



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI SCIENZE MM. FF. NN.

Dipartimento di Geoscienze

TESI DI LAUREA TRIENNALE  
IN  
GEOLOGIA

**LA SEQUENZA SISMICA EMILIANA NEL  
CONTESTO DELLA SISMICITA'  
ITALIANA**

*Relatore: Prof. Alessandro Caporali*

*Laureando: Silvia Tessari*

ANNO ACCADEMICO 2012 / 2013



# Indice

|                                                                                         |       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Introduzione.....                                                                       | pg.4  |
| 1. Pericolosità sismica in Italia                                                       |       |
| 1.1 Sismicità nazionale e mappa di pericolosità sismica .....                           | pg.6  |
| 1.2 Eventi sismici rilevanti negli ultimi cinquant'anni.....                            | pg.9  |
| 2. Sequenza sismica emiliana nel 2012                                                   |       |
| 2.1 Gli eventi sismici principali.....                                                  | pg.16 |
| 2.2 Sismicità storica nell'area emiliana: il terremoto del 1570.....                    | pg.18 |
| 2.3 Sorgenti sismogenetiche ed origini geologiche della<br>Pianura Padana emiliana..... | pg.21 |
| 2.4 La liquefazione come fenomeno cosismico.....                                        | pg.26 |
| 2.5 Analisi e modellazione post-sismica mediante dati GPS<br>e dati SAR.....            | pg.30 |
| 3. Conclusioni.....                                                                     | pg.40 |
| 4. Bibliografia.....                                                                    | pg.42 |



# Introduzione

L'elaborato tratterà l'argomento della sismicità nazionale italiana confrontandolo con la mappa di pericolosità sismica e con gli eventi sismici di maggior spicco degli ultimi cinquant'anni.

Particolare attenzione verrà data alla sequenza sismica emiliana e alle sue scosse principali, avvenute nel 20 e 29 maggio 2012, rispettivamente con magnitudo locale di 5,9 (epicentro a Finale Emilia e ipocentro a 6,3 km di profondità) e 5,8 (epicentro nella zona di Medolla e Cavezzo e ipocentro a 9,6 km di profondità).

Queste scosse verranno esaminate nel loro contesto geologico e geofisico, analizzando in un primo momento la sismicità storica della zona emiliana attraverso il terremoto del 1570, poi le cause del recente sisma e le conseguenze che ha avuto sul territorio. In questo contesto verranno discussi problemi quali la liquefazione, come evento cosismico di entrambi i terremoti, e successivamente di sorgenti sismogenetiche, responsabili del sisma e della deviazione di fiumi quali il Po, il Secchia e il Reno.

In ultima, verranno valutati gli ultimi metodi di analisi e modellazione di terreno post-sismica mediante l'utilizzo dei dati GPS e dati SAR.



# 1. Pericolosità sismica in Italia

## ***1.1. Sismicità nazionale e mappa di pericolosità sismica***

La pericolosità sismica di un territorio è rappresentata dalla frequenza e dalla forza dei terremoti che lo interessano, ovvero dalla sua sismicità; viene anche definita come la probabilità che in una determinata area, in un certo intervallo di tempo, si possa verificare un evento sismico che superi una specifica intensità ( data dagli effetti locali e potenziali in base ai danni prodotti da un terremoto sulla superficie della terra ), una magnitudo ( valore dell'energia rilasciata dal terremoto ) o una accelerazione di picco ( "*Peak Ground Acceleration*", ossia la massima accelerazione del suolo indotta dall'evento ).

I primi passi verso una definizione di "pericolosità sismica" sono stati fatti grazie ad una lunga e antica tradizione scritta, spesso conservata negli archivi parrocchiali o in altri documenti quali diari o atti pubblici, fornendo così la più vasta conoscenza della sismicità italiana degli ultimi 2500 anni. Questi documenti ci hanno lasciato molte informazioni sugli effetti che nel passato i terremoti hanno avuto in una determinata area geografica della nostra penisola. Per ciascuna area è stato conteggiato il numero di eventi sismici e, grazie alla descrizione degli effetti che hanno avuto sul territorio, tenendo conto anche dei materiali di costruzione delle unità abitative e di altre variabili ingegneristiche, è stato possibile attribuire a ciascun evento una specifica intensità. Procedendo in tal maniera si è potuta ottenere una prima definizione di pericolosità sismica nazionale.

Con lo sviluppo delle scienze sismologiche, nel XIX secolo, furono pubblicate le prime ricerche sulle cause e sulla distribuzione geografica dei terremoti, tentando di spiegarne le conseguenze, ma è solo nel XX secolo che si avrà una caratterizzazione sismica del territorio grazie alla diffusione degli strumenti sismici e delle reti di monitoraggio ( RAN – Rete accelerometrica nazionale ).

Gli studi di pericolosità sismica sono stati impiegati in questi ultimi anni per finalizzare le analisi territoriali regionali a *zonazioni* ( pericolosità di base per la classificazione sismica ) oppure a *microzonazioni* ( pericolosità locale). In quest'ultimo caso valutare la pericolosità sismica significa individuare aree a scala comunale che possono essere soggette a fenomeni di amplificazione, fornendo così

informazioni utili per la pianificazione urbana, per il restauro di edifici già esistenti, per analisi di sito o per la localizzazione di zone sicure in cui costruire opere quali centrali elettriche, ospedali o basi militari.

Negli ultimi 2500 anni l'Italia è stata interessata da più di 30000 eventi sismici di media a forte intensità (cioè superiore al IV – V grado della scala Mercalli), dei quali circa 560 di intensità uguale o superiore all'VIII grado. Solo nel XX secolo, 7 terremoti hanno avuto magnitudo uguale o superiore al 6.5 (con effetti classificabili tra il X e XI grado Mercalli). L'Italia è dunque un paese ad alta sismicità che comprende aree in cui avvengono frequentemente terremoti a bassa energia e aree con eventi molto più sporadici, ma di forte intensità.

La sismicità più elevata si concentra nella parte centro meridionale della penisola, lungo la dorsale appenninica interessata da alcuni tra gli eventi più forti e distruttivi che la memoria storica ricordi. Fra i più recenti ricordiamo in particolare il terremoto dell'Irpinia del 23 Novembre 1980 di magnitudo locale 6.5 (scala Richter).

La valutazione della pericolosità sismica può essere o di tipo deterministico oppure probabilistico. Il metodo deterministico si basa sullo studio dei danni osservati in occasione di eventi sismici in un dato sito, ricostruendo gli scenari di danno, per poterne stabilire in seguito la frequenza con cui si sono ripetute le scosse di uguale intensità. Questo metodo però è meno utilizzato rispetto a quello probabilistico (che è largamente più apprezzato nelle analisi), perché richiede molta disponibilità di informazioni sulla sismicità locale e sulle ripercussioni che questa ha sul territorio.

La pericolosità sismica, intesa invece in senso probabilistico, è lo scuotimento del suolo atteso in un dato sito con una certa probabilità di eccedenza in un dato intervallo di tempo, ovvero la probabilità che un certo valore di scuotimento si verifichi in un dato intervallo di tempo (di solito nelle mappe di pericolosità si usa un'eccedenza del 10 % in 50 anni).

Questo tipo di stima si basa sulla definizione di una serie di elementi di input (quali catalogo dei terremoti, zone sorgente, relazione di attenuazione del moto del suolo, ecc.) e dei parametri di riferimento (per esempio: scuotimento in accelerazione o spostamento, tipo di suolo, finestra temporale, ecc.).



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

## Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale

(riferimento: Ordinanza PCM del 28 aprile 2006 n.3519, All.1b)

espressa in termini di accelerazione massima del suolo  
con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni

riferita a suoli rigidi ( $V_{s30} > 800$  m/s; cat.A, punto 3.2.1 del D.M. 14.09.2005)

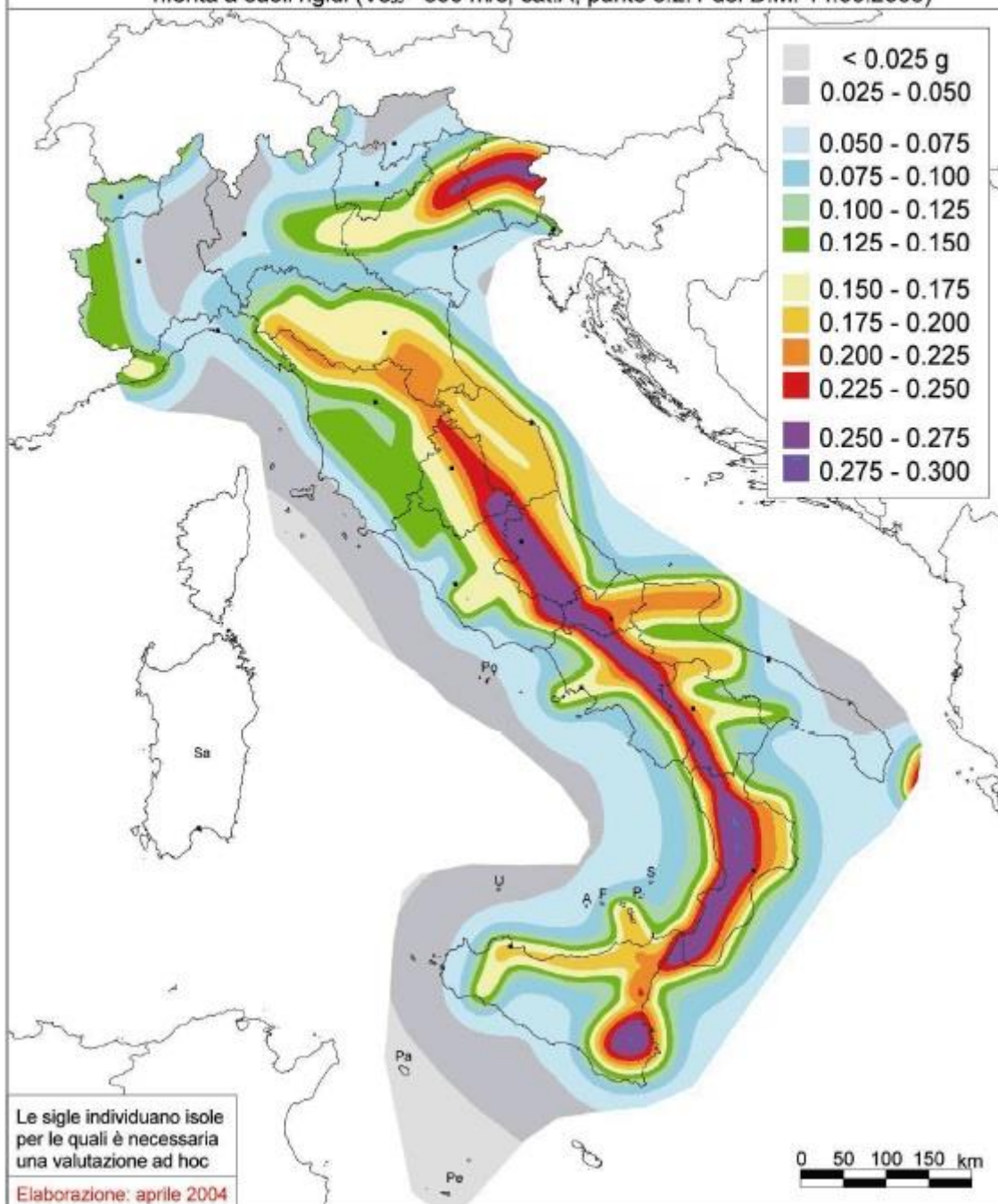


Figura 1.1: Mappa di Pericolosità Sismica 2004 (MPS04) : descrive la pericolosità sismica attraverso il parametro dell'accelerazione massima attesa con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni su suolo rigido e pianeggiante.

Secondo il provvedimento legislativo del 2003, i comuni italiani sono stati classificati in 4 categorie principali, in base al loro rischio sismico, calcolato in base al PGA ( Peak Ground Acceleration ), per frequenza ed intensità degli eventi. La classificazione dei comuni è in continuo aggiornamento man mano che vengono effettuati nuovi studi in un determinato territorio. La nostra penisola è dunque suddivisa in 4 zone sismiche principali:

- ✓ Zona 1: sismicità alta, PGA oltre 0,25g. Comprende 708 comuni;
- ✓ Zona 2: sismicità media, PGA fra 0,15 e 0,25g. Comprende 2.345 comuni (in Toscana alcuni comuni ricadono nella zona 3S che ha lo stesso obbligo di azione sismica della zona 2);
- ✓ Zona 3: sismicità bassa, PGA fra 0,05 e 0,15g Comprende 1.560 comuni.
- ✓ Zona 4: sismicità molto bassa, PGA inferiore a 0,05g. Comprende 3.488 comuni.

Tra esse la zona 1 è quella di pericolosità più elevata, potendosi verificare eventi molto forti, anche di tipo catastrofico. A rischio risulta anche la zona 2 (e zona 3S della Toscana), dove gli eventi sismici, seppur di intensità minore, possono creare gravissimi danni. La zona 3 è caratterizzata da una bassa sismicità, che però in particolari contesti geologici può vedere amplificati i propri effetti. Infine, la zona 4 è quella che nell'intero territorio nazionale presenta il minor rischio sismico, essendo possibili sporadiche scosse che possono creare danni con bassissima probabilità.

## ***1.2. Eventi sismici rilevanti negli ultimi cinquant'anni***

Di seguito è riportata una tabella che elenca tutti i terremoti con magnitudo momento maggiore a 5.5 avvenuti negli ultimi 50 anni circa. Questo catalogo descrive alcuni effetti conseguenti ciascun sisma e vuole dimostrare la forte sismicità della nostra penisola.

|            |         |     |                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------|---------|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 21.08.1962 | IRPINIA | 6.2 | Un ampio settore dell'Appennino campano, comprendente il Sannio e l'Irpinia, fu colpito da due violente scosse di terremoto, separate da un intervallo di circa dieci minuti. Le scosse causarono un grave disastro e misero in |
|------------|---------|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|            |                     |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------|---------------------|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|            |                     |     | ginocchio decine di comuni nelle province di Benevento ed Avellino. Una ventina furono i morti accertati ed oltre 16.000 i senzatetto.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 15.01.1968 | VALLE DEL<br>BELICE | 6.1 | Avvenne nella notte tra il 14 e il 15 gennaio 1968 e colpì una vasta area della Sicilia occidentale compresa tra la provincia di Agrigento, quella di Trapani e quella di Palermo Sisma inizialmente sottovalutato, provocando un ritardo dei soccorsi in una zona ritenuta “non sismica”. Effetti delle scosse sono stati amplificati dalla pessima qualità edile dei fabbricati. Ricostruzione poco efficiente, bloccata a lungo da burocrazia e politica. Alcuni paesi ricostruiti altrove, in una sorta di “laboratorio architettonico”. Quasi 400 morti, 70mila senzatetto. |
| 06.05.1976 | FRIULI              | 6.4 | Evento avvenuto intorno alle ore 21. Ancora scientificamente discussa l’esatta sede dell’epicentro, dal punto di vista macrosismico situata tra Gemona ed Artegia, completamente distrutti. Sisma devastante che travolge un’intera regione, in particolare l’area a nord di Udine. Una settantina i comuni colpiti, 45 dei quali “rasi al suolo” secondo la definizione ufficiale. Gravi danni anche in Slovenia orientale. Segue una lunga sequenza sismica.                                                                                                                   |
| 15.09.1976 | FRIULI              | 5.9 | Epicentro ad est di Osoppo. Scossa appartenente alla sequenza sismica del precedente evento sismico. Gli edifici che si erano salvati dal precedente terremoto crollano definitivamente. Particolarmente                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

|            |                |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|------------|----------------|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|            |                |     | colpiti Trasaghis, Osoppo, Gemona, Buja, Venzone. Il conto definitivo delle vittime consta di 989 persone, 45mila i senzatetto.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 15.04.1978 | GOLFO DI PATTI | 6.1 | Epicentro nel golfo di Patti. Scossa poco prima della mezzanotte. Danni ingenti a Patti dove crollano 70 edifici, diversi feriti ma nessuna vittima: la ricostruzione porta al progressivo abbandono del centro storico. Danni anche a Vulcano e lesioni nella costa settentrionale siciliana fino a Milazzo: Barcellona Pozzo di Gotto, Castoreale, Ficarra.                                                                                                                                                 |
| 19.09.1979 | VAL NERINA     | 5.9 | Epicentro nei pressi di Colmotino (comune di Perugia). Sisma avvenuto poco prima della mezzanotte. Crolli e danni a Norcia, Cascia e zone limitrofe, soprattutto nelle abitazioni più antiche. Tra i paesi più colpiti Chiavano, Atri, Civita, Trimezzo. Lesioni anche nell'area dei Monti Sibillini. Il sisma ha provocato la morte di 5 persone.                                                                                                                                                            |
| 23.11.1980 | IRPINIA        | 6.9 | Colpì la Campania centrale e la Basilicata centro-settentrionale. Caratterizzato da una magnitudo del momento sismico di circa 6.9 gradi con epicentro tra i comuni di Teora, Castelnuovo di Conza, e Conza della Campania, causò circa 280.000 sfollati, 8.848 feriti e 2.914 morti. Coinvolse 5 milioni di persone. Strade e ferrovie bloccate, l'Italia divisa in due. Gravi ritardi nei soccorsi per sottovalutazione dell'evento. Scandalo della ricostruzione con gravi speculazioni ("Terremotopoli"). |

|            |                    |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------|--------------------|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 07.05.1984 | ABRUZZO            | 5.9 | <p>La zona più colpita risulta essere quella compresa fra Sora ed il Parco nazionale d'Abruzzo, Lazio e Molise, in particolare la Marsica, già conosciuta per un terribile terremoto accaduto 70 anni prima. I comuni interessati dal terremoto sono stati più di 70, di cui 9 danneggiati gravemente. I danni maggiori sono stati soprattutto nell'Italia centrale, in particolare in Abruzzo, Molise (soprattutto in provincia di Isernia) e in Lazio, ma gravi danni si sono registrati anche a Caserta e in provincia. Panico anche a Napoli, ma qui con pochi danni. In alcuni comuni furono comunque allestite delle tendopoli. Il bilancio di questa prima scossa è stata di 3 morti (indiretti) e di 83 feriti. L'11 maggio un'altra scossa importante provoca ulteriori danni. In tutto gli sfollati furono più di 6mila.</p> |
| 05.05.1990 | BASILICATA         | 5.8 | <p>Colpita l'area a cavallo di Campania e Basilicata. Avvertito da Benevento a Matera. Sciame sismico durato mesi. In tutto sono stati contati 2 morti causati dal sisma.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 13.12.1990 | AUGUSTA            | 5.7 | <p>Sisma notturno. Definito il "terremoto dei silenzi" perché spesso dimenticato dai media. Colpiti Augusta, Lentini, Carlentini, Melilli e Militello. 17 i morti, 10mila i senzatetto. Segue uno tsunami che invade il viale a mare ed il porto di Augusta, con danni comunque limitati.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 26.09.1997 | UMBRIA –<br>MARCHE | 6.0 | <p>Epicentro nei pressi di Colfiorito. Colpite Umbria e Marche. Sciame sismico iniziato a maggio e proseguito per un anno. Prima</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

|            |                        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------|------------------------|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|            |                        |     | <p>scossa notturna, la più forte alle 11.42. Danni maggiori a Foligno (dove crolla il campanile della cattedrale in seguito ad altra scossa), Nocera Umbra (85% degli edifici inagibili e crollo della famosa torre cittadina) e paesi limitrofi. Ad Assisi crolla la volta della basilica superiore, uccidendo 4 persone che stavano eseguendo un sopralluogo. Le vittime sono state 11, mentre i senzatetto furono 32mila.</p> |
| 09.09.1998 | POLLINO                | 5.7 | <p>Epicentro nei pressi di Castelluccio Superiore. Crolli e lesioni in tutti i paesi attorno al massiccio del Pollino, al confine tra Basilicata e Calabria. Due vittime.</p>                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 06.09.2002 | PALERMO                | 5.8 | <p>Scossa principale notturna. Epicentro in mare, a circa 35 km NE di Palermo. Interessata la Sicilia settentrionale. A Palermo lesioni nel centro storico, lievi danni anche a Ficarazzi.</p>                                                                                                                                                                                                                                   |
| 31.10.2002 | MOLISE                 | 5.8 | <p>Epicentro nei pressi di Bonefro. Danni principali a S. Giuliano dove nel crollo di una scuola muoiono 27 bambini ed una maestra. Lesioni anche nella provincia di Foggia. Sono state 30 le vittime totali e 5mila i senzatetto.</p>                                                                                                                                                                                           |
| 26.10.2006 | TIRRENO<br>MERIDIONALE | 5.6 | <p>Epicentro nel Mar Tirreno, a largo di Stromboli. Sisma avvertito fino in Puglia, nessun danno di grave entità.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 06.04.2009 | L'AQUILA               | 6.3 | <p>Epicentro prossimo alla frazione Collefracido del comune di L'Aquila. Lunga sequenza sismica, evento principale notturno, alle 03.32. Colpita l'intera provincia di L'Aquila il cui centro storico è stato completamente evacuato. Gravissimi danni a L'Aquila e nel suo circondario, in particolare nella valle</p>                                                                                                          |

|            |        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------|--------|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|            |        |     | dell'Aterno. Avvertito anche a Roma, con lievi lesioni. Ha provocato 308 morti e almeno 50mila senzatetto. Evento scientificamente considerato "gemello" del sisma del 1461.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 20.05.2012 | EMILIA | 5.9 | Sisma notturno, alle 4.03. Ipocentro a circa 6.3 km di profondità. Epicentro nei pressi di Finale Emilia che subisce numerosi crolli e gravi lesioni. Ingenti danni anche a S. Felice sul Panaro (in particolare nel centro storico) e Mirandola. Crollati chiese e capannoni industriali. La zona più interessata è tra le province di Modena e Ferrara. 7 morti. Avvertito in tutto il nord Italia                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 29.05.2012 | EMILIA | 5.7 | Epicentro nei pressi di Medolla, geograficamente più ad ovest del precedente. Evento accaduto alle 9.00. Ipocentro a circa 9 km di profondità. Nuovi danni nelle aree già colpite il 20/05 (Mirandola, S. Felice) ma soprattutto in altri centri: Medolla (crollo di capannoni industriali), Cavezzo (75% degli edifici lesionati), S. Prospero, Novi di Modena (dove il 03/06 crolla la torre dell'orologio). Sono state 19 le vittime, in particolare tra i lavoratori di alcune aziende industriali. Circa 15mila i senzatetto causati dallo sciame sismico. Rilevanti fenomeni di liquefazione del terreno oltre a fagliazione superficiale. Secondo la classificazione ufficiale, l'area interessata dalle scosse ricadeva in "zona sismica 3" soggetta a "scuotimenti modesti". |



## 2. Sequenza sismica emiliana nel 2012

### 2.1. Gli eventi sismici principali

La sequenza sismica che ha interessato l'Emilia nel maggio-giugno 2012 ha avuto un rilevante impatto sociale, culturale ed economico.

Gli eventi sismici hanno causato numerose vittime, feriti ed importanti danni sia nei centri storici che nelle aree rurali e industriali.

La sequenza sismica è stata caratterizzata da due scosse principali ( il 20 e il 29 maggio ), di magnitudo Richter (  $M_l$  ) 5.9 e 5.8, e da 5 terremoti di magnitudo superiore a  $M_l$  5.0, oltre a migliaia di eventi minori che continuano ancora oggi. Le stime della magnitudo (  $M_l$  e  $M_w$  ) per i terremoti più forti della sequenza sono riportate nella tabella qui sotto, dove si vede che al variare del metodo e dei dati usati si possono ottenere stime che variano di circa 0.3 per la  $M_w$  ( magnitudo momento ).

| Data       | $M_l$ | $M_w$   |
|------------|-------|---------|
| 20.05.2012 | 5.9   | 5.9-6.1 |
| 29.05.2012 | 5.8   | 5.7-6.0 |

La sismicità si distribuisce lungo un'area allungata per circa 40 km in direzione est-ovest. I terremoti più forti della sequenza sono dovuti a un fenomeno di compressione attiva in direzione nord-sud ( figura 2.2 ), legato alla spinta dell'Appennino settentrionale verso nord, al di sopra della placca adriatica. L'estensione della zona attiva, confrontata con la magnitudo degli eventi principali, suggerisce che ad essersi attivato sia un sistema di faglie complesso, e non una singola faglia.

Subito dopo la scossa del 20 maggio, i ricercatori e tecnici dell'INGV, in collaborazione con molti altri ( istituti e università ), hanno effettuato rilievi geologici, macrosismici, geochimici, collocato stazioni supplementari sismiche e GPS per misurare in dettaglio la sismicità, le deformazioni del suolo e gli impatti ambientali.

## SEQUENZA Pianura Padana Emiliana

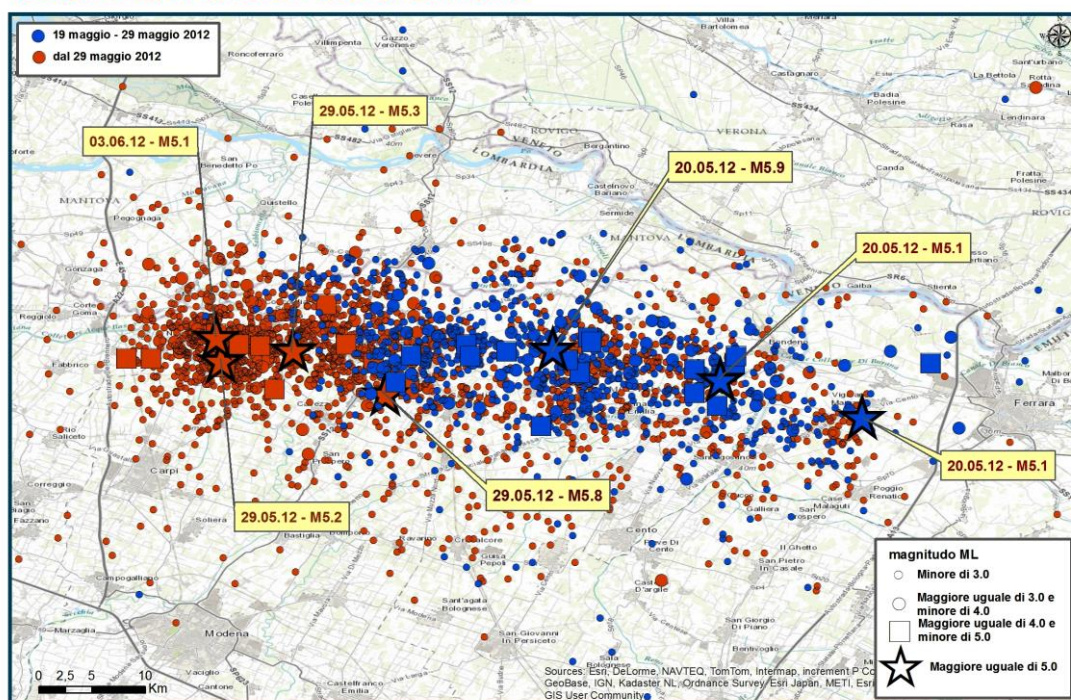


Figura 2.1: In figura si possono notare i numerosi eventi sismici scatenatisi dal 20 maggio 2012; questi hanno caratterizzato, e ancora caratterizzano, la sequenza sismica dell'Emilia.

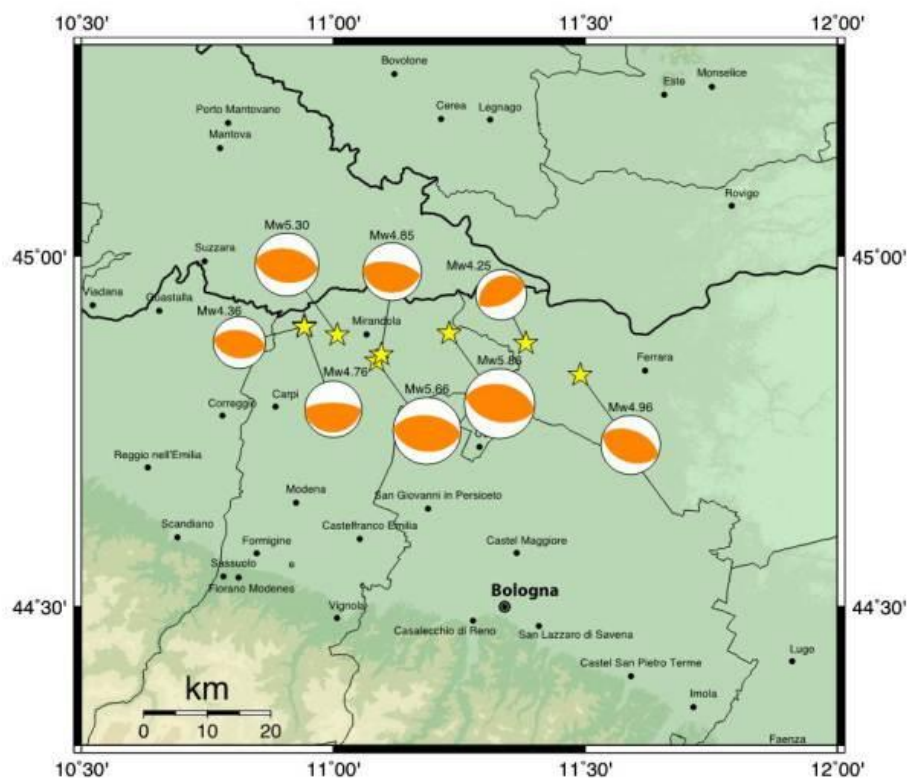


Figura 2.2: Attraverso meccanismi focali vengono illustrate tutte le soluzioni coerenti dei principali eventi della sequenza sismica, espressi in Mw; i terremoti sono avvenuti su piani di faglia orientati all'incirca Est-Ovest e con movimento compressivo in senso Nord-Sud.

Tra le località maggiormente danneggiate, dove è stato riscontrato danno diffuso da moderato a grave, si segnalano: Alberone, Camurano (Medolla), Canaletto, Finale Emilia, Galeazza, Mirandola, San Felice sul Panaro, San Carlo. In queste località la scossa è stata avvertita da tutta la popolazione che è fuggita all'aperto, e si è riscontrata la caduta diffusa di oggetti all'interno delle abitazioni. Nei centri storici gli edifici più vulnerabili e quelli monumentali hanno subito importanti cedimenti e crolli parziali o totali. Molto frequente è la rottura e/o la caduta di camini dai tetti nell'edilizia residenziale. Gli edifici di recente costruzione non ha riportato danni o soltanto qualche lieve lesione. Diversi edifici industriali hanno subito crolli parziali o totali e molte case rurali in abbandono nelle campagne sono crollate parzialmente o totalmente.

## ***2.2. Sismicità storica nell'area emiliana: il terremoto del 1570***

In quest'area, nel passato, sono avvenuti diversi terremoti storici: il più importante è l'evento del 1570 nell'area di Finale Emilia-Bondeno (chiamato terremoto di Ferrara) di magnitudo stimata 5.5. Consultando il "Catalogo Parametrico dei Terremoti in Italia" ( <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI11/> ), si nota che altri eventi di magnitudo simile sono stati risentiti a Ferrara ( negli anni 1234, 1285, 1346, 1411, 1796) e nelle aree di Finale Emilia-Bondeno ( il già citato evento del 1570, nel 1908 e nel 1986). Recentemente è stato individuato un altro evento sismico accaduto nel 1639 a Finale Emilia di intensità pari al VII-VIII grado MCS.

La storia sismica di Ferrara ( raffigurata nelle figure 2.3 e 2.4 ) mostra numerosi eventi sismici di intensità MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg) pari o superiori al VI grado, ma mai superiori all'VIII.

L'area interessata dalla sequenza è caratterizzata da una sismicità storica relativamente moderata, confrontabile con quella di altri settori della pianura padana (ad esempio l'area fra Reggiano e Parmense, che negli ultimi anni ha avuto terremoti relativamente frequenti di magnitudo compresa fra 4.5 e 5.5), ma inferiore ad alcuni settori dell'appennino romagnolo, del versante toscano dell'Appennino tosco-emiliano, e decisamente inferiore alle caratteristiche di sismicità dell'Appennino centrale e Meridionale, della Calabria, della Sicilia Orientale e dell'Italia Nord-orientale.

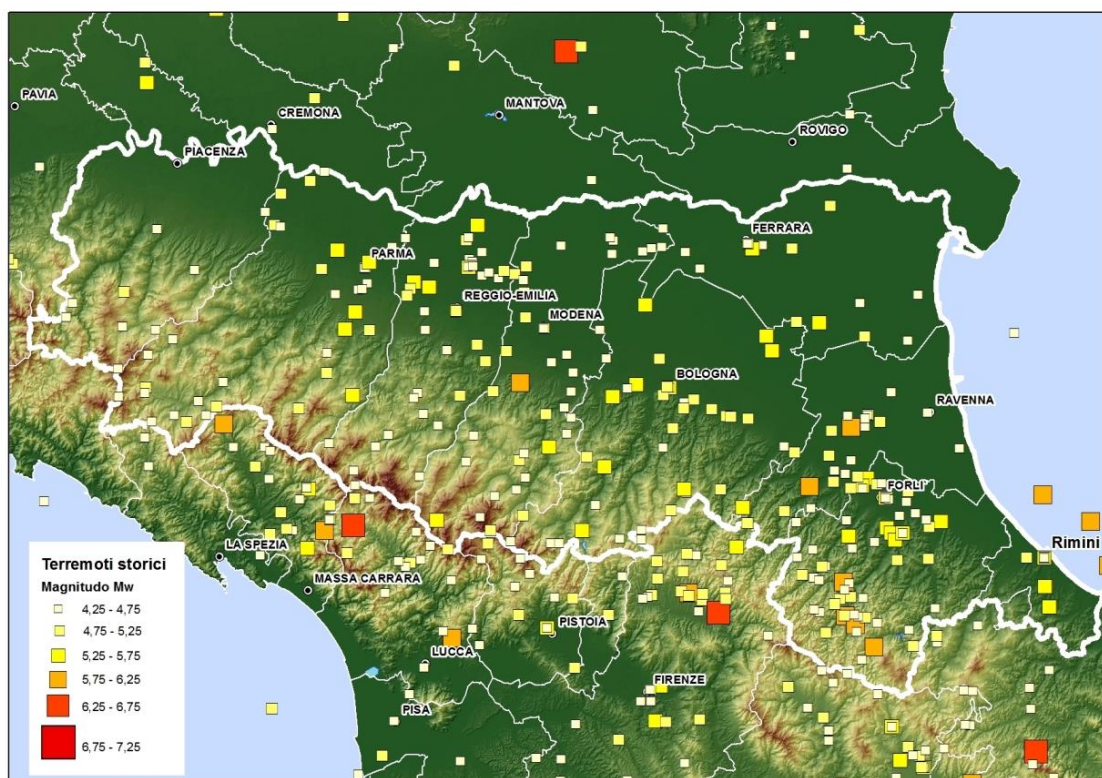


Figura 2.3: Distribuzione della sismicità storica negli ultimi mille anni (tratta dal “Catalogo Parametrico dei Terremoti in Italia” ).

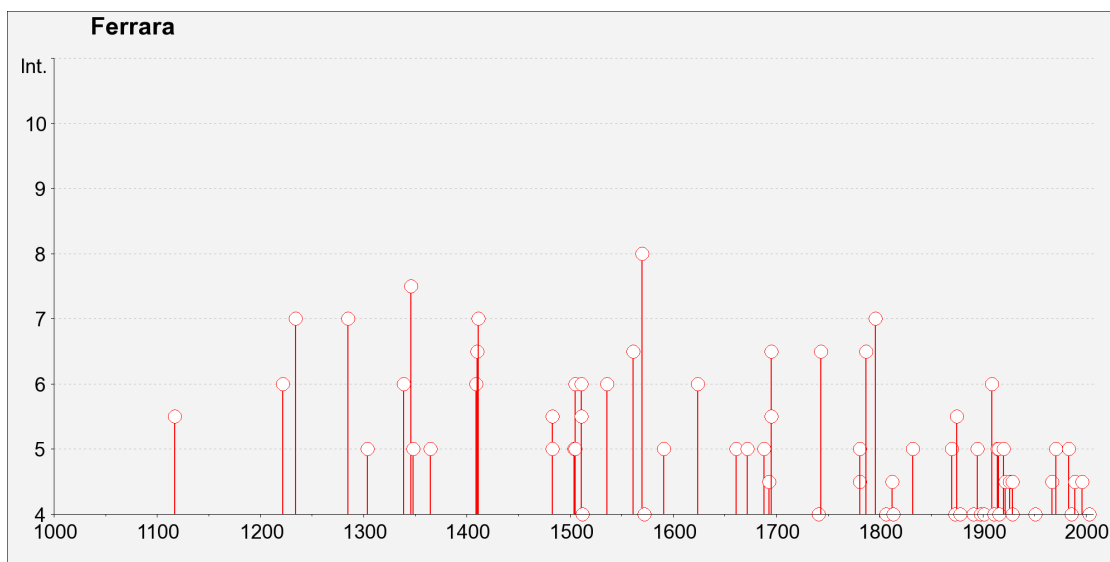


Figura 2.4: Storia sismica osservata a Ferrara. Nella scala MCS il grado 6 classifica l’inizio del danneggiamento leggero, ma diffuso ( Database macrosismico italiano DBMI11 )

Il terremoto di Ferrara del 1570 è stato un evento sismico localizzato nel ducato di Ferrara, sviluppatosi dal 17 novembre 1570 con una magnitudo locale di 5.5. Lo sciame sismico si protrasse sino al 1574, con il verificarsi di circa duemila scosse, concentrate per la maggior parte nei primi tre mesi dal sisma, sino al gennaio 1571.

Il sisma provocò ingenti danni alla già precaria situazione economica del ducato, aumentando il numero di persone indigenti. Si ritiene che circa il 40% degli edifici subirono dei danni, che vennero stimati in circa trecento mila scudi.

Secondo i molti scritti dell'epoca tutto iniziò con la percezioni di forti rombi. Poi arrivò la neve. Infine il terremoto che aprì delle crepe nel terreno da dove furono visti uscire dei fumi neri. Ma durante le scosse maggiori sono ricordati l'oscuramento del cielo e il passaggio di una cometa; sono menzionati dei disturbi nell'atmosfera, cielo rosso infuocato e bagliori nel cielo.

Il terremoto ha causato il primo episodio documentato di liquefazione del suolo nella Pianura padana, nell'area urbana di Ferrara e nelle immediate vicinanze, con l'apertura di fessure al suolo e la fuoriuscita di "una schiuma nera".

Si narra che presso Stellata il Po subì un temporaneo arresto del flusso delle acque; il loro innalzamento e il successivo rapido abbassamento causarono danni ai mulini.

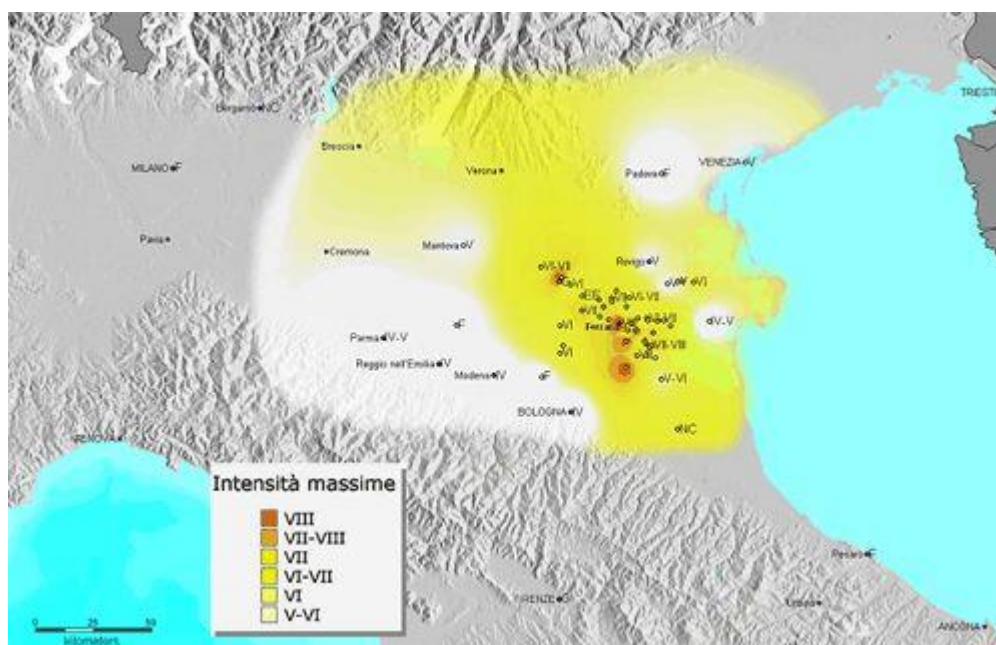


Figura 2.5: Mappatura delle intensità sismiche stimate durante il sisma di Ferrara del 1570. Le intensità sono state date in scala MCS.

### ***2.3. Sorgenti sismogenetiche ed origini geologiche della Pianura Padana Emiliana***

Per comprendere le origini geologiche della crisi sismica che ha interessato la bassa pianura del Modenese e del Ferrarese bisogna rifarsi non a quello che si vede in superficie, ma alle caratteristiche geologiche, rocce e grandi strutture tettoniche (pieghe e faglie), presenti in profondità nel suo sottosuolo. Queste rocce e strutture tettoniche non sono visibili direttamente perché mascherate dalla presenza di sedimenti terrigeni Plio-Pleistocenici (ghiaie, sabbie, limi, argille, ecc.) lasciati dai vari corsi d'acqua che solcano la Pianura Padana e di sedimenti marini immediatamente sottostanti.

L'intensa esplorazione petrolifera eseguita con metodi indiretti (metodi geofisici) e diretti (tramite perforazioni) nei decenni passati dall'AGIP ci ha permesso di conoscere con un certo dettaglio la natura delle rocce e le strutture presenti nel sottosuolo padano fino a svariati chilometri di profondità.

Questo substrato più antico molto deformato rappresenta la prosecuzione verso NE della catena appenninica in lenta migrazione verso N e NE. Sotto la pianura è quindi presente una vera e propria catena sepolta. Questa catena deriva dalla collisione di due grandi placche: quella europea con il suo margine più orientale (il blocco sardo-corso), e quella africana col suo bordo più nord-occidentale (l'Adria). La collisione e l'interazione di queste placche ha portato al piegamento e al sollevamento dei sedimenti situati tra esse. La catena geologica non coincide però con quella topografica; una buona parte dell'Appennino, e precisamente la sua parte più frontale, si trova sepolta al di sotto dei sedimenti della Pianura Padana (come mostrato nella figura 2.6).

Sono proprio i movimenti compressivi delle strutture sepolte (pieghe e faglie) di questa porzione dell'Appennino a generare i terremoti in pianura. Questi terremoti indicano che la porzione nord orientale della catena appenninica sepolta è tuttora in evoluzione, ossia che le pieghe e le faglie inverse che la caratterizzano sono attive.

Queste strutture a pieghe e faglie inverse, situate nel sottosuolo tra la pianura modenese e Ferrara, note come pieghe ferraresi ("Arco di Ferrara" e "Arco di Mirandola"), attivandosi hanno generato il terremoto del 20 maggio.

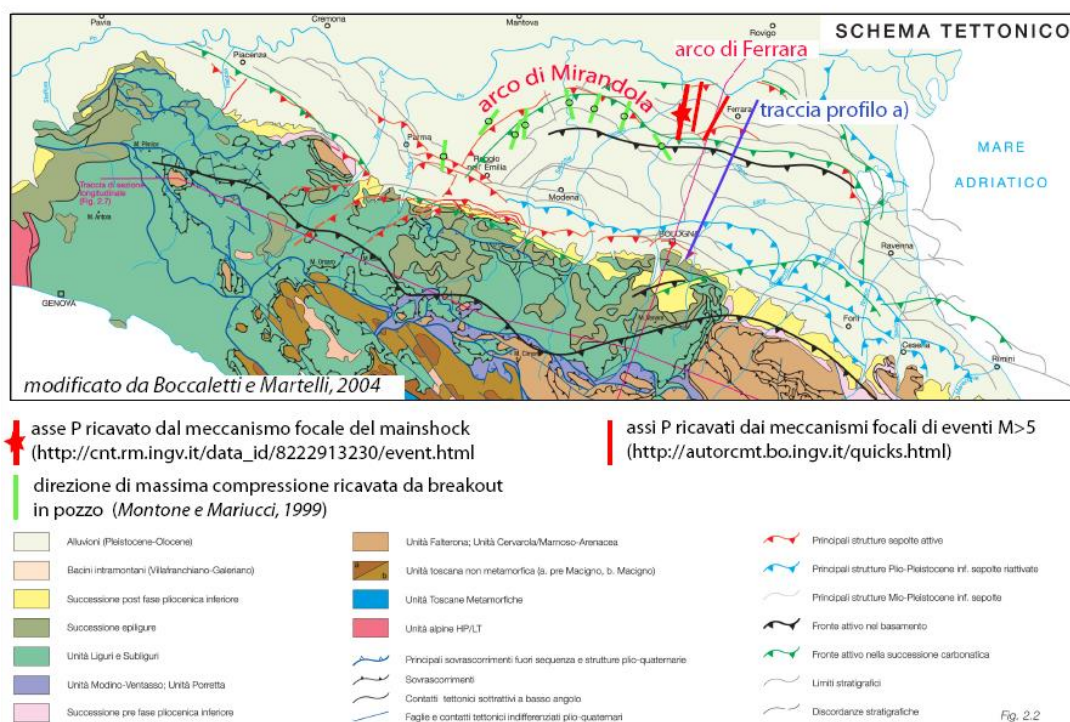


Figura 2.6: Carta geologica schematica dell'Appennino emiliano e sviluppo in pianta delle strutture tettoniche appenniniche sepolte sotto i sedimenti alluvionali recenti della Pianura Padana.

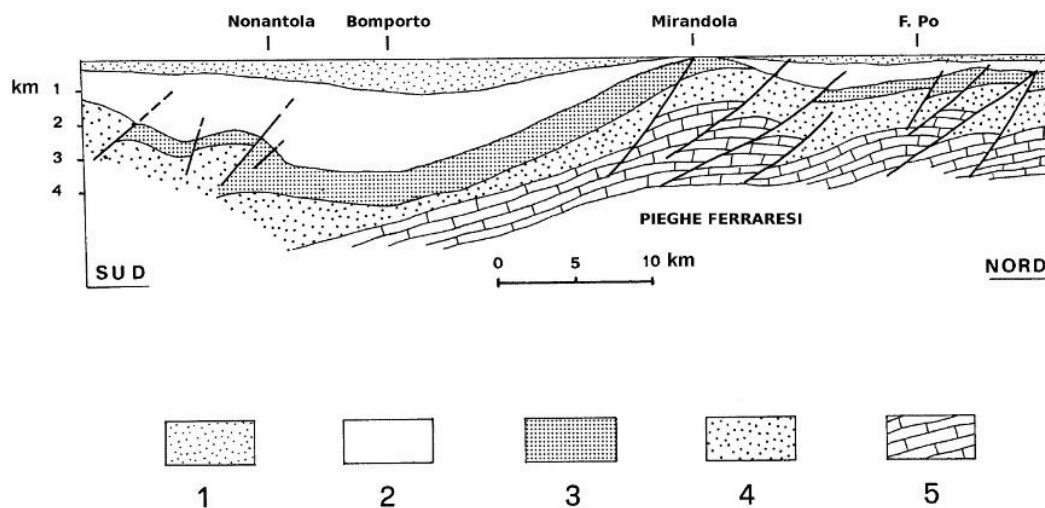


Figura 2.7: Sezione geologica attraverso la pianura modenese ricostruita sulla base delle stratigrafie dei pozzi di idrocarburi (modificata da Pieri & Groppi, 1981). Legenda: 1) depositi alluvionali (Pleistocene-Olocene); 2) sedimenti marini del Pliocene sup.-Pleistocene; 3) sedimenti marini del Pliocene inf.; 4) sedimenti marini del Paleogene-Miocene; 5) formazioni marnoso-calcaree marine del Mesozoico costituenti le "Pieghe ferraresi".

Dal 1999 i geologi del DISS Working Group ( DISSWG ) dell'INGV utilizzano congiuntamente dati geomorfologici e dati geologico-geofisici del sottosuolo per individuare le sorgenti sismogenetiche della Pianura Padana.

Particolare attenzione viene posta allo studio dell'idrografia in quanto essa è l'elemento del paesaggio più sensibile ai lievi cambiamenti della topografia e dei relativi gradienti indotti dall'attività tettonica.

Attraverso l'analisi dettagliata del reticolo idrografico dell'intera Pianura Padana sono state individuate le più importanti anomalie del drenaggio di origine certamente non antropica; tali anomalie sono state poi confrontate con la posizione delle anticlinali sepolte note dalla letteratura geologica. Questa analisi ha consentito di ipotizzare l'origine tettonica di parte delle anomalie osservate e di identificare le strutture attive nel sottosuolo. Dall'ulteriore confronto tra la posizione delle strutture attive individuate e la sismicità storica e strumentale è stato possibile affermare che queste strutture non sono solo attive nel senso più generale del termine, ma sono anche sismogenetiche, ossia capaci di generare terremoti.

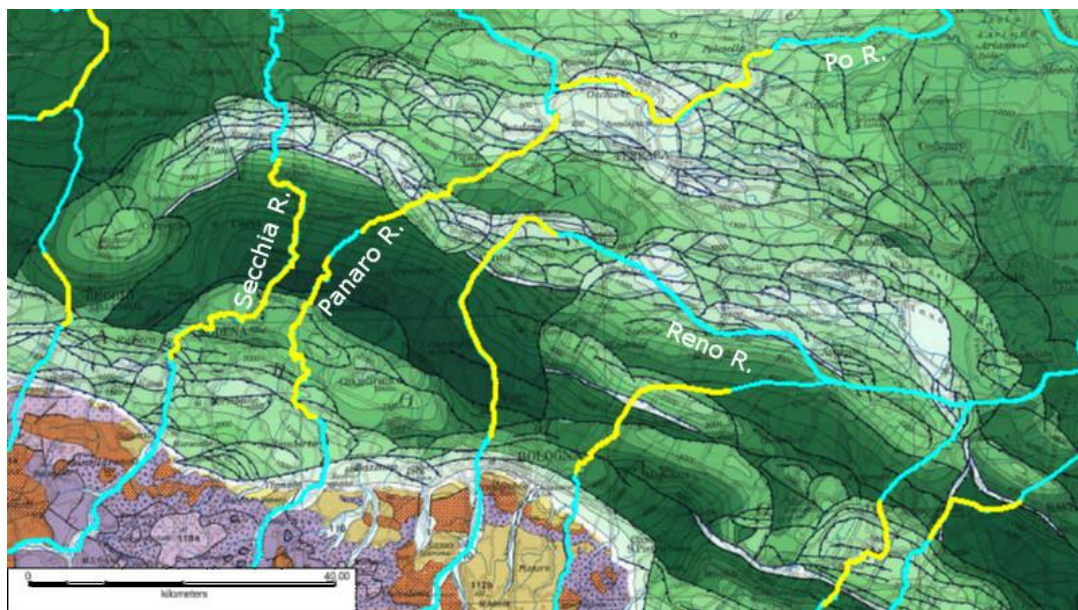
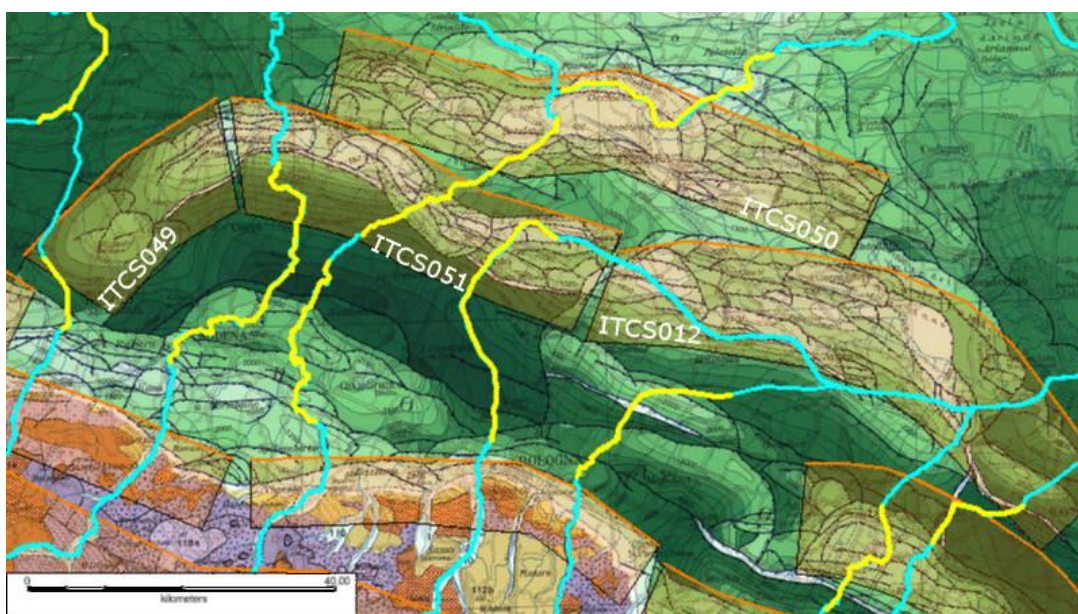


Figura 2.8: In giallo sono state evidenziate le anomalie idrografiche dei fiumi Reno, Po, Secchia e Panaro.

In diversi casi è stato possibile osservare la coincidenza tra la posizione di una anomalia del drenaggio, la presenza di una anticlinale sepolta e la localizzazione di

alcuni di terremoti riportati nei cataloghi, e quindi di mettere questi tre elementi in relazione causale. Sono state così caratterizzate le faglie più probabilmente responsabili di quei terremoti storici. Faglie e sistemi di faglie con caratteristiche geologico-geomorfologiche simili a quelle delle faglie responsabili di terremoti noti possono ritenersi altrettanto capaci di generare terremoti. Seguendo questo principio metodologico i geologi hanno mappato numerose strutture sismogenetiche in Pianura Padana e le hanno inserite nel Database of Individual Seismogenic Sources ( DISS ). Una notevole anomalia del drenaggio in un'area priva di sismicità storica nei pressi di Mirandola ( Modena ) fu messa in evidenza già dal 2000, rimarcandone la relazione con la presenza di un'anticlinale riconducibile a una importante faglia attiva sepolta. La faglia di Mirandola, ritenuta essere la potenziale sorgente di un terremoto di magnitudo di poco superiore a 6.0, fu inclusa nel DISS 2.0 ( Valensise e Pantosti, 2001 ) e successivamente aggiornata nell'ambito del DISS 3.0 ( Basili et al., 2008 ).

La sequenza sismica in atto, con i forti terremoti del 20 e del 29 maggio 2012, ha riattivato porzioni delle sorgenti identificate come ITCS050 ( Poggio Rusco-Migliarino ) e ITCS051 ( Novi-Poggio Renatico ). Queste sorgenti erano state individuate come responsabili del sollevamento delle dorsali di Ferrara e Mirandola che, nel corso di numerose decine di migliaia di anni, ha causato la deviazione del corso dei fiumi Po, Secchia, Panaro e Reno. In particolare il terremoto del 29 maggio sembra essere stato generato proprio dalla ITIS107 ( Mirandola ).



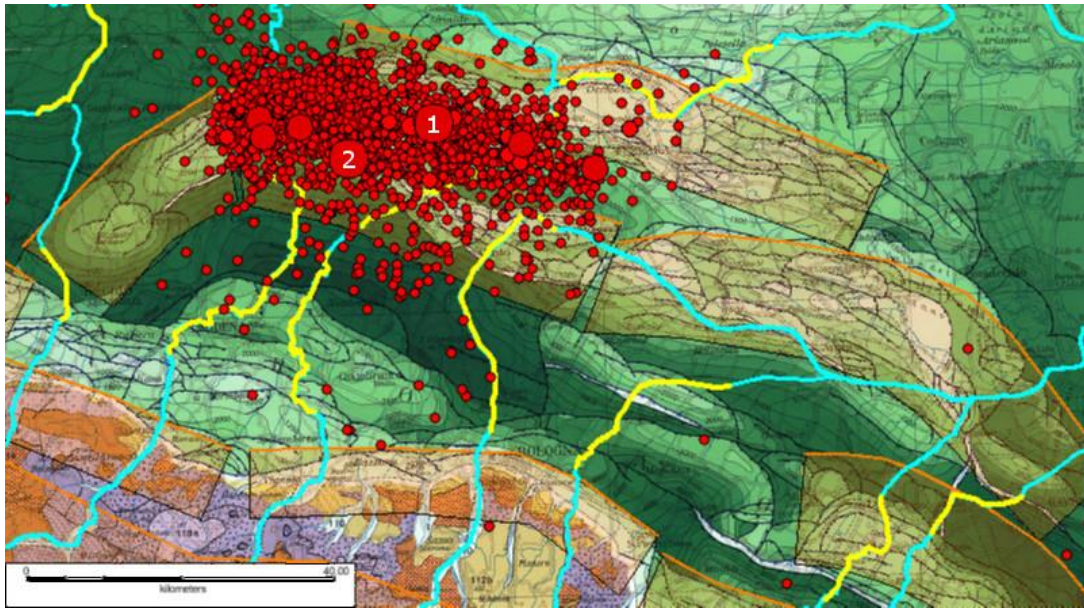


Figure 2.9 e 2.10: Rappresentazione in pianta delle sorgenti sismogenetiche identificate come ITCS050 ( Poggio Rusco-Migliarino ) e ITCS051 ( Novi-Poggio Renatico ), responsabili degli eventi sismici del 20 e 29 maggio 2012, con relativa sequenza sismica evidenziata in rosso.

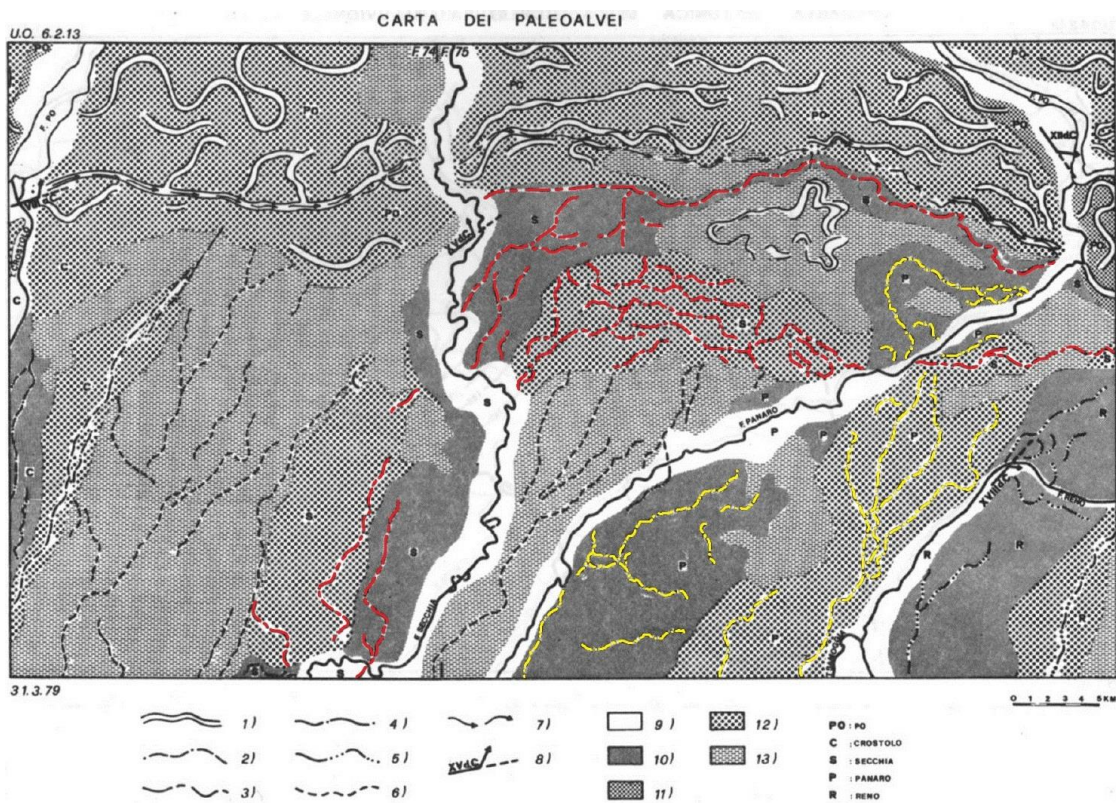


Figura 2.11: Per individuare le anomalie idrografiche si è ricorsi allo studio geomorfologico dei paleoalvei fluviali. Nella figura sono stati evidenziati i paleoalvei del fiume Secchia ( in rosso) e del fiume Panaro ( in giallo), permettendo così di individuare le strutture attive nel sottosuolo.

## **2.4. La liquefazione come effetto cosismico**

In geologia la liquefazione è il comportamento dei suoli sabbiosi e/o sabbioso limosi sciolti a granulometria uniforme che, a causa di un aumento della pressione interstiziale, passano improvvisamente da uno stato solido ad uno fluido, o con la consistenza di un liquido pesante. Durante la fase di carico, le sollecitazioni indotte nel terreno, quali possono essere quelle derivanti da un evento sismico, possono causare un aumento delle pressioni interstiziali fino a eguagliare la tensione soprastante. Viene così annullata la resistenza al taglio del terreno e si assiste a un fenomeno di fluidificazione del suolo.

È oggi ben noto che la liquefazione dei depositi incoerenti saturi, sottoposti ad accelerazione sismica, è dovuta all'incremento progressivo della pressione interstiziale. Ciò avviene principalmente per effetto delle sollecitazioni di taglio ad andamento ciclico irregolare, indotte dalla propagazione verso l'alto delle onde sismiche S ( secondarie ) provenienti dalle formazioni più rigide sottostanti.

In diversi punti della bassa pianura modenese e ferrarese, dove sono molto diffusi i paleoalvei sabbioso-limosi dei fiumi emiliani ( Po, Secchia, Panaro e Reno ), in seguito ai terremoti del 20 e del 29 maggio 2012 si sono registrati numerosissimi casi di liquefazione con espulsione in superficie di acqua mista a sabbia lungo fenditure del terreno ( figure sottostanti ).





Figura 2.13: Dettaglio di terreno liquefatto con mulinelli di fango (sand boils) presso Cavezzo, provincia di Modena (zona epicentrale del sisma del 29.05.2012)



Figura 2.14: Ampia fenditura del terreno con rigetto di 1,5 m dalla quale è uscita una gran quantità di sabbia liquefatta presso San Carlo (FE)

Le manifestazioni in superficie dell'avvenuta liquefazione di un deposito possono essere molto varie e possono consistere in:

- a) vulcanelli di sabbia (sand boils), formati da sospensioni di acqua e particelle sabbiose/limose che fuoriescono dal terreno sottostante, attraverso fessure e fratture negli strati più superficiali;
- b) cedimenti nel terreno, conseguenti all'addensamento degli strati incoerenti successivamente alla espulsione in superficie di grandi volumi di sabbia e alla dissipazione delle pressioni interstiziali;
- c) oscillazioni del terreno, non appena la liquefazione in strati profondi raggiunge i sovrastanti strati più rigidi, e producendo quindi delle fratture, degli avvallamenti e dei danni alle strutture sovrastanti;
- d) galleggiamento di infrastrutture sepolte (serbatoi, oleodotti ecc.) che risultano più leggere del terreno circostante liquefatto.

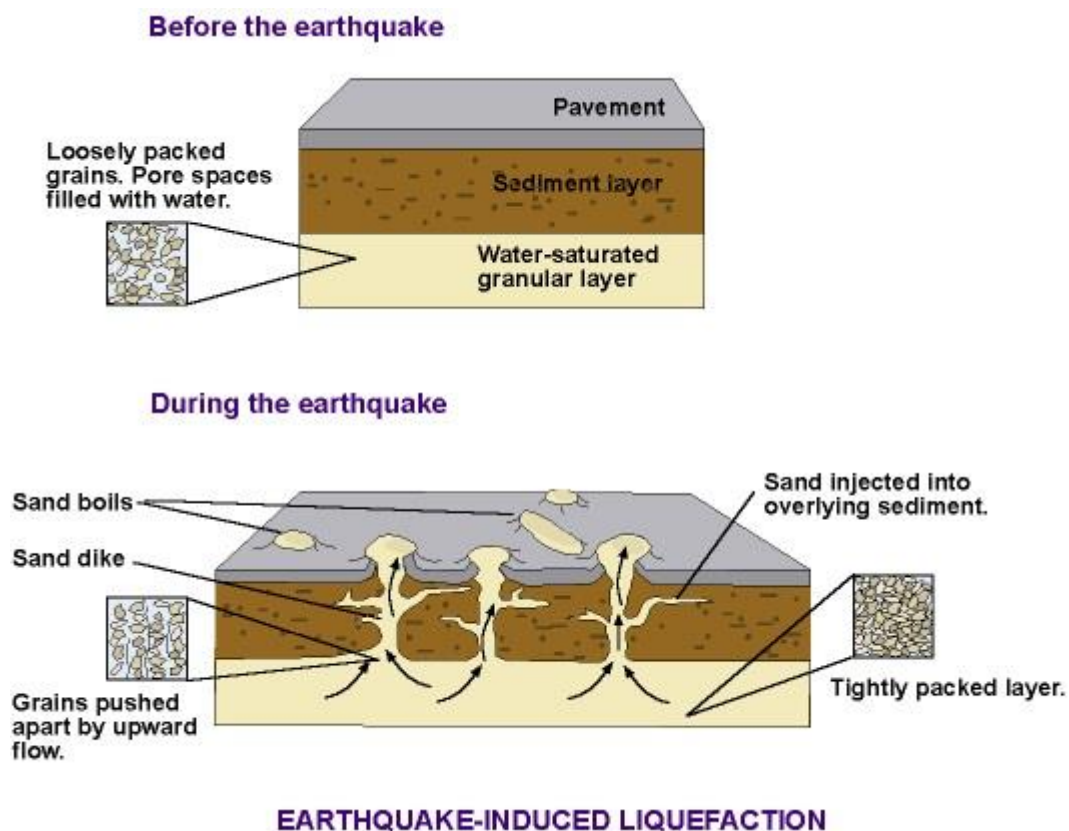


Figura 2.15: Schema del fenomeno della liquefazione indotta da terremoto



Figura 2.15: Abbassamento del suolo conseguente alla liquefazione a San Carlo (FE)

A seguito dell'evento sismico del 20 Maggio, il Servizio Sismico della Regione Emilia Romagna ed il Dipartimenti di Protezione Civile hanno incaricato un gruppo di esperti di valutare il rischio geotecnico post-sismico della località di San Carlo, frazione del comune di Sant'Agostino, interessata da estesi e significativi fenomeni di liquefazione.

In gran parte dell'abitato sono state rilevate importanti fuoriuscite di sabbia attraverso i pozzi per l'emungimento dell'acqua.

Laddove la sabbia non ha trovato la via di uscita preferenziale costituita dai pozzi, sono state osservate forti venute di acqua e terreno: in forma di vulcanelli all'esterno di un edificio, in forma di sollevamento del pavimento al piano seminterrato e al piano terra, con trasporto prevalente del terreno di fondazione più superficiale, in genere fine, e parte del sottostante strato di terreno grossolano liquefatto.

A seguito di una mappatura d'agibilità per le varie aree interessate, è stato ritenuto necessario intraprendere un programma di indagini conoscitive sulla natura e le proprietà meccaniche dei terreni mediante una campagna di prove in sito e di laboratorio; è stato inoltre predisposto un sistema di monitoraggio piezometrico per valutare le variazioni di livello della falda freatica durante la fase transitoria post-sismica. Infine è stato allestito un sistema di monitoraggio topografico mediante livellazione ad alta precisione, per misurare eventuali spostamenti post-sismici degli edifici.

## **2.5. Analisi e modellazione post-sismica mediante dati GPS e dati SAR**

A seguito di entrambi gli eventi sismici del 20 e 29 maggio 2012, il Dott. A. Caporali e il Dott. L. Ostini ( Università di Padova, Dipartimento di Geoscienze ) hanno condotto uno studio di analisi degli spostamenti delle stazioni geodetiche durante l'avvenimento della sequenza sismica emiliana, ricerca pubblicata in un secondo momento anche in *Annals of Geophysics*, vol. 55, No 4 ( "*Analysis of the displacement of geodetic stations during the Emilia seismic sequence of May 2012*" ). Le stazioni geodetiche, formando una rete di punti di osservazione, attraverso antenne e ricevitori GPS, permettono di stabilire giornalmente la posizione di un dato sito rispetto ad un riferimento satellitare. Ogni sito riceve continuamente segnali radio inviati da una serie di satelliti orbitanti attorno alla Terra. La registrazione di questi segnali viene inviata automaticamente ad un centro di raccolta centralizzato, dove i dati vengono analizzati per ottenere le posizioni giornaliere di tutti i siti. Definendo tali posizioni è possibile poter calcolare un eventuale campo di deformazione presente nell'area coperta dalla rete geodetica.

Nel caso della sequenza sismica emiliana, grazie ai dati raccolti tramite 150 stazioni GPS e ENP e alla loro modellazione scientifica (tramite l'utilizzo del software di Coulomb 3.20 ) , è stato possibile ricavare lo spostamento cosismico orizzontale e verticale di ciascuna stazione geodetica emiliana, definendo in tal modo lo spostamento cosismico prima, durante e dopo entrambi i terremoti.

Tenendo conto di queste dislocazioni orizzontali e verticali, modellandole opportunamente tramite il modello di Okado, e prendendo in considerazione anche i dati provenienti da osservazioni SAR, è stato possibile ipotizzare un modello di sorgente sismogenetica per ciascun avvenimento sismico, individuando così un modello di faglia per ciascun evento, uno per il 20 maggio e uno per quello del 29 maggio 2012.

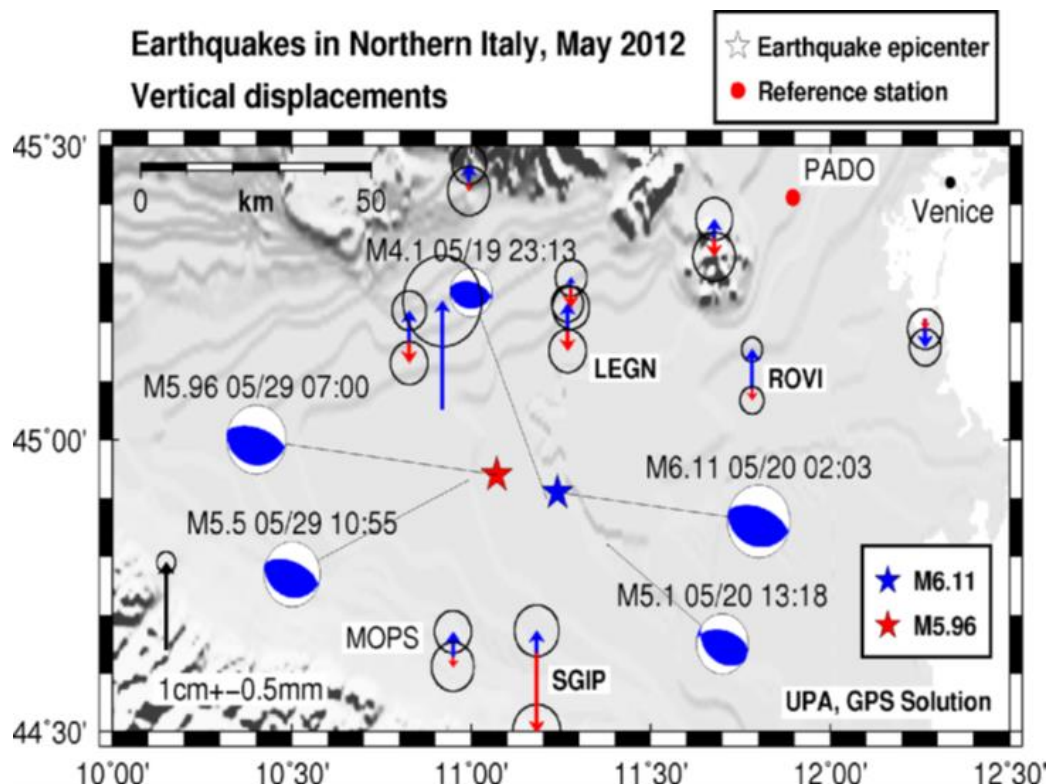
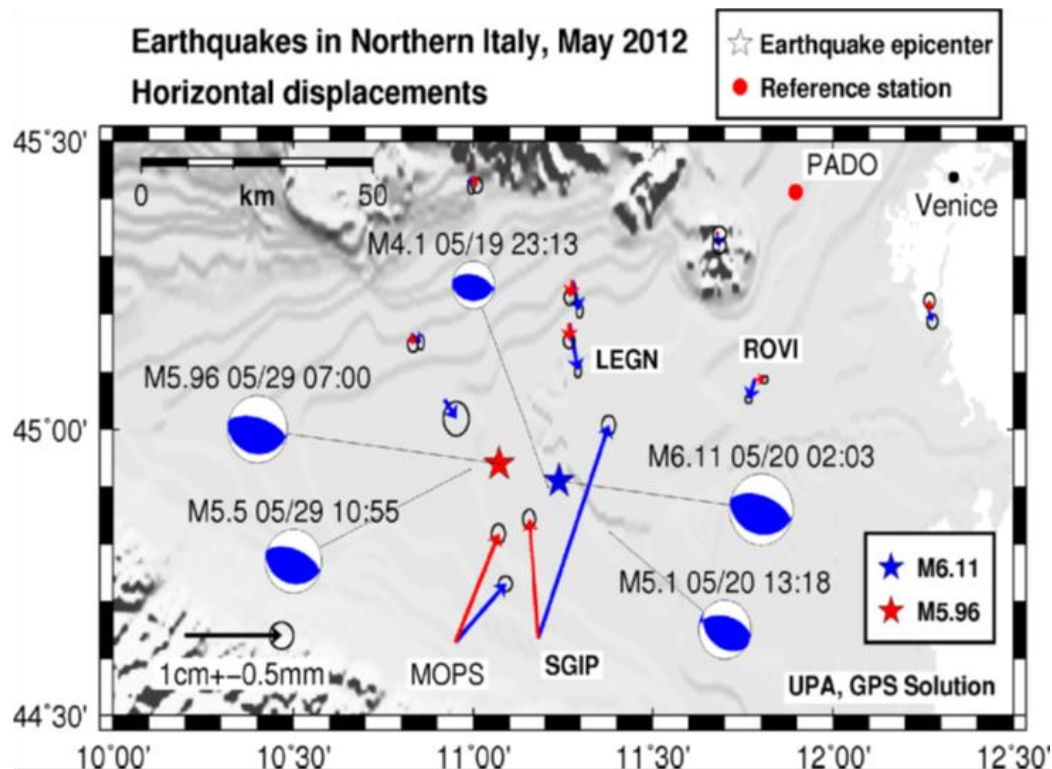


Figure 2.16 e 2.17: Le immagini rappresentano gli spostamenti cosismici orizzontale (figura in alto) e verticale (figura in basso) delle stazioni GPS permanenti per il sisma del 20 Maggio 2012 ( frecce blu) e quello del 29 Maggio 2012 (frecce rosse), tratti dallo studio di A. Caporali e L. Orsini sopracitato. Sono inoltre evidenziati entrambi gli epicentri principali della sequenza sismica emiliana, quello del 20 maggio e quello del 29 maggio , per mezzo di una stellina rispettivamente blu e rossa.

In Italia esistono numerose stazioni GPS permanenti, distribuite su tutto il territorio, che registrano con frequenze di campionamento pari ad 1 secondo e che trasmettono dati in tempo reale. Tale campionamento permette di utilizzare in tempi rapidi il dato geodetico come se fosse un dato sismico. Infatti, tecniche di analisi in modalità cinematica del dato GPS ad alta frequenza permettono, in caso di evento sismico in prossimità della stazione, di ottenere una serie temporale che mostra il passaggio delle onde sismiche.

In un raggio di 90 km dall'epicentro del terremoto in Pianura Padana-Emiliana, 13 stazioni GPS appartenenti a varie reti permanenti, hanno registrato la scossa principale del 20/5/2012 (  $M_l=5.9$  ) con un campionamento di 1s. Il dato GPS è stato analizzato in modalità cinematica usando il software Gipsy-Oasis II e le informazioni sulle orbite rapide e sugli orologi dei satelliti GPS forniti dal NASA-JPL (Jet Propulsion Laboratory).

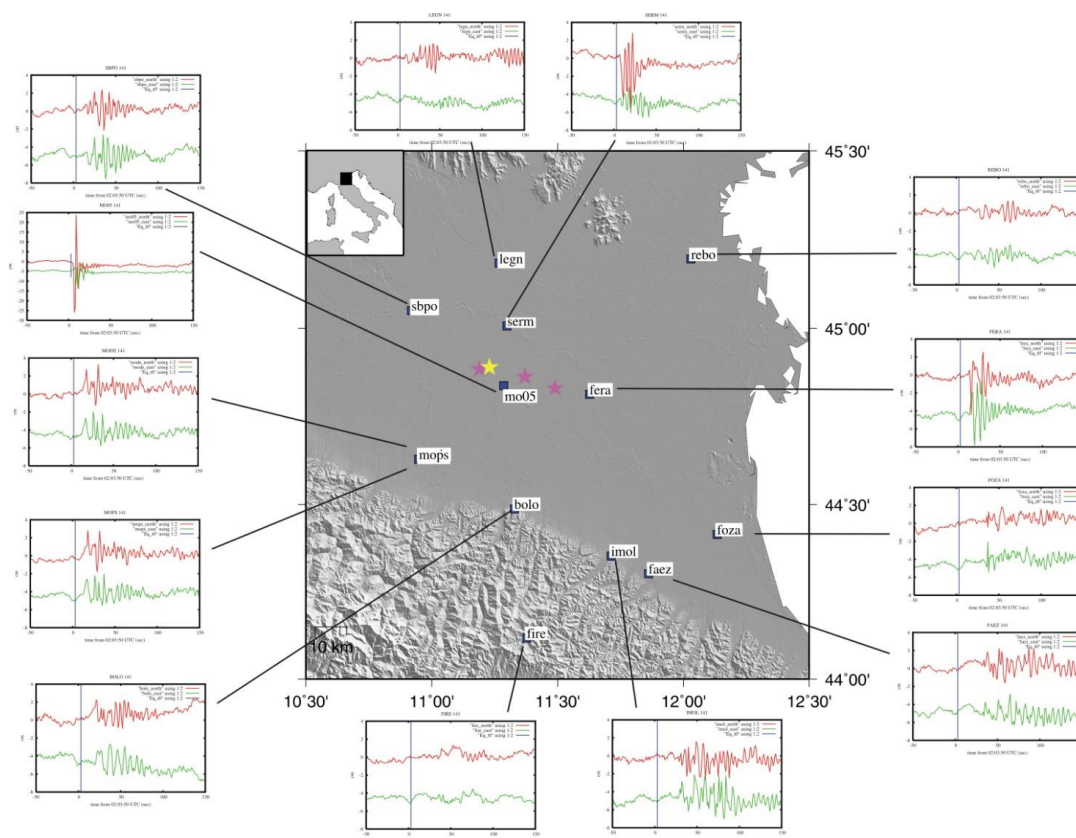


Figura 2.18: Le stazioni mostrate appartengono alle reti permanenti GPS. Nei vari grafici è mostrato lo spostamento in direzione N-S (rosso) e quello in direzione E-W (verde) nei secondi successivi alla scossa principale (barra blu verticale).

Le serie temporali in figura mostrano chiaramente un segnale transiente, ovvero una deformazione non permanente dovuta al passaggio delle onde sismiche a seguito della scossa principale. Per la maggior parte delle stazioni tale segnale rispecchia in genere le onde di superficie e mostra ampiezze variabili in funzione della distanza dall'epicentro.

Gli spostamenti registrati in ciascuna stazione sono stati ricavati da 3 analisi indipendenti ( Bernese, Gamit e Gipsy ) con strategie di analisi e modelli alquanto diversi. Gli spostamenti sono stati calcolati separatamente per ciascuna analisi a partire dalle posizioni giornaliere precise ( 15 giorni prima dell'evento e 1 giorno dopo ) e poi combinate in un'unica soluzione.

Gli spostamenti massimi si sono registrati nelle stazioni di Finale Emilia ( MO05 oriz.= 30mm, vert = 73mm ), S. Giovanni in Persiceto ( SGIP oriz = 21mm, vert = 4mm ) e a Sermide ( SERM oriz = 15 mm, vert = -4 mm ).

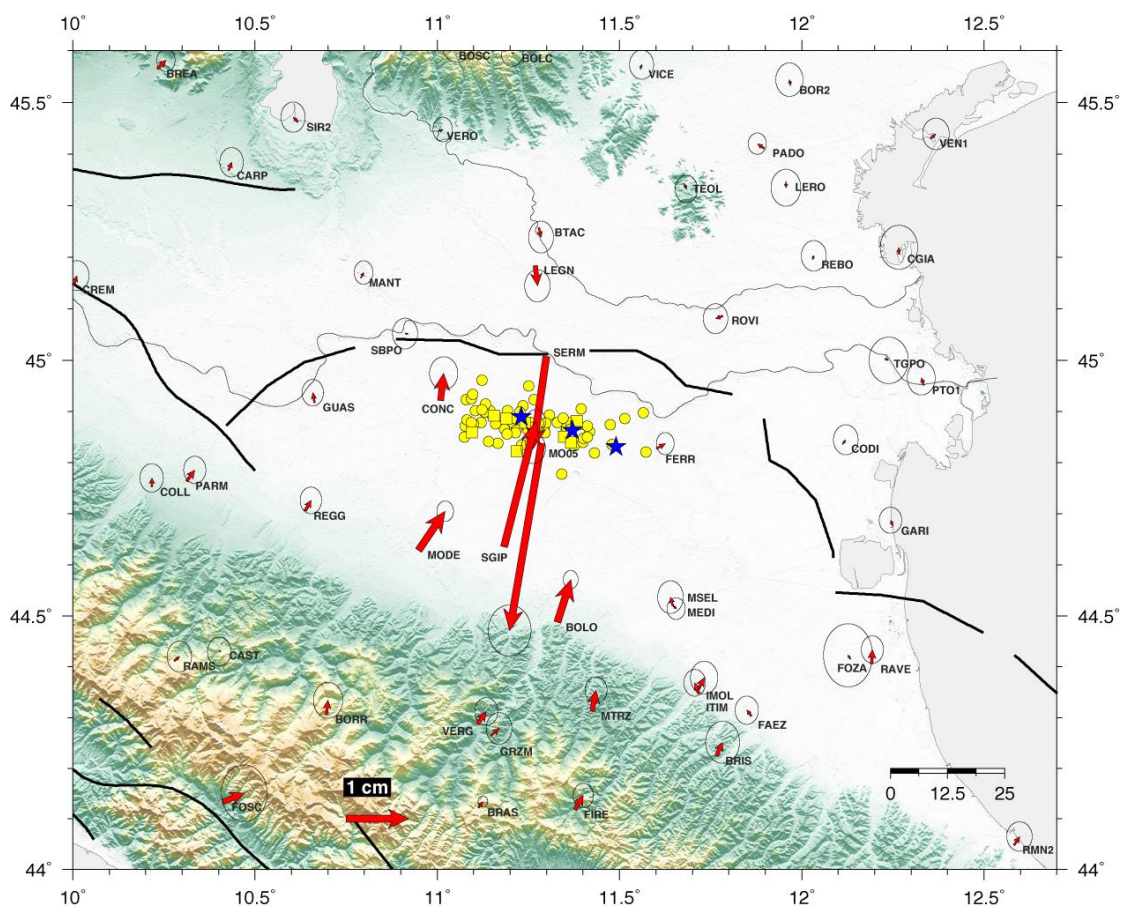


Figura 2.19: Spostamenti cosismici orizzontali del 20 maggio registrati dalle stazioni GPS permanenti in Emilia. Sono stati ottenuti dalla combinazione di tre analisi indipendenti ( Bernese, Gamit, Gipsy ).

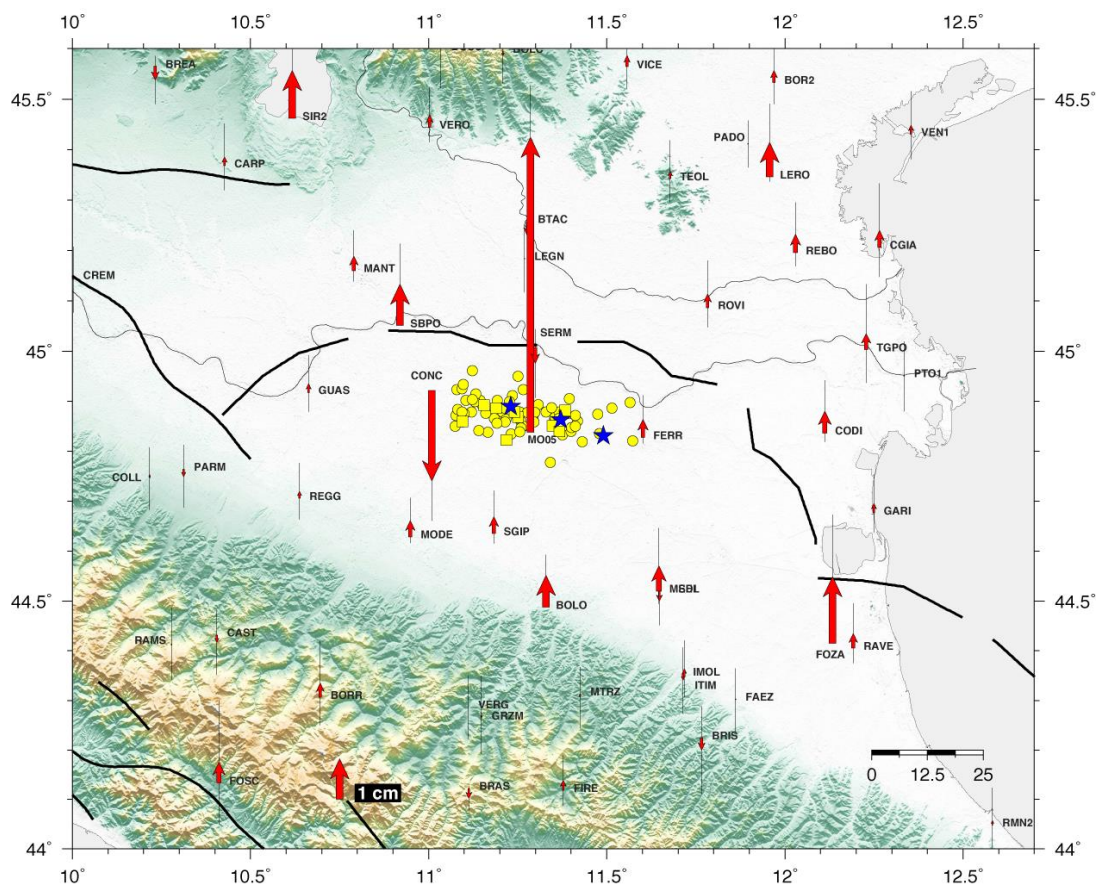


Figura 2.20: Spostamenti cosismici verticali del 20 maggio registrati dalle stazioni GPS permanenti in Emilia. Sono stati ottenuti dalla combinazione di tre analisi indipendenti ( Bernese, Gamit, Gipsy ).

Nell'emergenza post terremoto dell'Emilia Romagna il Dipartimento della Protezione Civile, fin dalle primissime ore dopo il sisma, ha coinvolto l'ASI ( Agenzia Spaziale Italiana ), il CNR-IREA ( Consiglio Nazionale delle Ricerche-Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente ) e l'INGV ( Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia ) , per la programmazione di nuove acquisizioni radar dai satelliti della costellazione COSMO-SkyMed al fine di disporre, in tempi molto rapidi, di informazioni circa la deformazione crostale connessa alle scosse sismiche di maggiore energia: tipo di deformazione, entità ed estensione del territorio interessato.

Una delle caratteristiche più importanti dei sistemi radar per l'Osservazione della Terra è la capacità di funzionare in qualsiasi ora del giorno e della notte e in qualsiasi condizione atmosferica. Questa caratteristica, data la densa copertura nuvolosa che ha interessato la zona durante i primi giorni dell'emergenza, si è rilevata di particolare importanza: l'informazione radar è risultata l'unica capace di fornire, in

tempi brevissimi, un quadro d'insieme della situazione, non altrimenti rilevabile con le metodologie ottiche standard.

Mediante una tecnica denominata Interferometria Differenziale, è possibile misurare piccoli spostamenti del terreno, anche dell'ordine dei centimetri, utilizzando immagini radar acquisite prima e dopo un evento sismico. L'ultima acquisizione dei satelliti COSMO-SkyMed sulla zona interessata dal sisma è avvenuta la sera del 19 maggio, poche ore prima dell'evento.

Per poter calcolare la deformazione del suolo è necessario attendere che uno dei satelliti ripassi esattamente sulla stessa orbita. L'Agenzia Spaziale Italiana ha immediatamente predisposto l'acquisizione del primo passaggio utile post-terremoto che è avvenuto nella serata del 23 maggio. I dati satellitari sono stati prontamente elaborati da un team di ricercatori dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia e del Consiglio Nazionale delle Ricerche.

Ciò che ne risulta è il cosiddetto interferogramma, cioè una mappa di deformazione espressa in termini di cicli di colore.

Ogni ciclo, o frangia, è rappresentativo di circa 1.5 cm di sollevamento della superficie terrestre. L'area con fasce di colore (frange) concentriche nell'interferogramma indica un sollevamento del suolo dovuto alla rottura della faglia sismica al di sotto di 1-2 km di profondità. Questo primo risultato è particolarmente interessante in quanto, pur rappresentando solo il settore più orientale dell'area presumibilmente in deformazione, consente di capire che questa ha un orientamento prevalentemente est-ovest, parallelamente alla struttura tettonica che ha generato il terremoto, fornendo utili informazioni per la definizione del processo in atto ( figura 2.21 ). La qualità delle immagini risulta buona, nonostante le condizioni della superficie (presenza di campi, coltivazioni e vegetazione) non siano ottimali.

Per rendere più evidenti le deformazioni misurate, le frange sono state convertite in deformazione e rappresentate mediante un codice di colori sulla cartografia di GoogleEarth.

Le zone azzurre sono quelle affette da deformazione trascurabile, mentre quelle in rosso hanno raggiunto il valore di massimo sollevamento ( figura 2.22 ).

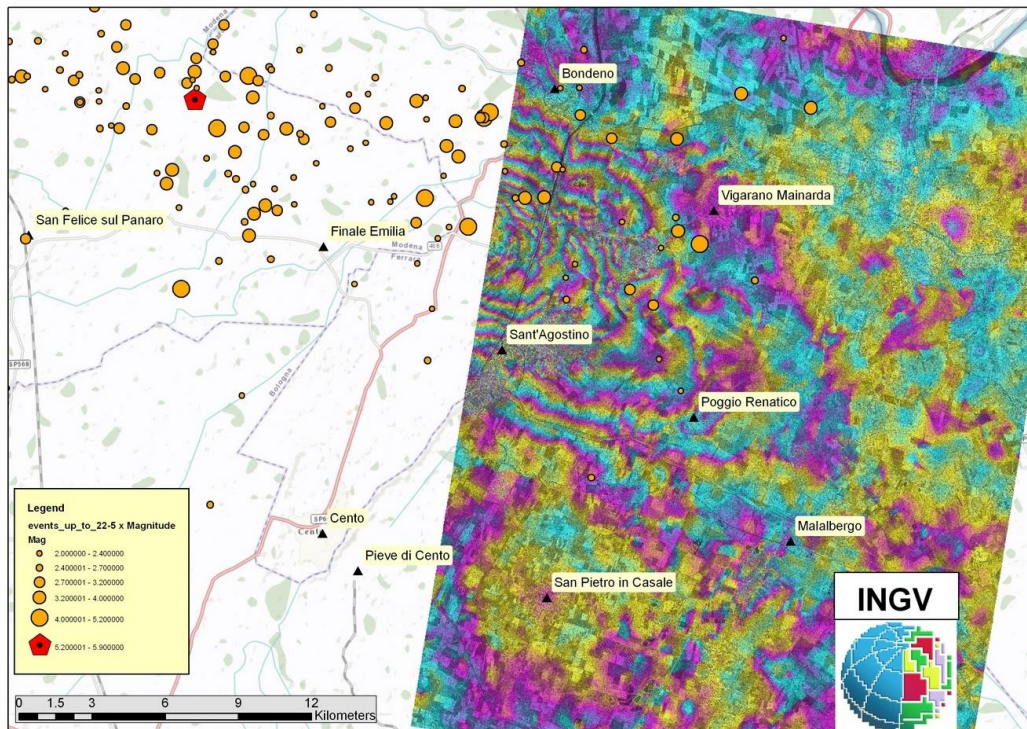


Figura 2.21: Interferogramma, una mappa di deformazione espressa in termini di cicli di colore. Ogni ciclo, o frangia, è rappresentativo di circa 1.5 cm di sollevamento della superficie terrestre. L'area con fasce di colore (frange) concentriche nell'interferogramma indica un sollevamento del suolo dovuto alla rottura della faglia sismica al di sotto di 1-2 km di profondità.

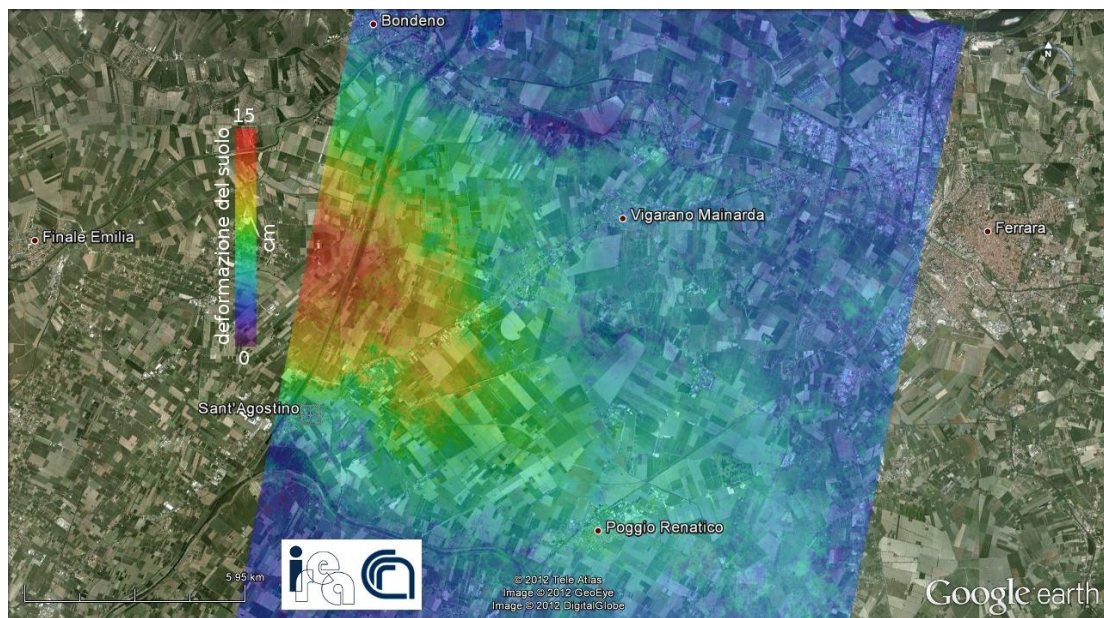


Figura 2.22: Mappa della deformazione prodotta dal terremoto del 20/05/2012: per una parte dell'area studiata si è avuto un sollevamento il cui valore massimo è pari a circa 15 centimetri.

Grazie a questa tecnica ( DInSAR ) è stato possibile misurare la deformazione del suolo anche in seguito al sisma del 29 Maggio 2012.

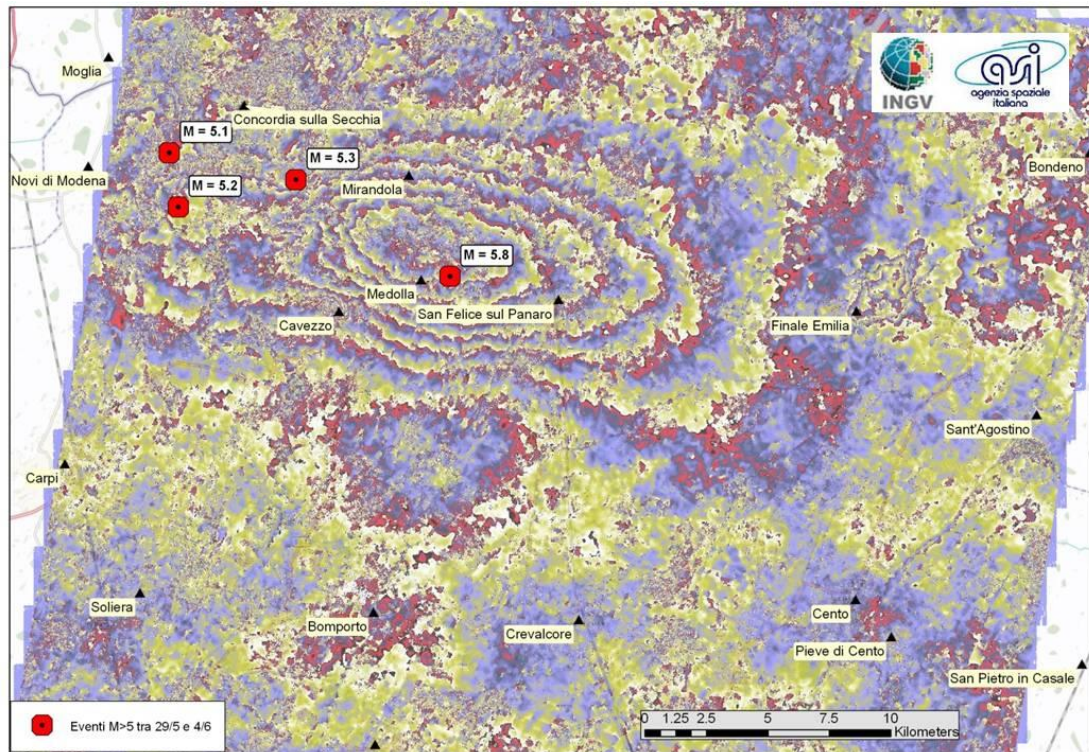


Figura 2.23: Interferogramma SAR relativo alle date del 27 maggio e 4 giugno 2012.

L'interferogramma SAR è una rappresentazione delle deformazioni del suolo avvenute tra le date delle due immagini. Può essere letto come una mappa dei movimenti del suolo, proiettati secondo la direzione di vista del satellite, in termini di cicli di colore. Ogni ciclo (o frangia) indica una deformazione del suolo tra le due date di 1.5 cm ( nel caso di COSMO-SkyMed ). La successione dei colori (ad es. blu-rosso-giallo) in ognuna delle frange indica il verso del movimento del suolo. Per ottenere il massimo spostamento del suolo occorso tra le due date nell'area, le frange con lo stesso verso del ciclo di colore vanno sommate.

L'interferogramma ( Figura 2.23 ), relativo alle date 27-05 e 04-06 mostra un'area con fasce di colore (frange) concentriche che indicano uno spostamento del suolo dovuto al movimento in profondità di una faglia sismogenetica. La deformazione prodotta dal terremoto appare continua nello spazio e non mostra discontinuità: ciò sta ad indicare che il piano di faglia non ha raggiunto la superficie terrestre. Siamo quindi in presenza di una faglia cosiddetta “cieca”, cioè una faglia che disloca la crosta terrestre in profondità, ma non “taglia” la superficie topografica.

Il cosiddetto “Interferogramma srotolato” ( Figura 2.24 ) mostra uno spostamento massimo del suolo di circa 12 cm, lungo la linea di vista del satellite (praticamente quasi verticale). Questi dati concordano con quelli sismologici. Infatti la deformazione misurata dal satellite risulta essere compatibile con un piano di rottura principale immergente verso Sud a carattere compressionale ( faglia di sovrascorrimento ).

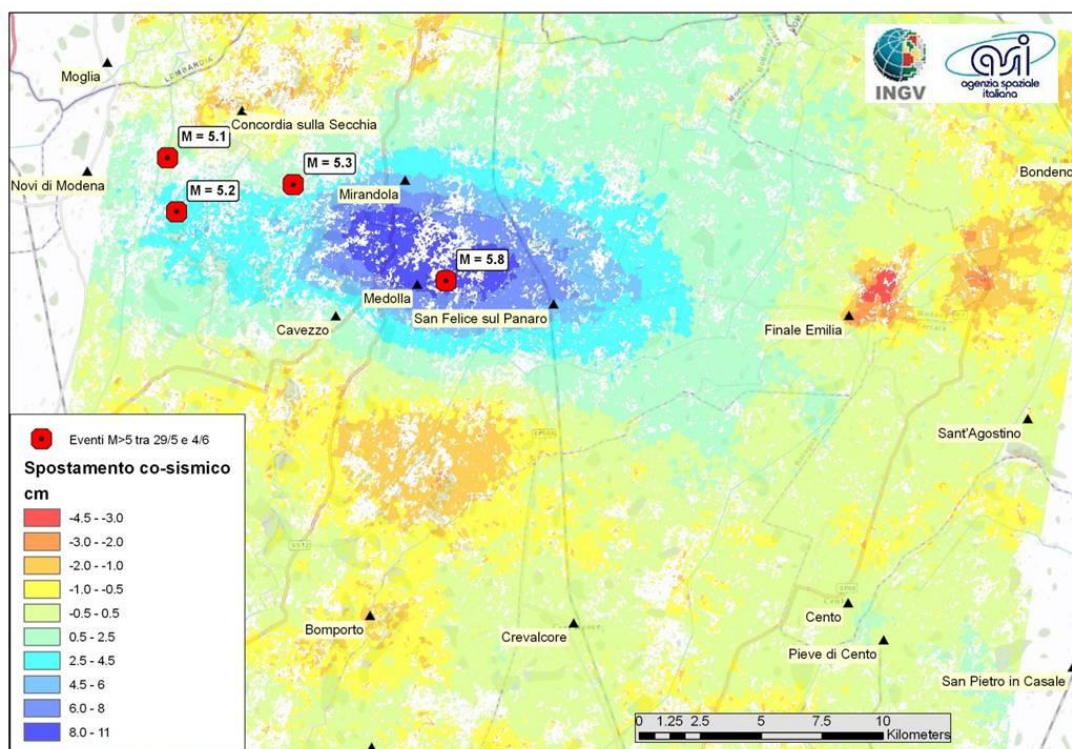
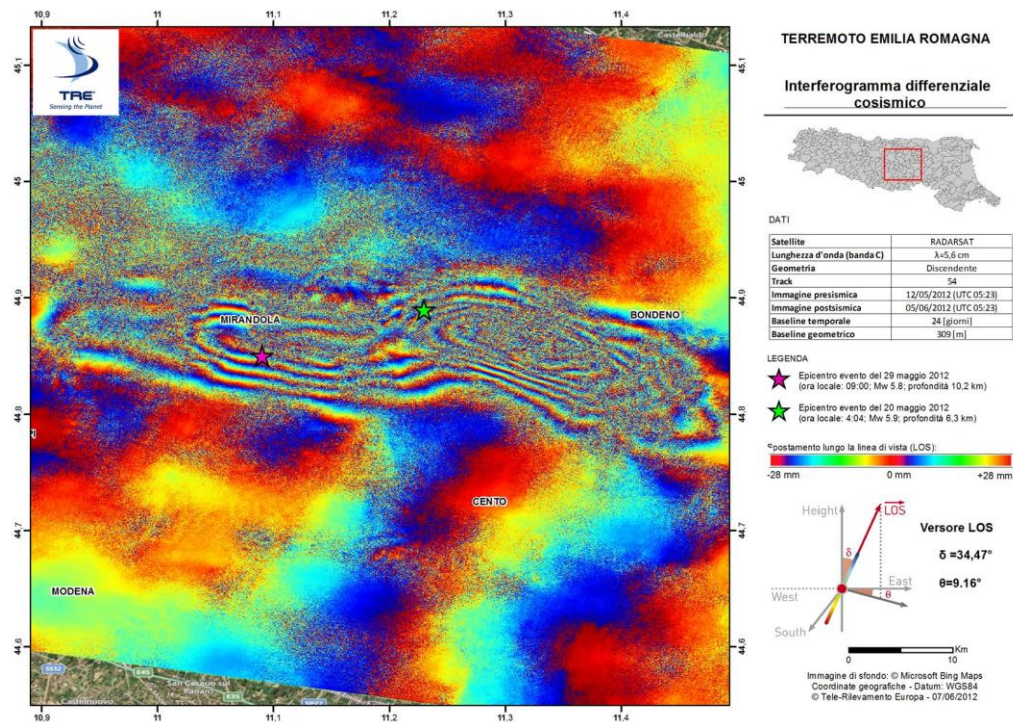


Figura 2.24: Interferogramma srotolato in cui si evidenzia lo spostamento cosismico del suolo. Le zone in blu sono quelle in sollevamento fino ad un massimo di 12 cm, quelle in verde sono stabili e quelle in rosso sono le aree in abbassamento di circa 3 cm

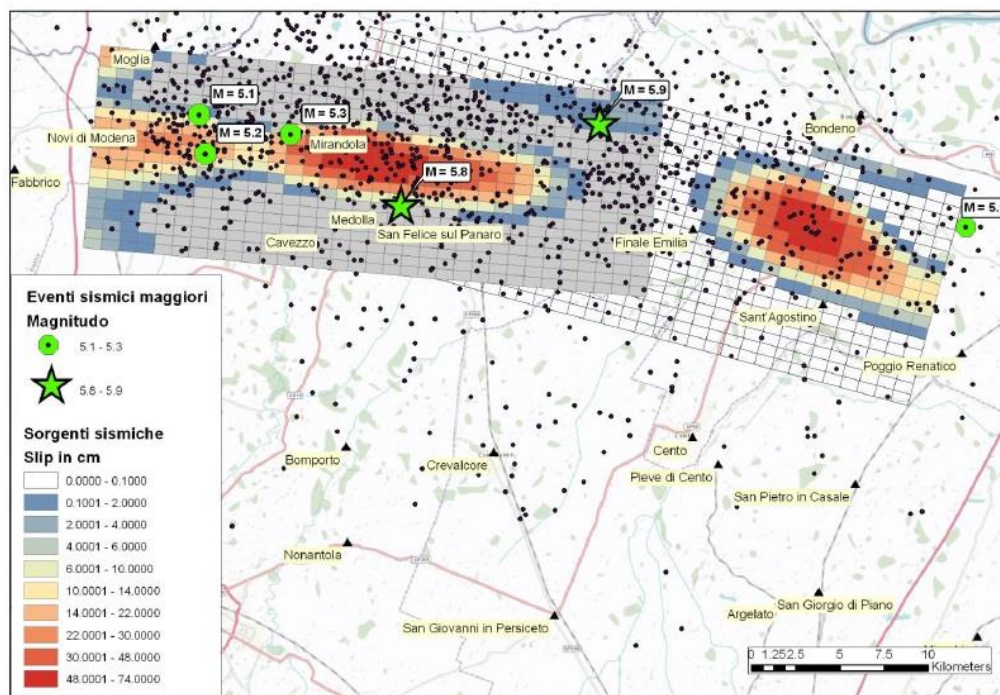
La forma a “cucchiaio” del sollevamento è leggermente asimmetrica e presenta un gradiente minore verso Est e maggiore verso Ovest. In quest’ultima direzione si individua anche un ulteriore sollevamento dovuto all’effetto combinato dei 3 eventi di magnitudo locale compresa tra 5.1 e 5.3, avvenuti nel periodo coperto dall’interferogramma ( 27 maggio – 4 giugno 2012 ). Circa 8 km a Sud della zona di massimo sollevamento, si individua un minimo relativo, di forma circolare, la cui presenza supporta una geometria di dislocazione profonda lungo un piano immergente verso Sud, come sopra indicato.

Ulteriori elementi interessanti sono gli abbassamenti del suolo localizzati nella zona di Finale Emilia. Quello più centrato sul paese arriva a 3 cm, quello poco ad Est è di

circa 2 cm. Date le loro estensioni e intensità, si tratta molto probabilmente di fenomeni dovuti a movimenti superficiali di acqua nel sottosuolo.



Nella figura sovrastante viene riportato l'interferogramma RADARSAT comprendente i maggiori eventi della sequenza sismica ( 12 maggio – 5 giugno ). Il pattern di deformazione suggerisce la presenza di due sorgenti non perfettamente allineate, una responsabile del sisma del 20 maggio 2012 e l'altra responsabile del terremoto del 29 maggio 2012 ( rispettivamente a destra e sinistra ).



### 3. Conclusioni

L'inadeguatezza di misure preventive contro i terremoti non è dovuta a una scarsa conoscenza della geologia della Pianura Padana: carte alla mano, si può dimostrare non solo che la zonazione del rischio nel nostro paese è aggiornata e accurata, ma che per le zone colpite la magnitudo attesa già nel 2001 era superiore a quella registrata.

Nel “Database di potenziali sorgenti di terremoti di magnitudo maggiore di 5,5 in Italia” pubblicato sugli Annali di Geofisica nel 2001 ( a firma di Gianluca Valensise e Daniela Pantosti ) era stata inserita anche la Faglia di Mirandola, con terremoti di magnitudo locale attesa di 6,2.

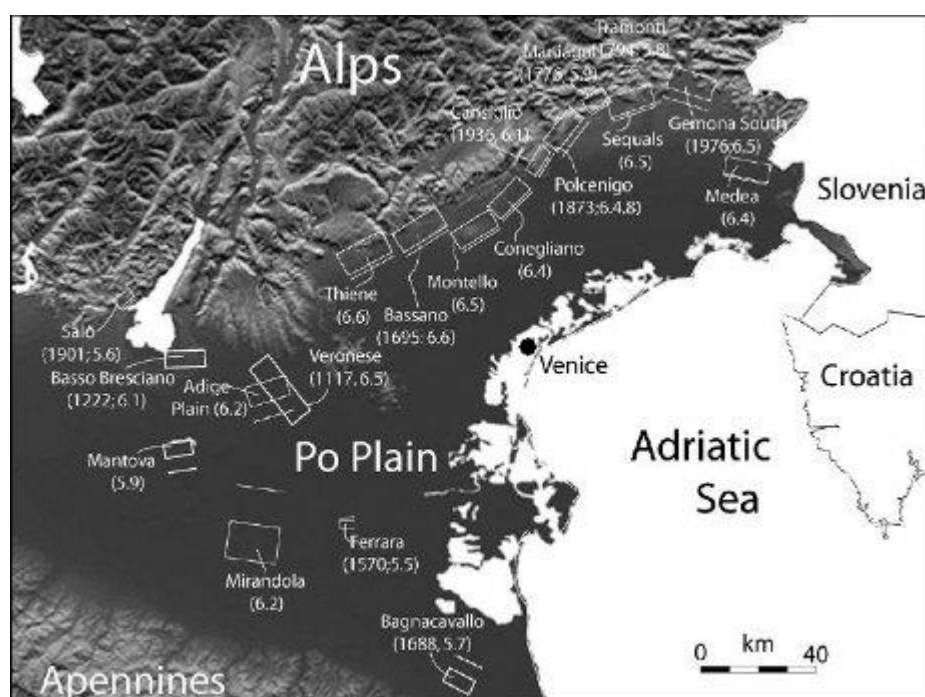


Figura 3.1: Mappa sismica della Pianura Padana intorno a Venezia, tratta da Carminati E, Enzi S, Camuffo D, A study on the effects of seismicity on subsidence in foreland basins: An application to the Venice area, Global and Planetary Change 55 (2007) 237–250, sulla base di Valensise G., Pantosti D., 2001. Database of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy. Annali di Geofisica, suppl. to vol. 44).

Lo stesso Dott. Gianluca Valensise sottolinea che fino agli anni 96 - 97 il problema della pericolosità sismica della Pianura Padana era sostanzialmente sconosciuto alla normativa antisismica; poi sono uscite le prime carte di pericolosità che hanno iniziato a considerare le zone a pericolosità medio/bassa, cioè le zone capaci di produrre terremoti anche robusti ma rari, o in termini più tecnici, una bassa

probabilità di forti scuotimenti in un intervallo di tempo breve dal punto di vista geologico.

Grazie a nuovi studi effettuati tramite dati SAR e GPS, la ricerca ha potuto implementare le conoscenze geomorfologiche, geologiche e di rilevamento a quelle ottenute negli ultimi anni, soprattutto grazie alle stazioni geodetiche che hanno fornito nuove competenze nel campo della deformazione del suolo.

Da questi studi è stato possibile ampliare le conoscenze sismologiche grazie alla modellazione scientifica dei dati satellitari, ottenendo così informazioni sulle sorgenti sismogenetiche, sulla deformazione cosismica del suolo, sulla cinematica nazionale e regionale e il sollevamento della superficie terrestre. Inoltre i dati satellitari ci offrono risposte pressoché immediate dell'evento, dandoci informazioni in poche ore. In tal senso la ricerca scientifica sta facendo degli ottimi passi avanti, offrendoci sempre più risposte in merito ad eventi pressoché sconosciuti fino a pochi decenni fa, proprio come possono esserlo i terremoti.

## 4. Bibliografia

Burrato, P., Ciucci, F. e Valensise, G., 2003. An inventory of river anomalies in the Po Plain, northern Italy: evidence for active blind thrust faulting, *Annals of Geophysics*, 46, 5, 865-882, <http://www.annalsofgeophysics.eu/index.php/annals/article/view/3459/3504>.

DISS Working Group, 2010. Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.1.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, © INGV 2010 – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Meletti C., Galadini F., Valensise G., Stucchi M., Basili R., Barba S., Vannucci G. e Boschi E., 2008. A seismic source zone model for the seismic hazard assessment of the Italian territory. *Tectonophysics*, 450, 85-108; doi.10.1016/j.tecto.2008.01.003.

Valensise, G. e Pantosti, D. (eds), 2001. Database of Potential Sources for Earthquakes Larger than M 5.5 in Italy, *Annali di Geofisica*, 44, 4, 180 pp., with CD-ROM, <http://www.annalsofgeophysics.eu/index.php/annals/issue/view/260>.

A. Caporali, L. Ostini ( Università di Padova, Dipartimento di Geoscienze )

“Analysis of the displacement of geodetic stations during the Emilia seismic sequence of May 2012” *Annals of Geophysics*, vol. 55, No 4, 2012; doi: 10.4401/ag-6115.

S.Atzori, J. Merryman Boncori, G. Pezzo, C. Tolomei, S. Salvi , 2012. Secondo report analisi dati SAR e modellazione della sorgente del terremoto dell’Emilia, SIGRIS system product, PDF, [www.sigris.it](http://www.sigris.it).

EMERGEIO working group, Rilievi geologici di terreno effettuati nell’area epicentrale del terremoto del 20 maggio 2012. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia Rapporto Preliminare 26/5/2012.

A. Caporali and L. Ostini, Workbook - The 2012 seismic sequence in Emilia (Northern Italy, ) Department of Geosciences, University of Padova, Padova, June 2012, PDF.

P. Galli, S. Castenetto, E. Peronace, 15 Giugno 2012, Terremoti dell'Emilia - Maggio 2012, RILIEVO MACROSISMICO MCS SPEDITIVO - Rapporto finale, Dipartimento della Protezione Civile Nazionale ( Roma ), CNR-IGAG ( Roma ), PDF.

G. Tosati, Articolo informativo sul fenomeno della liquefazione dei terreni, Crisi sismica di Modena/Ferrara maggio 2012, Università degli studi di Modena e Reggio Emilia, Dipartimento di Scienze della Terra, PDF.

Articoli da [blogingvterremoti \(http://ingvterremoti.wordpress.com/ \)](http://ingvterremoti.wordpress.com/):

- Terremoto in Pianura Padana Emiliana: meccanismi focali e magnitudo (<http://ingvterremoti.wordpress.com/2012/06/05/terremoto-in-pianura-padana-emiliana-meccanismi-focali-e-magnitudo/> );
- Approfondimento: i meccanismi focali e le faglie (<http://ingvterremoti.wordpress.com/2012/06/18/approfondimento-i-meccanismi-focali-e-le-faglie-2/> );
- Terremoto in Pianura Padana Emiliana: spostamento del suolo dovuto al terremoto del 29/05/2012, visto dal satellite italiano COSMO-SkyMed (<http://ingvterremoti.wordpress.com/2012/06/07/terremoto-in-pianura-padana-emiliana-spostamento-del-suolo-dovuto-al-terremoto-del-29052012-visto-dal-satellite-italiano-cosmo-skymed/> );
- Terremoto in Pianura Padana Emiliana: i satelliti aiutano a capire come si è deformata la superficie terrestre a causa del terremoto

(<http://ingvterremoti.wordpress.com/2012/05/27/terremoto-in-pianura-padana-emiliana-i-satelliti-aiutano-a-capire-come-si-e-deformata-la-superficie-terrestre-a-causa-del-terremoto/> );

- Terremoto in Pianura Padana: l'individuazione geologica delle sorgenti sismogenetiche ( <http://ingvterremoti.wordpress.com/2012/06/19/terremoto-in-pianura-padana-lindividuazione-geologica-delle-sorgenti-sismogenetiche/>);
- La nuova carta della sismicità in Italia dal 2000 al 2012 (<http://ingvterremoti.wordpress.com/2013/05/16/la-nuova-carta-della-sismicita-in-italia-dal-2000-al-2012/>);
- Terremoto Pianura Padana Emiliana: rilievo macrosismico degli effetti prodotti dal terremoto (<http://ingvterremoti.wordpress.com/2012/05/24/terremoto-pianura-padana-emiliana-rilievo-macrosismico-degli-effetti-prodotti-dal-terremoto/> ).