoing evolution and help identify any seismogenetic structures, the Geological, Seismic and Soil Survey of Emilia-Romagna Region deemed has launched a region-wide seismotectonic research project. The project sets out to collate and present seismological data and information relating to active structural elements identifiable on the basis of morphological and geological data.

To produce this seismotectonic map, specific geological and geomorphological studies were carried out, and instrumental and historical seismological data was revised.

Valuable information on the stratigraphy and the structures of the Apenninic margin and Po Plain subsoil was derived from seismic profiles (courtesy of ENI SpA - Exploration & Production Division) and from the map 1:250.000 "Groundwater reserves in Emilia-Romagna Region" (RER & ENI - Agip, 1998).

This seismotectonic map correlates surface active structures with deep ones both in the Apennines and in the Po Plain, taking into account stress fields and, in relation to earthquakes, hypocentral distribution at depth.

Comparing geological, morphological and seismological data has made it possible to identify the most important active structures, represented in figure 7.1. From distribution and frequency of recognisable surface active structures, it emerges that these are not uniformly distributed throughout the region, but are clearly localized in three quite separate, identifiable areas.

1) An almost continuous fault system can be identified at the southern margin of the map, along the Apennine watershed, coinciding approximately with the overthrust front of Cervarola and Falterona tectonic units on Ligurian nappe in Emilia, and on Marnoso-Arenacea in Romagna.

This front behaved as an out-of-sequence thrust probably as early as the Pliocene (Bendkik et alii, 1994; Bettelli & Boccaletti, 2002; Cerrina Feroni et alii, 2002).

Indications of recent and ongoing activity along this front derive above all from much morphostructural evidence, for example the morphological contrast along the fault

scarp which brings the Macigno and glacial deposits together in the Mount Orsaro area, plus the morphological contrast and signs of fluvial capture around the anticline of Castiglione de' Pepoli.

2) Another active fault system coincides with the best part of the Po Plain-Apenninic margin. Based on frequency and evidence of the structures, three quite separate sectors can be identified.

From north-west to south-east we find:

- I) the area west of the Taro valley;
- II) the area between the Taro valley and Idice valley (east of Bologna);
- III) the area east of the Idice valley, corresponding to the Romagna margin.

I) In the area west of the Taro river, the structures showing signs of recent activity do not coincide with the margin however, between Castel S. Giovanni and Salsomaggiore, they coincide with the buried front of the Emilia Folds, a SE trending continuation of the Stradella thrust described from Bertelli et alii (2003).

Between Salsomaggiore and the Taro valley, meanwhile, the front coinciding with the margin is also active. The activity of this structure is responsible for the formation of the anticline and the tectonic window of Salsomaggiore.

The corresponding sector of the lower and mid Apennines shows no evidence of surface active structures of particular importance, with the exception of the reactivated overthrust faults which led to the formation of the Bobbio tectonic window.

II) The area between the Taro valley and Idice valley, just east of Bologna, is the sector characterised by the greatest number of manifestations of active structures. A continuous active front can be traced in this area, coinciding with the morphological boundary between the Apennines and the Po Plain.

The corresponding Apennine area also presents much evidence of active structures, both morphological and geological: outcrops of Middle Pleistocene deposits (Yellow Sands, Imola Sands, ancient alluvial deposits), are folded and faulted; the terraces of the upper plain, formed largely by Late Pleistocene deposits, are uplifted and tilted.

Throughout the area, seismic profiles of the subsoil (A-A' and C-C' profiles, fig. 2.14) reveal that the Ligurian units and post-evaporitic sequence are faulted and folded until the end of the Middle Pleistocene.

Reconstruction of the Holocene base (figures 4.16 and 5.5a) shows that the base of deposits of the last 10,000 years plunged rapidly, reaching the greatest depth in proximity to the morphological boundary between the Apennines and the Po Plain between Reggio Emilia and Bologna.

In the Bologna hills there are also several back-thrusts that link up in the subsoil with the Pede-Apenninic thrust-front.

Between the Enza and Taro valleys, the system of structures of the Pede-Apenninic front rotates from approximately EW and WNW-ESE, the preferential orientations between the Enza valley and Bologna. The front divides and three buried thrusts trend SW through the Parma, Taro and Ceno valleys. Fig. 2.7 shows how the area east of the Taro is uplifted compared to the area to the west; indeed, the thickness of the Ligurian units is greatest between the Ceno and Nure valleys, while it is greatly reduced between



the Taro and Secchia valleys.

Several active faults, transverse to the axis of the chain, have been identified in the upper and mid Secchia valley and between Castellarano and Sassuolo.

This area is therefore characterised by a virtually continuous structure trending WNW-ESE, which at the northernmost end displays a geometry with splays typical of transcurrent structures (Biddle & Christie-Blick, 1985; Woodcock & Fischer, 1986).

III) SE of Bologna, meanwhile, between the Idice and Ronco-Bidente valleys, post-evaporitic deposits dip under quaternary floods to form a monocline, and do not appear dislocated on the surface by active faults.

The main signs of Pede-Apenninic front activity in the Romagna area are found in the Apennines and consist mainly of the Modigliana anticline, blind back-thrusts localized at the base of the Pliocene and in the Marnoso-Arenacea between the valleys of Lamone and Montone, and the Cesena "high". The structural order of the Cesena hills is more complex, with a series of thrust and folds cut by an extensional anti-Apenninic structure in the Savio valley.

East of Cesena, post-evaporitic deposits again dipped under quaternary alluvium to form a monocline and do not appear dislocated on the surface by active faults. The only structures that present signs of activity are the folds which, in outcrops, deform Middle Pleistocene deposits between Rimini and Cattolica.

On the contrary, in Romagna there are numerous manifestations of active structures in the Apennines.

3) Lastly, an important active fault system coincides with the upper Ferrara Folds and the Emilia Folds (Pieri & Groppi, 1981).

In this case the principal manifestations of activity derive from seismic profiles (see profiles below the map).

It also emerges from seismic profiles that the active and recent structures described above are connected at depth with compressive structures affecting the carbonate sequence and the basement.

The carbonate sequence, the roof of which varies in depth from a minimum of approximately 1000 m in the anticline of the mid Romagna Apennines (section D-D') to a maximum of approximately 10,000 m below the syncline of the lower Bologna Apennines (section C-C') and in the syncline between Modena and Carpi (section B-B'), is thrust-faulted, these thrusts linking up with the active structures of the upper Apennines (sections A-A' and D-D'), the Po Plain-Apenninic margin (sections C-C' and D-D') and with the Ferrara ridge (sections B-B', C-C' and E-E').

The structures affecting the basement (compare also Argnani et alii, 1997 and Argnani et alii, 2003), the roof of which has been found to vary in depth from approximately 6,000 m and just under 10,000 m on the plain (sections C-C' and E-E'), approximately 8,000 m in the upper Apennines and up to approximately 12,000 m in the lower Apennines (sections D-D' and C-C'), also connect up with surface active thrust fronts, in particular with the Bologna Pede-Apenninic thrust (sections C-C') and with the Ferrara ridge (sections C-C' and D-E').

The position of the fronts of these structures in the basement and in the carbonate sequence was first demonstrated by Argnani et alii (1997), and this study has also been used for localization in this map.

The folds of the basement and of the carbonate sequen-

ce clearly explain the variations in thickness of the Ligurian allochthonous nappe and the formation of tectonic windows (see geological cross-sections, figures 2.3 and 2.7).

Seismicity linked to surface structures, with hypocentres at an average depth of less than 15 km, is widespread throughout the Apennines and more localized on the Plain, above all next to the Ferrara ridge. Computed focal mechanisms are compressive and transcurrent, indicating both NE-SW and NW-SE compression directions. Distensive focal mechanisms are distinctly secondary. This is entirely consistent with findings from studies of recent and active stress fields (chapter 6 and fig. 6.1). It transpires therefore that the kinematics of the principal surface active structures are transpressive in type.

Crustal seismicity, with hypocentres on average between 15 and 35 km, has a similar distribution pattern to more superficial seismicity, but with lower density. Again in this case the focal mechanisms are compressive and transcurrent with both NW-SE and NE-SW compression directions, and distensive mechanisms are few and very much localized.

The deepest seismicity, with hypocentres above 35 km and up to more than 50 km, is again widespread in the Apennines and around the Po Plain-Apenninic margin, and significantly more limited on the plain. Deep earthquakes are almost all low in magnitude, probably due to the greater presence of fluid in the mantle, consequently there are few computed focal mechanisms. Despite this, they are consistent with findings in upper structural levels.

Figure 7.1 also represents the trend of a deep structure affecting the Moho. The localization of this structure derives from Bigi et alii (1990), Argnani et alii (1997), Finetti et alii (2001) and from seismotectonic profiles accompanying the map, which reveal how the Moho is on average 5 km deeper on the plain and below the Po Plain-Apenninic margin than it is in the Apennines. We can also note how with this considerable increase in depth the hypocentres are clustered in a strongly south-dipping band. In addition, diagrams 1-4 and the seismotectonic profiles accompanying the map show an increased frequency of earthquakes south of this structure. The profiles also show that the hypocentres are clustered along a south-dipping band that is well connected to the compressive structures of the surface. These fault systems could correspond to the main crustal faults.

Lastly, we should also note the remarkable correspondence between the strike of the "boxes" of the possible seismogenetic faults and the trending of the main recognised active structures. In particular the "boxes" along the margin and in the Apennines themselves mostly trend between NW-SE and E-W, approximately coinciding with the axial direction of the chain, or Apenninic direction, while the "boxes" on the plain, between Reggio Emilia and Parma and between Bologna and Ferrara, present a more or less parallel orientation to that of the main buried active structures, namely the Emilia Folds and the Ferrara Ridge.

As regards the Northern Apennines, there are no regional studies indicating areas with different uplift rates. The only study available to date, the "Neotectonic map of the northern Apennines" (Bartolini et alii, 1982), from the Middle Pleistocene to today, finds that the entire Apennine range of Emilia-Romagna is uplifted, but fails to distinguish areas of different growth rates. In contrast, on the Emilia-

Romagna plain, which is generally subsiding, the authors actually report minor subsidence in relation to the Ferrara ridge between Reggio Emilia and Ravenna.

Data collected allows us to identify areas which over the past 450,000 years (start of the Emilia-Romagna Upper Synthem, SERS) have been subject to different rates of uplift and subsidence (fig. 7.2).

In order to quantify uplift, at least with regard to the margin and the lower Apennines, maps illustrating uplift from the start of the Late Pleistocene have been compiled (fig. 5.3), based on the level of dated terraces. It emerges that along the Po Plain-Apenninic margin, uplift is greatest between the Reno and Taro rivers in Emilia and from the Bidente to the Savio river in Romagna ( $>1$  mm/year). Least uplift, meanwhile, is registered in western Emilia (west of the Taro) and in western Romagna between the Santerno and Montone rivers ( $<1$  mm/year).

For the remaining areas of the Apennines, where little information can be gleaned from terraces, it is impossible to make a quantitative estimate regarding uplift. Nonetheless, it is possible, using morphostructural data, to recognise – albeit approximately – areas with different degrees of recent and ongoing uplift. The areas presenting greatest uplift, with tectonic windows, thinning of the Ligurian and Epiligurian allochthonous nappes, presence of structural highs of the carbonate sequence, reactivated thrusts and the formation of out-of-sequence thrusts, are the upper Emilia Apennines and the entire Apennine chain of Romagna above the identified basement thrust; areas which have, on the other hand, experienced less uplift with considerable thickness of the allochthonous nappes, are the lower and mid Apennines of Piacenza, Modena and Bologna, that is to say all those areas below the basement thrust (see figures 2.3 and 2.7; see also Argnani et alii, 1997).

As for the plain, it transpires from the map and from figures 2.16 and 4.16 that it is widely subject to ongoing negative vertical movements; nonetheless even in this area we can identify areas with different levels of subsidence. In particular, subsidence is greatest (approximately 1 mm/year) in the syncline just north of Modena and Bologna, which stretches east all the way to Ravenna, and along the north-west coast, east of the Ferrara ridge. Slighter subsidence ( $<1$  mm/year) is meanwhile found above and to the east of the Ferrara ridge; here the effect of subsidence is mitigated by the uplift of the ridge. These differential movements on the plain have been ongoing for 450,000 years, as indicated by the geometry of the base surface and the thicknesses of the SERS (see also RER & ENI - Agip, 1998).

Comparative analysis of seismicity and active structures, identifiable both morphologically and geologically, coupled with a review of available data on vertical ground movement (uplift of alluvial terraces, subsidence, evolution of the hydrographic network) and the reconstruction of the isobaths of the 2 main and most recent unconformities (450,000 years ago, SERS base, and 10,000 years ago, Holocene base respectively), has made it possible to obtain a precise and entirely new neotectonic and seismotectonic framework of the Emilia-Romagna region, which takes into account all of these aspects.

By comparing figures 7.1 and 7.2 we arrive at figure 9.1, which can be considered a summary diagram of neotectonic activity in Emilia-Romagna.

It emerges that the areas of greatest uplift, with rates of

$>1$  mm/year, are to be found in the upper Apennines, corresponding to the area above the main crustal doubling, bearing out the activity of this structure.

The area of intermediate uplift, with average rates of  $\geq 1$  mm/year, corresponds to the area just behind the surface structure of the margin between Bologna and the Taro valley.

The areas of least uplift ( $<1$  mm/year) are found immediately below the crustal structure. It is interesting to note that the area of least uplift in the mid Apennines of Modena is found mid-way between the crustal structure and the WNW-ESE Pede-Apenninic structure, rhomboid in shape with an approximately E-W axis. The framework that emerges is typical of structures of a left-lateral transpressive system and the area of lowest elevation seems a thrust-top basin.

On the plain, too, the areas displaying least subsidence, with rates of  $<1$  mm/year, correspond to the areas most affected by active structures. The structures in this area are buried and generally speaking present no surface evidence.

The area of least subsidence between Bologna and Rimini is found above active structures, above all in the carbonate sequence, while the area corresponding to the arch of the Ferrara ridge is localised above both crustal and surface active structures.

The active system of the Emilia Folds north of Parma corresponds to the boundary between the Apenninic area of least uplift and the plain area of least subsidence.

Thus, there emerges an active geodynamic model in which the structures of the surface, those of the crust and the mantle, while separate and distinct, are all consistent with a transpressive system which compared to the relatively stable external areas of the Po Plain foreland, amounts to a system of inferior order within a right-lateral transcurrent zone.

This also explains the distribution of a number of natural phenomena (hot springs and hydrocarbon emissions) and some geological risks (landslides, radon, subsidence).

In defining seismogenetic structures, we must take into account that there are at least 3 levels of active and potentially seismogenetic structures (surface, crust and mantle) even although these may display coherency. Figure 9.2 illustrates the distribution of active structures in relation to the surface, the crust and the mantle, with a zonation of the areas most affected by their activity. This zonation takes into account superficial effects such as Apenninic areas of greatest uplift and Plain areas of least subsidence, as well as the distribution pattern of areas with the highest incidence of landslides. The areas most affected are also those with the highest incidence of hydrocarbon emissions and hot mineral springs.

Therefore, as well as defining local seismic risk and identifying potentially seismogenetic structures, this seismotectonic map also provides a picture of the relationships between current tectonic activity and natural risks. In this regard, it therefore constitutes not merely a scientific project but also a fundamental document for the study and monitoring of potentially active structures, for mitigating seismic risk and for gaining a better understanding of a number of geological phenomena. This makes it very useful in land use planning and management, enabling a more effective strategy aimed at curbing natural risks.

## 11 - BIBLIOGRAFIA / REFERENCES


- Achilli V., Arca S., Baldi P., Chiggio R., Landuzzi A., Marabini S., Tinti S. & Vai G.B. (1990) - *Studio sismotettonico dell'Appennino forlivese: il progetto GEOSIS*. Boll. Geod. e Sci. affini, 4, 319-361.
- Agip (1982) - *Lessico delle Formazioni del bacino padano*. In: "Guida alla geologia del margine appenninico-padano" a cura di Cremonini G. & Ricci Lucchi F., Guide Geologiche Regionali, Soc. Geol. Ital., 205-247.
- Aki K. & Richards P.G. (1980) - *Quantitative Seismology*. W. H. Freeman and Co., San Francisco, California.
- Ambrosetti P., Bartolini C., Bosi C., Carraro F., Ciaranfi N., Panizza M., Papani G., Vezzani L. & Zanferrari A. (1987) - *Neotectonic map of Italy (scale 1:500.000)*. C.N.R. Prog. Fin. Geodinamica.
- Amorosi A., Farina M., Severi P., Preti D., Caporale L. & Di Dio G. (1996) - *Genetically related alluvial deposits across active fault zones: an example of alluvial fan-terrace correlation from the upper quaternary of the southern Po Basin, Italy*. Sedimentary Geology, 102, 275-295.
- Anderson H. & Jackson J. A. (1987) - *Active tectonics of the Adriatic region*. Geophys. J. R. Astron. Soc., 91, 937- 983.
- Angelier J. & Mechler P. (1977) - *Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie : la méthode des dièdres droits*. Bull. Soc. Géol. Fr., 19 (6), 1309-1318.
- Anelli L., Gorza M., Pieri M. & Riva M. (1994) - *Subsurface well data in the northern Apennines (Italy)*. Mem. Soc. Geol. It., 48, 461-471.
- Argnani A., Bernini M., Di Dio G., Papani G. & Rogledi S. (1997) - *Stratigraphic record of crustal-scale tectonics in the quaternary of the Northern Apennines (Italy)*. Il Quaternario, 10 (2), 595-602.
- Argnani A., Barbacini G., Bernini M., Camurri F., Ghielmi M., Papani G., Rizzini F., Rogledi S. & Torelli L. (2003) - *Gravity tectonics driven by Quaternary uplift in the Northern Apennines: insights from the La Spezia-Reggio Emilia geo-transect*. Quaternary International, 101-102, 13-26.
- ARPA (2003a) - *Piano tutela delle acque. Documento preliminare*. Agenzia Regionale Prevenzione e Ambiente, Regione Emilia-Romagna.
- ARPA (2003b) - *Monitoraggio della subsidenza in Emilia-Romagna*. A cura di F. Bonsignore. In: I Quaderni di ARPA, "Acqua, suolo e clima: conoscere per governare. Alcune esperienze di ARPA-ER", 11-20
- Augliera P., Pastore S. & A. Tomaselli (1990) - *Sismicità della Lunigiana-Garfagnana: Primi Risultati di una Rete Mobile*. Atti Gngts (1990), 9° Conv., Roma, 221-232.
- Barbacini G., Bernini M., Papani G. & Rogledi S. (2002) - *Le strutture embricate del margine appenninico emiliano tra il T. Enza ed il F. Secchia - Prov. di Reggio Emilia (con carta strutturale alla scala 1:50.000)*. In: "Atti del III seminario sulla cartografia geologica", Bologna 26-27 febbraio 2002. Serv. Geologico, Sismico e dei Suoli, Reg. Emilia-Romagna - CNR, Istituto di Geoscienze e Georisorse, 64-69.
- Bartolini C., Bernini M., Carloni G.C., Costantini A., Federici P.R., Gasperi G.F., Lazzarotto A., Marchetti G., Mazzanti R., Papani G., Pranzini G., Rau A., Sandrelli F., Vercesi P.L., Castaldini D. & Francavilla F. (1982) - *Carta Neotettonica dell'Appennino Settentrionale*. Con note illustrative. Boll. Soc. Geol. It., 101, 503-549.
- Bendkik, A., M. Boccaletti, M. Bonini, C. Poccianti & Sani F. (1994) - *Structural evolution of the outer Apennine chain (Firenze-Città di Castello sector and Montefeltro area, Tuscan-Romagnan and Umbro-Marchean Apennine)*. Mem. Soc. Geol. Ital., 48, 515-522.
- Benedetti L., Tapponnier P., King G., Meyer B. & Manighetti I. (2000) - *Growth folding and active thrusting in the Montello region, Veneto, northern Italy*. J. Geoph. Res., 105, 739-766.
- Benedetti L., Tapponnier P., Gaudemer Y., Manighetti I. & Van der Woerd J. (2003) - *Geomorphic evidence for an emergent active thrust along the edge of the Po Plain: The Broni-Stradella fault*. J. Geoph. Res., 108, 2238, doi:10.1029/2001JB001546.
- Berardi R., C. Petrunaro, L. Zonetti, L. Magri & Mucciarelli M. (1993) - *Mappe di sismicità per l'area italiana*. ISMES/ENEL, 51 pp.
- Bettelli G., Boccaletti M., Cibin U., Panini F., Poccianti C., Rosselli S. & F. Sani (2002) - *Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 252 Barberino di Mugello*. Servizio Geologico d'Italia - regione Emilia-Romagna.
- Biddle K. T. & Christie-Blick N. (1985) - *Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation*. SEPM, Special Publication 37, 375-386.
- Bigi G., Cosentino D., Parotto M., Sartori R. & Scandone P. (1990) - *Structural Model of Italy, 1: 500 000*. CNR, Prog. Fin. Geodinamica, Quad. Ric. Sci., N. 114, Vol. 3. S.EL.CA., Firenze.
- Boccaletti M. & Guazzone G. (1970) - *La migrazione terziaria dei bacini toscani e la rotazione dell'Appennino Settentrionale in una "zona di torsione" per deriva continentale*. Mem. Soc. Geol. Ital., 9, 177-195.
- Boccaletti M., Elter P. & Guazzone G. (1971) - *Plate tectonic models for the development of the Western Alps and Northern Apennines*. Nature, Phys. Sc., 234, 108-111.
- Boccaletti M. & Guazzone G. (1974) - *Remnant arcs and marginal basins in the Cainozoic development of the Mediterranean*. Nature, 252, 18-21.
- Boccaletti M., Conedera C., Dainelli P. & Gocev P. (1982) - *The recent (Miocene-Quaternary) orogenic system of the Western Mediterranean region*. J. Petrol. Geol., v. 5, n. 1, 31-49.
- Boccaletti M., Coli M., Eva C., Ferrari G., Giglia G., Lazzarotto A., Merlanti F., Nicolich R., Papani G. & Postpischl D. (1985) - *Considerations on the seismotectonics of the Northern Apennines*. Tectonophysics, 117, 7-38.
- Boccaletti M., Calamita F., Deiana G., Gelati R., Massari F., Moratti G. & Ricci Lucchi F. (1990) - *Migrating foredeep-thrust belt system in the Northern Apennines and Southern Alps*. Palaeo., Palaeo., Palaeo., 77, 3-14.
- Boccaletti M., Bonini M., Moratti G. & Sani F. (1995) - *Nuove ipotesi sulla genesi e l'evoluzione dei bacini post-nappe in relazione alle fasi compressive neogenico-quadernarie dell'Appennino Settentrionale*. Accad. Naz. Sci., Scritti Doc., 14, 229-262.
- Boccaletti M., Gianelli G. & Sani F. (1997) - *Tectonic regime, granite emplacement and crustal structure in the inner zone of the Northern Apennines (Tuscany, Italy): a new hypothesis*. Tectonophysics, 270, 127-143.
- Boccaletti M. & Sani F. (1998) - *Cover thrust reactivations related to internal basement involvement during Neogene-Quaternary evolution of the Northern Apennines*. Tectonics, 17, 112-130.
- Bonini M., Moratti G. & Sani F. (1999) - *Evolution and depocentre migration in thrust top basins: inferences from Messinian Velona Basin (Northern Apennines, Italy)*. Tectonophysics, 304, 95-108.

- Bortolotti V. (1966) - *La tettonica trasversale dell'Appennino*. 1. La linea Livorno-Sillaro. Boll. Soc. Geol. It., 85, 529-540.
- Boschi E., Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Valensise G. & Gasperini P. (2000) - *Catalogue of strong Italian earthquakes from 461 B.C. to 1997*. Annali di Geofisica V. 43 n. 4. CD-ROM allegato.
- Braunmiller, J., Kradolfer, U. & Giardini, D. (2002) - *Regional moment tensor determination in the European-Mediterranean area - initial results*. Tectonophysics, 356, 5-22.
- Bull W.B. & McFadden L.D. (1977) - *Tectonic Geomorphology north and south of the Garlock Fault, California*. In: D.O. Doehring (Ed.), Geomorphology in Arid Regions: Proceedings of the Eighth Annual Geomorphology Symposium. State University of New York at Binghamton, Binghamton, NY.
- Caputo M. & Caputo R. (1988) - *Structural analysis: new analytical approach and applications*. Annales Tectonicae, 2 (2), 84-89.
- Carey E. (1979) - *Recherche des directions principales des contraintes associées au jeu d'une population de failles*. Rev. Géol. Dynam. Géogr. Phis., 21 (1), 57-66.
- Carmignani L., Giglia G. & Kliffeld R. (1980) - *Nuovi dati sulla zona di taglio ensialico delle Alpi Apuane*. Mem. Soc. Geol. It., 21, 93-100.
- Carmignani L. & Kliffeld R. (1990) - *Crustal extension in the Northern Apennines: the transition from compression to extension in the Alpi Apuane core complex*. Tectonics, vol. 9, No. 6, 1275-1303, december 1990.
- Carmignani L., Decandia F.A., Fantozzi P.L., Lazzarotto A., Liotta D. & Meccheri M. (1994) - *Tertiary extensional tectonics in Tuscany (Northern Apennines, Italy)*. Tectonophysics, 238, 295-315.
- Carmignani L., Decandia A., Disperati L., Fantozzi L., Lazzarotto A., Liotta D. & Oggiano G. (1995) - *Relationships between the Tertiary structural evolution of the Sardinia-Corsica-Provençal Domain and the northern Apennines*. Terra Nova, 7, 128-137.
- Carta Geologica d'Italia, alla scala 1:50.000 (in stampa) - *Fogli: 180 Salsomaggiore Terme, 181 Fidenza, 199 Parma, 200 Reggio Emilia, 201 Modena, 219 Sassuolo, 220 Casalecchio di Reno, 221 Bologna, 239 Faenza, 240 Forlì, 256 Rimini*. Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna. Disponibile presso il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, Bologna.
- Castellarin A., Eva C., Giglia G. & Vai G.B. (1985) - *Analisi strutturale del fronte appenninico-padano*. Giorn. Geol. ser. 3, 47(1-2), 47-76.
- Castellarin A. & Pini G. A. (1989) - *L'arco del Sillaro: la messa in posto delle Argille Scagliose al margine appenninico padano (Appennino Bolognese)*. Mem. Soc. Geol. It., 39, 127-141.
- Castiglioni G. B., Bondesan A., Bondesan M., Gatti M. & Russo P. (1997) - *Carta altimetrica e dei movimenti verticali del suolo della Pianura Padana*. Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica. S.E.L.C.A., Firenze.
- Cerrina Feroni A., Ghiselli F., Leoni L., Martelli L., Martinelli P., Ottria G. & Sarti G. (1997) - *L'assenza delle liguridi nell'Appennino Romagnolo: relazioni con il sollevamento quaternario e implicazioni strutturali*. Il Quaternario, 10 (2), 371-376.
- Cerrina Feroni A., Leoni L., Martelli L., Martinelli P., Ottria G. & Sarti G. (2001) - *The Romagna Apennines, Italy: an eroded duplex*. Geol. J. 36 (1), 39-54.
- Cerrina Feroni A., Martelli L., Martinelli P. & Ottria G. (2002) - *Carta geologico-strutturale dell'Appennino emiliano-romagnolo in scala 1:250.000*. Regione Emilia-Romagna - C.N.R., Pisa. S.E.L.C.A., Firenze.
- CNR (1992) - *Structural Model of Italy, 1:500,000*. Prog. Fin. Geodin. S.P. 5, Quaderni de "La Ricerca Scientifica" n° 114. S.E.L.C.A., Firenze.
- Decandia F.A., Lazzarotto A. & Liotta D. (1993) - *La "Serie Ridotta" nel quadro della evoluzione geologica della Toscana meridionale*. Mem. Soc. Geol. It., 49, 181-191.
- De Rubeis V., Gasperini C., Maramai A., Murru M. & Tertulliani A. (1992) - *The uncertainty and ambiguity of isoseismal maps*. Earthquake Eng. Struct. Dyn., 21, 509-523.
- De Vivo B., Dietrich D., Guerra I., Iannaccone G., Luongo G., Scandone P., Scarpa R. & Turco P. (1979) - *Carta sismotettonica preliminare dell'Appennino meridionale*. C.N.R., Prog. Fin. Geodinamica, Pubbl. n. 166, 64 pp.
- Dondi L., Mostardini F. & Rizzini A. (1982) - *Evoluzione sedimentaria e paleogeografica nella Pianura Padana*. In: "Guida alla geologia del margine appenninico-padano" a cura di Cremonini G. & Ricci Lucchi F., Guide Geologiche Regionali, Soc. Geol. Ital., 47-58.
- Dondi L. & D'Andrea M.G. (1986) - *La Pianura Padana e Veneta dall'Oligocene superiore al Pleistocene*. Giornale di Geologia, 48, 197-225.
- Dziewonski A.M., Chou T.A. & Woodhouse J.H. (1981) - *Determination of Earthquake Source Parameters from Waveform Data for Studies of Global and Regional Seismicity*. J. Geoph. Res. 86,2825-2852.
- Elter, P., G. Giglia, M. Tongiorgi & Trevisan L. (1975) - *Tensional and compressional areas in the recent (Tortonian to present) evolution of the northern Apennines*. Boll. Geofis. Teor. Appl., 17, 3-18.
- ENEL (1981) - *Elementi di neotettonica del territorio italiano*. A cura di: AQUATER (Gruppo ENI).
- Eva C., Giglia G., Graziano F. & Merlanti F. (1978) - *Seismicity and its Relation With Surface Structures in the North-Western Apennines*. Boll. Geof. Teor. Appl. (1978), Vol. Xx, 79, 263-277.
- Eva E. & Pastore S. (1993) - *Revisione dei Meccanismi Focali dell'appennino Settentrionale*. Atti Gngts (1993), 12° Conv., Roma, 147-159.
- Eva E. & Solarino S. (1992) - *Alcune Considerazioni sulla Sismotettonica dell'Appennino Nord-Occidentale Ricavate dall'analisi dei Meccanismi Focali*. Studi Geol. Camerti (1992), Vol. Spec. 2, Append. Crop 1-1a, 75-83.
- Ferrari C. & Vianello G. (1985) - *Le salse dell'Emilia-Romagna*. Regione Emilia-Romagna, 152 pp.
- Finetti I. R., M. Boccaletti, Bonini M., Del Ben A., Geletti R., Pipan M. & Sani F. (2001). *Crustal section based on CROP seismic data across the North Tyrrhenian-Northern Apennines-Adriatic Sea*. Tectonophysics, 343, 135-163.
- Finetti I. R., Boccaletti M., Bonini M., Del Ben A., Pipan M., Prizzon A. & Sani F. (in stampa). *Chapter 8 - Lithospheric tectono-stratigraphic setting of the Ligurian Sea - Northern Apennines - Adriatic Foreland from Integrated CROP Seismic Data*. In: Finetti I. (Ed.): CROP Deep seismic exploration of the Mediterranean Region, Elsevier.
- Frepoli A. & Amato A. (1997) - *Contemporaneous extension and compression in the northern Apennines from earthquakes fault-plane solutions*. Geophysical Journal International, 129, 368-388.
- Huixin S. & Zuhuang C. (1986) - *Geochemical characteristics of underground fluids in some active faults in China*. J.Geophys. Res., 91, 12282-12290.
- Gasparini, C., Iannaccone G. & Scarpa R. (1985) - *Fault-plane solutions and seismicity of the Italian Peninsula*. Tectonophysics, 117, 59-78.

- Gasperi, G., Cremaschi, M., Mantovani Uguzzoni, M.P., Cardarelli, A., Cattani, M. & Labate D. (1987) - *Evoluzione plio-quadernaria del margine appenninico modenese e dell'antistante pianura. Note illustrative alla carta geologica*. Mem. Soc. Geol. It., 39, 375-431.
- Gasperi G., Gelati R. & Papani G. (1986) - *Neogene evolution of the Northern Apennines on the Po Valley side*. Giorn. Geol. ser. 3, 48 (1-2), 187-195.
- Gasperini P. & Vannucci G. (2003) - *FPS pack: a Package of Simple Fortran Subroutines to Manage Earthquake Focal Mechanism Data*. Computers & Geosciences, Vol 29, 7, 893-901.
- Gasperini P., F. Bernardini, G. Valensise & Boschi E. (1999) - *Defining Seismogenic Sources from Historical Earthquake Felt Reports*. Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 89, No. 1, 1999.
- Gasperini P. & Ferrari G. (2000) - *Deriving numerical estimates from descriptive information: the computation of earthquake parameters*. In: Catalogue of strong Italian earthquakes from 461 B.C. to al 1997 (Version 3 del Catalogo dei forti terremoti in Italia). Boschi E., Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Valensise G. and Gasperini P. Annali di Geofisica V. 43 n. 4., 729-746.
- Ghelardoni R. (1965) - *Osservazioni sulla tettonica trasversale dell'Appennino settentrionale*. Boll. Soc. Geol. It., 84, 276-290.
- Ghiselli F. & Martelli L. (1997) - *Evoluzione dei campi di stress lungo il margine appenninico-padano dal Pleistocene all'Attuale: analisi strutturale dei depositi pleistocenici affioranti tra Castell'Arquato (Piacenza) e Rimini*. Il Quaternario, 10 (2), 437-444.
- Gorgoni C. (2003) - *Le salse di Nirano e gli altri vulcani di fango emiliani*. Comune di Fiorano Modenese, 78 pp.
- Grünthal G. & Stromeyer D. (1992) - *The Recent Crustal Stress Field in Central Europe: Trajectories and Finite Element Modeling*. Jour. Geoph. Res. (1992), Vol. 97, N. B8, 11805-11820.
- Gruppo di Lavoro Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (1999) - *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani" (CPTI)*. ING-GNDT-SGA-SSN, Ed. Compositori, Bologna, pp. 92.
- Gruppo di Lavoro Catalogo Strumentale (2001) - *Catalogo strumentale dei terremoti Italiani dal 1981 al 1996 (CST) (Versione 1.0)*. CD-ROM, Clueb, Bologna.
- Gualtierotti A. (1998) - *Analisi strutturale di una porzione del margine pedeappenninico padano tra il Fiume Panaro e il torrente Idice*. Tesi di dottorato. Consorzio Università Ferrara, Firenze e Parma.
- Hanks T.C. & Kanamori H. (1979) - *A moment magnitude scale*. J. Geophys. Res., 84, B5, 2348-2350.
- Jiménez-Munt I., Sabadini R. & Gardi A. (2003) - *Active deformation in the Mediterranean from Gibraltar to Anatolia inferred from numerical modeling and geodetic and seismological data*. J. Geoph. Res. 108 (B1), 2006, doi:10.1029/2001JB001544.
- Keller E. A. & Pinter N. (1996) - *Active Tectonics. Earthquakes, Uplift and Landscape*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- King C. Y. (1986) - *Gas geochemistry applied to earthquake prediction: an overview*. J. Geophys. Res., 91, 12269-12281.
- Lay T. & Wallace T.C. (1995) - *Modern Global Seismology*. Academic press, 517pp.
- Marabini S., Baldi P., Benini A., Mulargia F., Vai G.B. & Valensise G. (1986) - *Strutture tettoniche da monitorare nei dintorni di S. Sofia (Appennino Forlivese)*. Atti 4° Conv. G.N.G.T.S., Roma 1985, 569-580.
- Mariucci M.T., Amato A. & Montone P. (1999) - *Recent tectonic evolution and present stress in the Northern Apennines (Italy)*. Tectonics, 18, 108-118.
- Marroni M. & Treves. B. (1998). *Hidden terranes in the Northern Apennines, Italy: a record of late Cretaceous-Oligocene transpressional tectonics*. Journ.Geol., 106, 149-162.
- Merla G. (1951) - *Geologia dell'Appennino settentrionale*. Boll. Soc. Geol. It., 70, 95-382.
- Merlo C., Boattini E. & Benvenuti G. (1988) - *Space heating plant of the Bagno di Romagna municipality (Italy): a successful case of geothermal heat utilization*. Geothermics, Vol. 17, No. 1, 237-253.
- Monachesi G. & Stucchi M. (1997) - *DOM4.1, un database di osservazioni macrosismiche di terremoti di area italiana al di sopra della soglia del danno*. GNDT, Rapporto interno, Milano-Macerata, disponibile anche sul sito <http://emidius.mi.ingv.it/DOM/>.
- Muir Wood R. & Mallard D.J. (1992) - *When is a fault "extinct"?*. Jour. Geol. Soc., London, 149, 251-255.
- Patacca E. & Scandone P. (1985) - *Struttura geologica dell'Appennino emiliano-romagnolo: ipotesi sismotettoniche*. In. Atti del Seminario "Progetto Cartografia Geologica, Bologna, 22-23 febbraio 1985, Regione Emilia-Romagna, Assessorato Programmazione e Bilancio, 102-118.
- Patacca E., Sartori R. & Scandone P. (1990) - *Tyrrhenian Basin and Apenninic arcs: kinematic relations since Late Tortonian times*. Mem. Soc. Geol. It., 45, 425-451.
- Pellegrini M. & Vezzani L. (1978) - *Faglie attive in superficie nella Pianura Padana presso Correggio (Reggio Emilia) e Massa Finalese (Modena)*. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 1, 141-149.
- Pieri M. & Groppi G. (1981) - *Subsurface geological structure of the Po Plain (Italy)*. C.N.R., Prog. Fin. Geodinamica, Pubbl. n. 414, 1-13.
- Plesi G., Chicchi S., Daniele G. & Palandri S. (2000) - *La struttura dell'alto Appennino reggiano-parmense fra Valditacca, il Passo di Pradarena e il M. Ventasso*. Boll. Soc. Geol. It., 119, 267-296.
- Pondrelli S., Morelli A., Ekstrom G., Mazza S., Boschi E. & Dziewonski A.M. (2002) - *European-Mediterranean Regional Centroid Moment Tensors Catalog: 1997-2000*. Phys. Earth Planet. Int., 130, 71-101.
- RER & CNR (1982) - *Caratteri geoidrologici e geotermici dell'Emilia-Romagna*. Regione Emilia-Romagna - Consiglio Nazionale delle Ricerche, Prog. Fin. Energetica, sottoprog. Energia Termica. Pitagora Editrice, Bologna, 177 pp.
- RER (1999a) - *Carta geologica di pianura dell'Emilia-Romagna*. A cura di D. Preti. Regione Emilia-Romagna, Servizio Cartografico e Geologico. S.EL.CA., Firenze.
- RER (1999b) - *I numeri delle frane*. A cura di Garberi M.L., Palumbo A. & Pizziolo M., Regione Emilia-Romagna, Servizio Cartografico e Geologico. S.EL.CA., Firenze, 94 pp.
- RER & ENI - Agip (1998) - *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*. A cura di G.M. Di Dio. Regione Emilia-Romagna - ENI divisione Agip. S.EL.CA., Firenze, 120 pp.
- Ricci Lucchi F., Colalongo M.L., Cremonini G., Gasperi G., Iaccarino S., Papani G., Raffi I. & Rio D. (1982) - *Evoluzione sedimentaria e paleogeografica del margine appenninico*. In: "Guida alla geologia del margine appenninico-padano" a cura di Cremonini G. & Ricci Lucchi F., Guide Geologiche Regionali, Soc. Geol. Ital., 17-46.
- Rizzini F. (2001) - *Il fronte sepolto del Pedeappennino parmense nell'area compresa tra il T. Enza e d il T. Baganza: caratteri*

- stratigrafici e strutturali nell'intervallo Messiniano-Pleistocene*. Tesi inedita, Università di Parma, 134 pp.
- Rock N. M. S. (1988) - *Numerical Geology*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 427 pp.
- Sarti G., Preti D. & Severi P. (1997) - *Stratigrafia dei terrazzi intra vallivi dei fiumi Savio, Bidente, Montone, Lamone, Senio e Santerno (margine romagnolo della catena appenninica): dati preliminari*. In: GEOITALIA, 1° Forum FIST, Riassunti, Fascicolo 2, 261-263.
- Selvaggi G. & Amato A. (1992) - *Subcrustal earthquakes in the Northern Apennines (Italy): evidence for a still active Subduction?* Geophysical Research Letters, 19, 2127-2130.
- Selvaggi G., Ferulano F., Di Bona M., Frepoli A., Azzara R., Basili A., Chiarabba C., Ciaccio M.G., Di Luccio F., Lucente F.P., Margheriti L. & Nostro C. (2001) - *The Mw = 5.4 Reggio Emilia 1996 earthquake: Active compressional tectonics in the Po Plain, Italy*. Geophysical Journal International, 144, 1-13.
- Shebalin N.V. (1973) - *Macroseismic data as information on source parameters of large earthquakes*. Phys. Earth Planet. Interiors, 6, 316-323.
- Sieberg A. (1932) - *Erdebeben*. Handbuch der Geophysik, Vol. 4, Tab 102, 552-554.
- Simoni A., Elmi C. & Ricotti V. (2003). *Late Quaternary uplift and valley evolution in the Northern Apennines: Lamone catchment*. Quaternary International, 101-102, 253-267.
- Slejko D., Carulli G.B., Carraro F., Castaldini D., Cavallin A., Doglioni C., Illiceto V., Nicolich R., Rebez A., Semenza E., Zanferrari A. & Zanolta C. (1987) - *Modello sismotettonico dell'Italia nord-orientale*. CNR - Consiglio Nazionale delle Ricerche, Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Rend. 1, Trieste, 82 pp.
- Tapponnier P. (1977) - *Evolution tectonique du système alpin en Méditerranée: poinçonnement et écrasement rigide-plastique*. Bull. Soc. Géol. France, 19, 3, 437-460.
- Ten Haaf E. (1985) - *A structural review of the Bolognese Apennines (with two field trip itineraries)*. Giornale di Geologia, ser. 3, 47/1-2, 35-45.
- U.S. Environmental Protection Agency (1981) - *Standards applicable to owners and operators of hazardous waste treatment storage and disposal facilities*. Code of Federal Regulations, Title 40, parts 122.25 (1) and 264.18 (a).
- U.S. Nuclear Regulatory Commission (1982) - *Appendix A Seismic and geologic criteria for nuclear power plants*. Code of Federal Regulations- Energy, Title 10, Chapter 1, Part 100.
- Vai G.B. (1988) - *The Lamone Valley; a field trip guide to the Romagna Apennines*. In: *Fossil vertebrates in the Lamone Valley, Romagna Apennines*. F.T. Guidebook International Workshop: Continental faunas at the Mio-Pliocene boundary, DE GIULI C. & VAI G.B. (eds). Faenza: march 1988, 70-76
- Vannucci G. & Gasperini P. (2003) - *A Database of Revised Fault Plane Solutions for Italy and Surrounding Regions*. Computers & Geosciences, Vol. 29, 7, 903-909.
- Wallace R. E. (1978) - *Geometry and rates of change of Fault-generated Range Fronts, North-central Nevada*. Journ. Research U.S. Geol. Survey, 6 (5), 637-650.
- Wallace R. E. (ed.) (1986) - *Active Tectonics*. National Academy Press. Washington, D.C.
- Wells S.G., Bullard T.F., Menges C.M., Drake P.G., Karas P.A., Nelson K.I., Ritter J.B. & Wesling J.R. (1988) - *Regional variations in tectonic geomorphology along a segmented convergent plate boundary, Pacific coast of Costa Rica*. Geomorphology, 1, 239-265.
- Wells D.L. & Coppersmith K.J. (1994) - *New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement*. Bull. Seism. Soc. Am., 84, 974-1002.
- Wessel P. & Smith W.H.F. (1991) - *Free software helps map and display data*. Eos Transactions of the AGU, 72, 441. GMT - The Generic Mapping Tools.
- Woodcock N. H. & Fischer M. (1986) - *Strike-slip duplexes*. J. Struct. Geol., 7, 725-735.
- Zecchi R. (1980) - *Guida per la realizzazione di una carta sismotettonica e del rischio sismico*. Regione Emilia-Romagna. Collana di orientamenti geomorfologici ed agronomico-forestali. Pitagora Editrice, Bologna, 119 pp.



Finito di stampare  
nel mese di Luglio 2004  
dalla  **S.E.L.C.A.** srl - Firenze