

ATTI
DELL'ACCADEMIA
DELLE SCIENZE
DI FERRARA



Estratto

Volume 93
Anno Accademico 193
2015-2016

Volume 93
Anno Accademico 193
2015-2016

Proprietario e copyright

Accademia delle Scienze di Ferrara
Palazzo Manfredini - via L.A. Muratori, 9 - 44121 Ferrara
tel. - fax (0532) 205209
e-mail: info@accademiascienze.ferrara.it
sito web: <http://www.accademiascienze.ferrara.it>

Direttore responsabile

Prof. Roberto Tomatis

Redattori

Prof.ssa Giovanna Cavallaro
Prof. Paolo Zanardi Prospero
Dott.ssa Giuliana Avanzi Magagna

Periodicità annuale

Autorizzazione n. 178 Reg. Stampa
in data 6 maggio 1972 del Tribunale di Ferrara

Composto per la stampa

Sara Storari
Studio editoriale Fuoriregistro
via Zucchini, 79 - 44122 Ferrara
e-mail: studiofuoriregistro@gmail.com

ISSN 0365-0464

INDICE GENERALE

Consiglio Direttivo	pag.	5
Note storiche	»	7
I Presidenti dalla fondazione ad oggi	»	13
Elenco dei Soci	»	15
<i>Comunicazioni scientifiche</i>	»	23
INAUGURAZIONE DEL CXCIII ANNO ACCADEMICO	»	25
GIORGIO ZAULI, PAOLA SECCHIERO, ELISA BARBAROTTO, MARIO TIRIBELLI, CARLOTTA ZERBINATI, MARIA GRAZIA DI IASIO, ARIANNA GONELLI, FRANCESCO CAVAZZINI, DIANA CAMPIONI, RENATO FANIN, ANTONIO CUNEO Functional integrity of the p53-mediated apoptotic pathway induced by the nongenotoxic agent nutlin-3 in B-cell chronic lymphocytic leukemia (B-CLL)	»	29
STELLA PATITUCCI UGGERI “La Romanizzazione dell’antico delta padano” aggiornamento archeologico	»	53

GIOVANNI UGGERI “La Romanizzazione dell’antico delta padano” 40 anni dopo: una revisione	» 79
FABIO FABBIAN Prevenzione non farmacologica della calcolosi renale	» 105
STEFANO MANFREDINI, ARIANNA FALLACARA, GIORGIA DE CARIE, SILVIA VERTUANI L’Acido Ialuronico (AI) nei trattamenti estetici, una <i>review</i> critica	» 115
LUIGI PEPE Ariosto e Copernico	» 141
PAOLO STURLA AVOGADRI Ferrara: la cultura, l’Università, le Accademie	» 159
RICCARDO CAPUTO, GABRIELE TARABUSI Il complesso sistema di sorgenti sismogeniche nell’area ferrarese e i loro effetti nella storia	» 161
ALESSANDRA FIOCCA “A cose nuove, uomini nuovi”: filosofi, matematici e tecnici tra bonifiche e trasmissione della scienza antica nella Ferrara del XVI secolo	» 179

*Riccardo Caputo**, *Gabriele Tarabusi***

IL COMPLESSO SISTEMA DI SORGENTI SISMOGENICHE NELL'AREA FERRARESE E I LORO EFFETTI NELLA STORIA

*Relazione svolta
nella seduta accademica
del 7 giugno 2016*

RIASSUNTO

Nel maggio 2012, due terremoti di magnitudo moderata, seguiti da un importante sciame sismico, hanno coinvolto il settore orientale della Pianura Padana. In questa nota si vuole illustrare in modo sintetico il complesso sistema di strutture tettoniche che si trovano sotto i nostri piedi e che, nel loro insieme, costituiscono il prolungamento settentrionale dell'orogene appenninico attualmente sepolto e 'nascosto' dalle coltri alluvionali della Pianura Padana. Il settore più esterno di questa catena montuosa è rappresentato da un sistema di sovrascorrimenti disposti a geometria arcuata: il cosiddetto Arco Ferrarese. Gli eventi sismici del maggio 2012 ed alcuni dei maggiori terremoti storici che hanno colpito Ferrara nei secoli precedenti sono stati causati proprio dalla riattivazione di alcuni segmenti appartenenti a tale complesso sistema deformativo. Quando si verificherà il prossimo evento e dove esattamente non possiamo prevederlo con esattezza ma, visto il contesto tettonico e geodinamico, il fenomeno si ripeterà certamente nel futuro ed è pertanto opportuno fare prevenzione.

COMPLESSITÀ E GERARCHIA DELLE STRUTTURE TETTONICHE

Da un punto di vista geografico, il territorio ferrarese si trova nel settore centro-orientale della Pianura Padana, una vasta area caratterizzata dalla dinamica fluviale del fiume Po e dei suoi affluenti, morfologicamente compresa tra le catene montuose

(*) Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università di Ferrara. Research and Teaching Center for Earthquake Geology, Tyrnavos, Grecia.

(**) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, sezione Roma 1, Bologna, Italy.

dell'Appennino Settentrionale e delle Alpi Meridionali. In termini più strettamente geologici e geodinamici, questa regione è invece parte di un grande bacino di avanfossa che, contrariamente alle apparenze superficiali, è già stato pienamente coinvolto dall'orogenesi appenninica. Il vero fronte della catena appenninica, infatti, non coincide con il limite morfologico tra rilievi e pianura, ma va collocato in corrispondenza delle pieghe emiliane e ferraresi sepolte sotto i sedimenti quaternari padani (PIERI e GROPPi, 1981).

Le strutture deformative sepolte rappresentano il fronte appenninico che sovrascorre verso nord sulla piattaforma padano-veneta articolato in una serie di archi (*figura 1*) disposti a formare una fascia circa parallela al bordo appenninico (PIERI e GROPPi, 1981) e costituita da numerose strutture deformative di diverse dimensioni. Per esempio, alla scala litosferica potremmo considerare l'intero orogene (Appennino Settentrionale) come un unico arco maggiore che rappresenta la sutura continentale tra il blocco di pertinenza europea che sta progressivamente ruotando in senso antiorario e la pacca Adria (DEWEY *et al.*, 1989; ROBERTSON e GRASSO, 1995; MANTOVANI *et al.*, 1997, 2001; MUTTONI *et al.*, 2001; CARMINATI *et al.*, 2004; ROSENBAUM *et al.*, 2004). Questo grande arco mostra una chiara continuità geologica ed evolutiva dall'Italia nord-occidentale, dove si trova in contatto con le Alpi Occidentali lungo la linea Sestri-Voltaggio, fino all'Appennino Meridionale. In tale ottica, potrebbe essere considerato una delle strutture di primo ordine nell'ambito del contesto geodinamico mediterraneo. La sua lunghezza di circa 800 km, la sua geometria e le dimensioni complessive sono una diretta conseguenza di processi tettonici alla scala litosferica.

Osservando un po' più da vicino l'Appennino Settentrionale, è possibile riconoscere alcuni archi di secondo ordine che caratterizzano il settore esterno del prisma di accrezione (PIERI e GROPPi, 1981; BIGI *et al.*, 1990). Questi archi si sono sviluppati durante le fasi deformative degli ultimi 5-6 milioni d'anni (Messiniano-Quaternario) e fra loro mostrano sia lacune, sia parziali sovrapposizioni, ma in generale nette variazioni angolari in termini di orientazione. Le dimensioni tipiche sono nell'intervallo 150-200 km lungo la direzione (o 110-170 km da un'estremità all'altra). Da ovest verso est, questi archi sono quello del Monferrato, quello dell'Emilia, quello di Ferrara e quello dell'Adriatico. Sebbene le strutture esterne siano rappresentate da sovrascorrimenti ciechi più o meno profondamente sepolti dai depositi recenti della Pianura Padana e quindi non visibili in superficie, essi sono stati cartografati in buon dettaglio sulla base di decenni di esplorazioni sismiche dedicate alla ricerca degli idrocarburi effettuate nell'area (PIERI e GROPPi, 1981; FANTONI e FRANCIOSI, 2010;

GHIELMI *et al.*, 2010; GEOMOL TEAM, 2015). Per quanto riguarda la loro dimensione lungo l'immersione, essa è certamente di diverse decine di chilometri, probabilmente 50-70 km. La posizione e le dimensioni di questi archi del secondo ordine sono certamente dovute ad alcune maggiori eterogeneità presenti nella crosta. Alcune di esse potrebbero corrispondere ad alcuni maggiori gradini presenti nel basamento come suggerito da CASSANO *et al.* (1998). La loro origine è probabilmente ereditata da antiche fasi tettoniche e/o processi magmatici che hanno generato la sequenza di sporgenze e rientranze (*salient e reentrant*) che si osservano in mappa (*figura 1*).

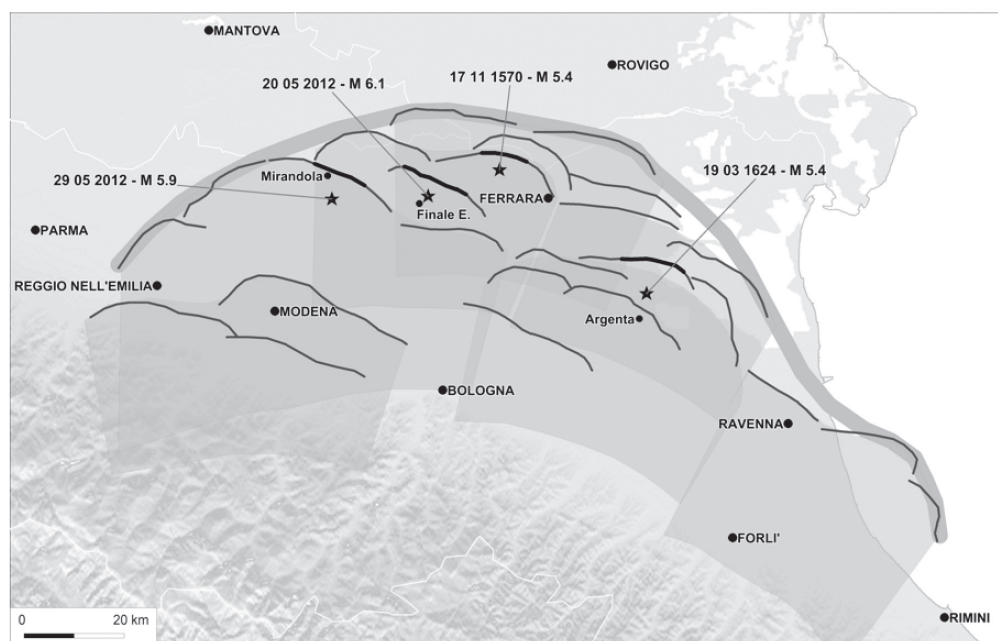


Figura 1. Settore esterno, sepolto, della catena appenninica settentrionale in corrispondenza dell'Arco di Ferrara, in cui sono rappresentate le principali strutture compressive di diverso ordine gerarchico: secondo ordine, Arco di Ferrara (linea spessa grigia); terzo ordine (aree grigie semitrasparenti) e quarto ordine (linee grigie scure) in rapporto agli epicentri delle scosse principali della sequenza del maggio 2012 e dei due maggiori terremoti storici. Con un tratto più spesso e scuro sono indicati i segmenti del quarto ordine che è possibile ipotizzare si siano attivati nei diversi casi.

All'interno degli archi di secondo ordine si possono distinguere strutture gerarchicamente inferiori (terzo ordine) che ancora mantengono una geometria più o

meno arcuata. Per la loro descrizione ci concentreremo sull'Arco di Ferrara perché tra quelli del secondo ordine è quello più prominente e probabilmente più attivo di tutto il prisma di accrezione appenninico nonché l'oggetto del presente contributo. Simili osservazioni possono comunque essere fatte sugli archi contigui. La lunghezza delle strutture di terzo ordine varia tra 50 e 90 km lungo la direzione e circa 10-20% meno da un estremo all'altro. Queste strutture mostrano inter-relazioni geometriche complesse sia verticalmente che lateralmente. Nel primo caso, la proiezione in carta delle superfici che si estendono in profondità sono in genere largamente sovrapposte; nel secondo caso, invece, le loro estremità superiori sono interessate da sovrapposizioni da parziali a totali e *overstep* locali. In tutti i casi, è possibile distinguerle per le nette variazioni angolari dei loro parametri geometrici. Le strutture del terzo ordine largamente coincidono con le cosiddette sorgenti composite (*composite sources*) contenute nel Database Italiano delle Sorgenti Sismogeniche (DISS WG, 2015). Questa classe di strutture è legata a variazioni stratigrafiche regionali, e conseguentemente meccaniche, presenti principalmente nelle coperture sedimentarie coinvolte nel prisma di accrezione. Ad esempio, alcune delle maggiori faglie bordiere fra *horst* e *graben* sviluppatasi durante la distensione litosferica giurassica hanno introdotto forti e nette variazioni nelle coeve successioni sedimentarie e ciò ha certamente influenzato o addirittura governato la posizione e l'orientazione dei sovrascorrimenti neogenico-quadernari durante la collisione. Queste strutture del terzo ordine si sono probabilmente formate per il ripetersi di fenomeni di collegamento (*linkage*) fra diverse faglie minori. Un aspetto cruciale per questa classe di strutture è la tipologia di limite fra i diversi segmenti (*segment boundary*) ed in particolare risulta fondamentale distinguere se essi sono deboli o forti (*soft-* oppure *hard-boundary*). Nel primo caso, infatti, è più probabile che il processo di propagazione della rottura sismogenica possa continuare dal segmento ipocentrale ad uno contiguo; mentre nel secondo caso, un limite forte tende ad arrestare la propagazione al/ai segmento/i vicino/i e, conseguentemente, l'area di rottura finale durante la scossa principale è generalmente limitata ad una singola struttura. Viste in sezione verticale, queste strutture potrebbero essere considerate come rami (*splay faults*) di uno scollamento maggiore profondo e relativamente continuo, che sostanzialmente corrisponde agli archi del secondo ordine.

Osservando con ancora maggior dettaglio l'Arco di Ferrara, è possibile riconoscere anche strutture gerarchicamente inferiori (quarto ordine) tipicamente lunghe da 10 a 30 km e probabilmente larghe, lungo l'immersione, tra 8 e 20 km. A differenza delle strutture gerarchicamente superiori, queste faglie sono generalmente caratterizzate da

angoli di direzione ed inclinazione mediamente uniformi (*i.e.* a geometria circa planare) anche se è ancora possibile osservare alcune deviazioni laterali minori. Queste faglie rappresentano i principali segmenti che compongono le strutture del terzo ordine. A tal riguardo, un aspetto di fondamentale importanza a cui bisognerebbe dedicare in futuro indagini specifiche e dettagliate è rappresentato proprio dalla tipologia di limite che esiste tra i diversi segmenti: debole o forte. L'estremità superiore di queste faglie inverse è generalmente nell'intervallo 2-5 km, mentre in profondità esse sono collegate geometricamente alla superficie di scollamento del secondo ordine. Per questo motivo, la loro dimensione lungo l'immersione (larghezza) non può essere vincolata con certezza; essa infatti potrebbe corrispondere sia alla transizione fragile-ductile (*brittle-ductile transition*) intorno ai 15-20 km ma anche essere limitata in profondità dall'intersezione con la struttura maggiore (*branch line*).

Le strutture del quarto ordine probabilmente corrispondono a, e si comportano come, asperità sismiche maggiori, dove lo scivolamento cosismico si concentra quando si verifica la rottura sismogenica. Tenuto conto delle loro dimensioni, la tipica magnitudo massima attesa associata alle strutture del quarto ordine è di circa 6.1 ± 0.3 , anche se in caso di attivazione dinamica di segmenti contigui o limitrofi la magnitudo massima potrebbe essere maggiore (6.3 ± 0.3). Non necessariamente questi valori di magnitudo si verificano ad ogni loro riattivazione in quanto si può sempre verificare una rottura parziale che non rilascerebbe quindi tutta l'energia associata alla faglia.

Ad esempio, l'evento sismico del 20 maggio 2012 ha probabilmente riattivato quasi per intero una struttura del quarto ordine, mentre il terremoto del 29 maggio soltanto una parte di un distinto segmento. Similmente, sulla base dei dati disponibili, anche per gli eventi di Ferrara del 17 novembre 1570 e di Argenta del 19 marzo 1624, si può ipotizzare che attivarono forse solo parzialmente sorgenti sismogeniche corrispondenti a strutture del quarto ordine (DISS WG, 2015). Da queste considerazioni si evince che per la comprensione delle strutture tettoniche che interessano l'area non si possa prescindere dall'analisi della sismicità storica. Nelle pagine che seguono vengono quindi descritti in sintesi i principali effetti dei terremoti del passato nell'area ferrarese.

SISMICITÀ STORICA

Il Database Macrosismico Italiano, DBMI15 (LOCATI *et al.*, 2016), utilizzato per la compilazione del più recente Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, CPTI15

(ROVIDA *et al.*, 2016), consente di ricostruire la storia sismica delle principali località che si trovano entro l'area di interesse a partire dall'anno 1000 fino al 2014 (intervallo temporale coperto dal catalogo CPTI15). In *figura 2* sono riportati gli epicentri dei principali eventi noti dalla sismologia storica e di quelli registrati in tempi recenti dalla rete strumentale.

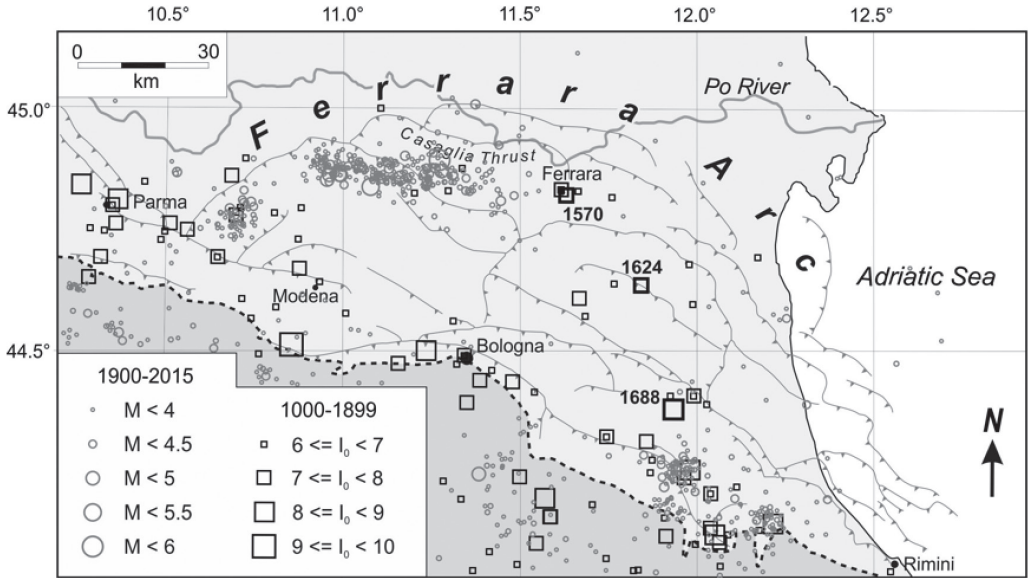


Figura 2. Sismicità storica e strumentale.

La più recente versione del Catalogo dei Forti Terremoti Italiani, il CFTI4Med (GUIDOBONI *et al.*, 2007), che come studio rappresenta la fonte principale del DBMI per i terremoti più forti, riporta, oltre al dato parametrico di intensità, anche il dettaglio delle sintesi descrittive degli effetti, generali e nelle singole località, per buona parte dei terremoti che hanno interessato questa porzione di Pianura Padana.

Nel XVI secolo si è verificata la sequenza sismica che con ogni probabilità può essere considerata la più importante degli ultimi mille anni associata all'Arco Ferrarese (almeno fino al verificarsi di quella del 2012), quando quattro scosse molto forti colpirono l'area ed in particolare la città di Ferrara, tra il 1570 e il 1571 (GUIDOBONI, 1984). Tale sequenza per molti aspetti ricorda quanto osservato nel 2012. La sintesi dei maggiori effetti, compresi quelli sull'ambiente, di tale

terremoto, così come riportata dal CFTI4Med, presenta molte analogie con quanto verificatosi nel 2012:

Le fonti ferraresi ricordano concordemente una lunga serie di scosse iniziata nelle prime ore del 17 novembre e continuata per tutta la giornata. Le quattro più forti sono ricordate con precisione oraria: la prima avvenne alle ore 9:30 italiane (1:40 GMT ca.) e causò il crollo di molti merli, terrazzini e comignoli, che cadendo danneggiarono molti tetti. Numerose repliche si susseguirono durante la stessa notte e nella mattinata successiva; fra queste le più forti furono quella delle ore 20 italiane (12:10 GMT ca.), che scosse violentemente le case, lesionando leggermente le murature, e quella delle ore 24 (16:10 GMT ca.), che causò il crollo di comignoli e cornicioni e gravi lesioni nelle murature. La scossa principale avvenne alle ore 3 (19:10 GMT ca.), colpì edifici già notevolmente lesionati e sconnessi e causò i danni più gravi. A Ferrara fu danneggiata soprattutto la parte medievale della città, dove alcuni edifici crollarono totalmente e quasi tutti gli altri subirono caduta di muri e tetti, lesioni e sconnessioni di pareti, che resero in gran parte inagibili sia gli edifici pubblici, sia le abitazioni private. I danni maggiori riguardarono gli edifici sviluppati in altezza: chiese, campanili, palazzi con soffitti a volta. Le scosse colpirono soprattutto gli edifici posti all'estremità delle vie, che non erano sostenuti da altre costruzioni. Diversi dettagli si hanno anche sull'edilizia privata: risulta danneggiato circa il 40% delle abitazioni. Fuori dalla città, in un raggio di circa 15-20 km, notevoli danni subirono circa 30 paesi e villaggi della campagna, dei quali sono documentati soprattutto i danni agli edifici religiosi. La scossa fu sentita in una vasta area comprendente le principali città emiliane, Milano, Padova e Venezia a nord; Pesaro a sud. Il quadro complessivo degli effetti è cumulativo delle scosse del 17 novembre. Numerosissime e frequenti furono le repliche ricordate e descritte dalle fonti fino ai primi mesi del 1572; qualche scossa fu avvertita anche nel 1573 e nel 1574. Si verificarono effetti di liquefazione del terreno nell'area urbana di Ferrara e nelle immediate vicinanze (in alcuni casi con emissione di fumi o con fuoriuscita di sabbie bollenti) e apertura di fessure con fuoriuscita di "una schiuma nera". Presso Stellata il Po subì un temporaneo arresto del flusso delle acque; il loro innalzamento e il successivo rapido abbassamento causarono danni ai mulini.

In *figura 3* sono riportate le mappe degli effetti macrosimici espressi in scala Mercalli Cancani Sieberg (MCS; SIEBERG, 1932), dei due principali terremoti storici dell'area, il già citato "terremoto di Ferrara" del 1570 e il "terremoto di Argenta" del 19 marzo 1624.

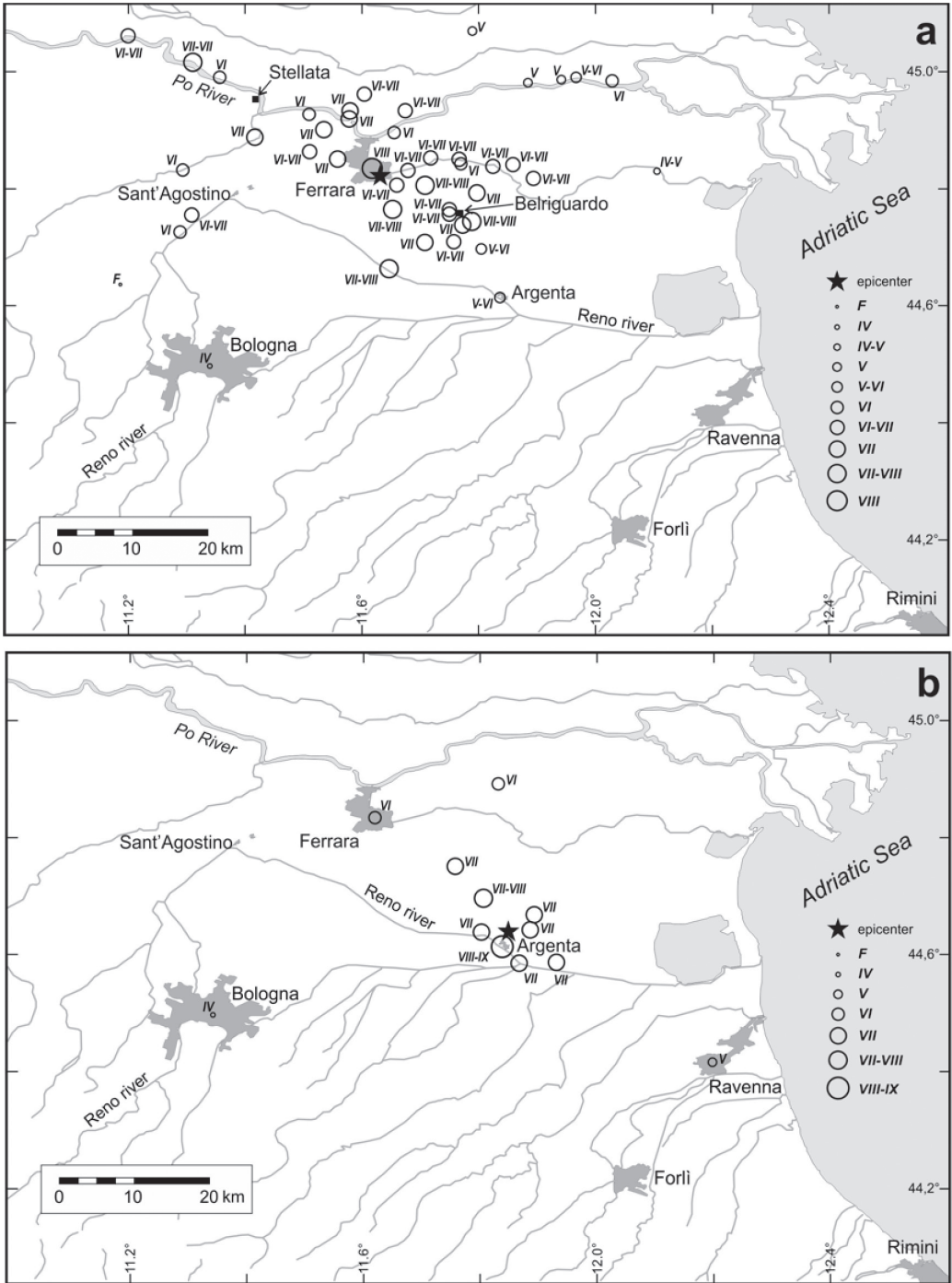


Figura 3. Mappa delle intensità macrosismiche (scala MCS) dei terremoti a) di Ferrara del 17 novembre 1570 e b) di Argenta del 19 marzo 1624 (dati da DBMI15).

La storia sismica di Ferrara, tra il 1000 e il 2004, desumibile dai dati del DBMI15 è rappresentata da ben 130 eventi risentiti in città, di cui 21 hanno certamente prodotto danni (Intensità MCS ≥ 6). Tali eventi sono riportati nel grafico di *figura 4*.

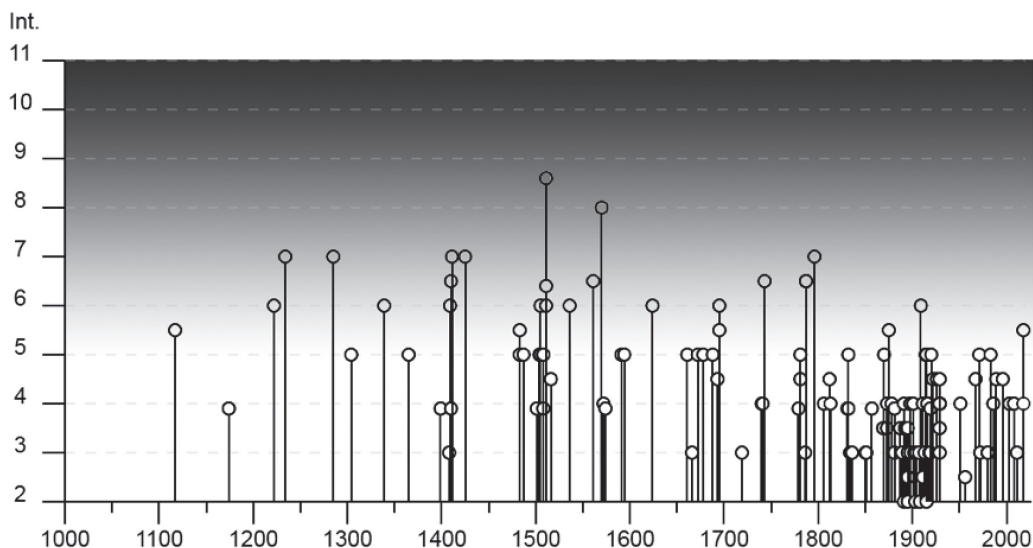


Figura 4. Grafico che riporta la cronologia degli effetti dei terremoti storici a Ferrara espressi in scala MCS dal DBMI (fino al 2004) a cui sono aggiunti i risentimenti della sequenza del 2012. Le intensità che rientrano nel campo grigio sfumato sono quelle oltre la soglia del danno agli edifici.

SEQUENZA SISMICA DEL 2012

Il 20 e 29 maggio 2012 due terremoti e la loro sequenza di *aftershock* hanno colpito la Pianura Padana centrale a circa 40 km a nord di Bologna. La sequenza sismica è stata originata dall'attivazione di due segmenti ciechi dell'Arco Ferrarese disposti *en-echelon* con "passo sinistro" (*left-stepping*), di circa 20 km ciascuno, entrambi caratterizzati da cinematica puramente compressiva (*figura 1*).

Alle 4:03 locali (2:03 UTC) del 20 maggio 2012 un forte terremoto di magnitudo $M_L = 5.9$ e $M_w = 6.1$ (PONDRELLI *et al.*, 2012), con epicentro localizzato dalla Rete Sismica Nazionale INGV a nord dell'abitato di Finale Emilia, al confine con il Comune di Mirandola, ha interessato un'ampia area della Pianura Padana con i

maggiori effetti concentrati nelle province di Modena, Ferrara, Mantova, Bologna e Rovigo. Con tale scossa, anticipata poche ore prima da un primo evento di $M_L = 4.1$, ha avuto inizio una lunga sequenza sismica, che ha dato luogo ad altre 7 scosse di $M_L > 5$, la più forte delle quali è stata quella del 29 maggio, alle 7:00 UTC, di $M_L = 5.8$ e $M_w = 5.9$ (PONDRELLI *et al.*, 2012) nei primi 10 giorni, 14 scosse di $M_L > 5$ nei primi 15 giorni, dettagliate in tabella 1 e diverse centinaia di repliche di magnitudo inferiore.

Tempo origine (UTC)				
(yyyy/mm/dd hh:mm:ss)	Lat (°)	Lon (°)	Prof. (km)	Magnitudo
03/06/2012 19:20:43	44.886	10.95	8.7	4.7 -- M_w
29/05/2012 11:00:23	44.866	10.976	7.2	5.1 -- M_L
29/05/2012 11:00:02	44.856	10.941	8.7	5.0 -- M_L
29/05/2012 10:55:57	44.865	10.98	4.4	5.3 -- M_w
29/05/2012 08:27:23	44.883	11.042	6	4.6 -- M_L
29/05/2012 08:25:51	44.865	10.948	7.9	5.0 -- M_L
29/05/2012 07:00:03	44.842	11.066	8.1	5.6 -- M_w
20/05/2012 17:38:14	44.88	11.253	3.7	4.6 -- M_L
20/05/2012 13:18:02	44.814	11.441	3.4	4.9 -- M_w
20/05/2012 03:02:47	44.86	11.152	9.1	5.0 -- M_L
20/05/2012 02:07:29	44.874	11.27	6.1	5.0 -- M_L
20/05/2012 02:06:26	44.905	11.165	4.3	4.8 -- M_L
20/05/2012 02:06:12	44.879	11.12	5	4.8 -- M_L
20/05/2012 02:03:50	44.896	11.264	9.5	5.8 -- M_w

Tabella 1. Informazioni di sintesi relative alle 14 scosse con magnitudo superiore a 4.5, con evidenziazione delle righe relative alle due principali della sequenza. I dati sono tratti dalla banca dati ISIDE (ISIDE Working Group, 2010), che riporta valori di magnitudo mediamente inferiori a quelle indicate da Pondrelli *et al.* (2012), in ragione di una diversa metodologia utilizzata per il calcolo.

EFFETTI SULL' AMBIENTE NELLA SEQUENZA SISMICA DEL 2012

La sequenza sismica del maggio 2012 ha causato diffusi fenomeni di liquefazione dei terreni, dando origine, su un areale piuttosto ampio, a diverse ed evidenti manifestazioni superficiali, quali fratture, estese anche per diverse decine di metri, e fuoriuscita di sabbie e limi dal terreno. Tali effetti locali hanno assunto particolare rilevanza nei centri abitati di San Carlo, frazione di Sant'Agostino, e di Mirabello, in provincia di Ferrara, dove, oltre alle evidenze sul terreno libero, hanno prodotto diffusi danneggiamenti a carico dei manufatti, che il solo scuotimento non avrebbe potuto provocare (GALLI *et al.*, 2012). Gli effetti secondari successivi alla liquefazione hanno infatti reso temporaneamente inagibili alcuni edifici, tratti di strade e le reti di servizi presenti (GRUPPO DI LAVORO PER LA VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DI LIQUEFAZIONE A SEGUITO DEI TERREMOTI DEL 20 E 29 MAGGIO 2012, 2012). Per una valutazione approfondita di tali effetti, diversi enti e istituti hanno costituito e inviato squadre di tecnici specializzati che hanno eseguito rilievi specifici nei giorni immediatamente successivi alle scosse, anche attraverso riprese aeree.

A seguito di tale attività si sono ottenuti numerosi dati puntuali che hanno fornito un quadro piuttosto completo dei fenomeni di liquefazione verificatisi a seguito della scossa del 20 maggio ed in misura minore, limitata alla porzione più occidentale dell'area epicentrale, a seguito di quella del 29 maggio.

Gli effetti della liquefazione immediatamente osservabili sono stati: cedimenti uniformi e/o differenziali e basculamenti delle strutture, fuoriuscite di acqua e terreno nella tipica forma di vulcanelli (*sand boils*), dislocazioni laterali del terreno (*lateral spreading*), questi ultimi in terreni stratificati o in caso di gradienti topografici.

Per quanto riguarda la natura geologica dei siti, le zone a più alto rischio sono: letti di fiume antichi e recenti, paludi, terreni di bonifica, argini, pianure di esondazione, spiagge, zone dunari e interdunari, ecc. Infine è da sottolineare che in uno stesso sito durante lo stesso terremoto gli effetti della liquefazione possono essere di diversa gravità in campo libero e in presenza di costruzioni. La severità del danno alle costruzioni dipende infatti non solo dalla natura del terreno ma anche dalle caratteristiche geometriche e strutturali degli edifici e del loro sistema di fondazioni (CREPELLANI *et al.*, 2012).

In sintesi, i principali effetti osservati sul terreno in conseguenza dei fenomeni di liquefazione sono stati la formazione di vulcanelli, crateri, venute di acqua e sabbia, fuoriuscita da pozzi, rigonfiamenti e rotture del terreno, cedimenti, sollevamenti di marciapiedi, deformazioni orizzontali (*figura 5*).



Figura 5. Vulcanelli e fratture con fuoriuscita di sabbia verificatisi nei pressi di San Carlo (frazione del Comune di Sant'Agostino).

È da notare come tutti i casi di liquefazione osservati sembrano rientrare in zone interessate dalla colmata di vecchi alvei ed argini (prevalentemente dei fiumi Reno e Panaro) (NINFO *et al.*, 2012; PAPHATHANASSIOU *et al.*, 2012; GALLI *et al.*, 2012). La disposizione lungo direttrici lineari principalmente NE-SW dei più evidenti fenomeni di liquefazione rilevati nei due centri abitati di San Carlo e Mirabello corrisponde infatti esattamente ad uno sviluppo lineare di corpi sabbiosi, derivati dalla presenza del paleoalveo del fiume Reno e da tutte le opere di bonifica e regolazioni idrauliche che si sono succedute nei secoli (riempimenti, argini, ecc.) (NINFO *et al.*, 2012; CREPELLANI *et al.*, 2012).

In Italia fenomeni di liquefazione erano già stati descritti in occasione di vari terremoti (GALLI e MELONI, 1993). In Emilia Romagna in particolare, se per i terremoti costieri di Cesenatico del 1875 e Rimini 1916 si riportano notizie di spaccature nel suolo e risalite d'acqua, in occasione del terremoto di Ferrara del 1570 e di quello di Argenta del 19 marzo 1624 (di intensità epicentrale di grado VII-VIII MCS), le fonti storiche riportano descrizioni di effetti del tutto analoghi a quelli osservati nel 2012. Per quest'ultimo evento, il CFTI4Med (GUIDOBONI *et al.*, 2007), riporta la seguente sintesi descrittiva degli effetti sull'ambiente:

gli effetti prevalenti sono localizzati ad Argenta dove si aprirono spaccature nel terreno da cui fuoriuscirono acqua bollente e sabbia nera e grigia maleodorante; le acque dei pozzi subirono violente variazioni e furono gettate fuori miste a sabbia.

A seguito della sequenza sismica del 2012, attraverso l'esecuzione di una trincea in località San Carlo, si sono potute fare interessanti osservazioni stratigrafiche e considerazioni paleosismologiche. In particolare, si è potuta riscontrare l'occorrenza di fenomeni di liquefazione con risalita di sabbie lungo fratture a seguito di eventi sismici verificatisi in tempi storici (CAPUTO *et al.*, 2016). Lo studio conferma la persistenza negli stessi luoghi del fenomeno della liquefazione dei terreni in coincidenza di un terremoto e attraverso considerazioni stratigrafiche ipotizza che l'evento che ha originato la risalita di sabbie osservata possa essere quello di Ferrara del 1570.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Osservando la carta in *figura 1* si può notare che nella regione intorno a Ferrara sono presenti numerose strutture del quarto ordine. Considerando anche le velocità di raccorciamento in direzione NNE-SSO documentate in Pianura Padana (SERPELLONI *et al.*, 2015) è possibile stimare tassi di scivolamento (*slip rates*) per le singole faglie di circa 0.1-0.5 mm/a e da questi valori inferire tempi medi di riattivazione di parecchi secoli e probabilmente oltre il millennio (DISS WG, 2015).

Sulla base di quanto detto precedentemente, potremmo tentativamente assumere che tutte le strutture del quarto ordine, o almeno la loro maggior parte, costituiscono potenziali sorgenti sismiche capaci di generare terremoti confrontabili a quelli del maggio 2012. Soltanto per poche di tali strutture si hanno informazioni certe o

ragionevoli di riattivazioni recenti, siano esse pressoché totali o parziali e comunque associate a magnitudo non molto diverse da quella massima attesa.

In conclusione, e nonostante non sia possibile ad oggi effettuare previsioni a breve termine, tali cioè da avere finalità pratiche di protezione civile, quali ad esempio evacuazioni preventive, si può affermare con sicurezza che la storia sismica di Ferrara non è conclusa. D'altra parte, è sufficiente osservare i risentimenti macrosismici (espressi dai valori di intensità MCS in *figura 4*) degli ultimi nove secoli (oltre 130 eventi ad oggi di cui oltre 20 hanno certamente prodotto danni), per comprendere che anche i prossimi non potranno essere molto diversi in termini di quantità e intensità. Dobbiamo quindi aspettarci che ogni lustro o poco più la città di Ferrara risenta di un terremoto, che più probabilmente non produrrà danni rilevanti (o un evento vicino di magnitudo leggera o un evento lontano di magnitudo moderata), ma che almeno due volte ogni secolo causerà un danneggiamento più o meno severo al patrimonio edilizio (evento vicino di magnitudo moderata). Nonostante le incertezze dei suddetti tempi di ritorno e senza voler fare previsioni, si fa comunque notare che l'ultimo risentimento caratterizzato da un certo livello di danneggiamento (intensità MCS \geq 6) risale al 1909.

BIBLIOGRAFIA

BIGI G., COSENTINO D., PAROTTO M., SARTORI R. e SCANDONE P. (1990): *Structural Model of Italy: Geodynamic project*, C.N.R.. Firenze, S.EL.CA., scale 1:500.000, 6 sheets.

CAPUTO R., POLI M.E., MINARELLI L., RAPTÌ D., SBORAS S., STEFANI M. and ZANFERRARI A. (2016): *Palaeoseismological evidence for the 1570 Ferrara earthquake*, Italy. *Tectonics*, 35, 1423-1445, doi: 10.1002/2016TC004238.

CARMINATI E., DOGLIONI C. e SCROCCA D. (2004): *Alps vs Apennines*, in: Crescenti U., D'Offizi S., Merlino S. e Sacchi L. (Eds), *Geology of Italy*, Spec. vol. Italian Geol. Soc. IGC 32 Florence-2004, 141-151.

CASSANO E., ANELLI L., CAPPELLI V. e LA TORRE P. (1998): *Interpretation of Northern-Apennine magnetic and gravity data in relation to the profile CROP-03*, Mem. Soc. Geol. It., 52, 413-425.

CREPELLANI T., FACCIORUSSO J., GHINELLI A., MADIÀ C., RENZI S. e VANNUCCHI G. (2012): *Rapporto preliminare sui diffusi fenomeni di liquefazione verificatisi durante il terremoto in Pianura Padana Emiliana del maggio 2012*, Università di Firenze, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Sez. Geotecnica.

DEWEY J.F., HELMAN M.L., TURCO E., HUTTON D.H.W. e KNOTT S.D. (1989): *Kinematics of the western Mediterranean*. In: Coward M.P., Dietrich D. E Park R.G. (Eds.), *Alpine Tectonics*. Geol. Soc. London Spec. pubbl. 45, pp. 265-283.

DISS WORKING GROUP (2015): *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, © INGV 2015, [Online], <http://diss.rm.ingv.it/diss/>.

FANTONI R. e FRANCIOSI R. (2010): *Tectono-sedimentary setting of the Po Plain and Adriatic foreland*. Rend. Fis. Acc. Lincei, 21 (suppl.), 197-208, doi: 10.1007/s12210-010-0102-4.

GALLI P. e MELONI F. (1993): *Nuovo catalogo nazionale dei processi di liquefazione avvenuti in occasione dei terremoti storici in Italia*, Il Quaternario, vol. 6, no. 2, pp. 271-292.

GALLI P., CASTENETTO S. e PERONACE E. (2012): *May 2012 Emilia Earthquakes (Mw 6, Northern Italy): Macroseismic Effects Distribution and Seismotectonic Implications*, *Alpine and Mediterranean Quaternary*, vol. 25, May, pp. 105-123.

GEO MOL TEAM (2015): *GeoMol – Assessing subsurface potentials of the Alpine Foreland Basins for sustainable planning and use of natural resources – Project Report*, Augsburg, LfU, p. 188 pp.

GHIELMI M., MINERVINI M., NINI C., ROGLEDI S., ROSSI M. e VIGNOLO A. (2010): *Sedimentary and tectonic evolution in the eastern Po-Plain and northern Adriatic Sea area from Messinian to Middle Pleistocene (Italy)*. Rend. Fis. Acc. Lincei, 21, Suppl. 1, S131-S166, doi: 10.1007/s12210-010-0101-5.

GRUPPO DI LAVORO PER LA VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DI LIQUEFAZIONE A SEGUITO DEI TERREMOTI DEL 20 E 29 MAGGIO 2012 (2012): *Primo rapporto sugli effetti della liquefazione osservati a S. Carlo, frazione di S. Agostino (Provincia di Ferrara)*, Regione Emilia-Romagna, http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-di-lavoro/rapporto_sancarlo.pdf/at_download/file/rapporto_sancarlo.pdf.

GUIDOBONI E. (1984): *Riti di calamità: terremoti a Ferrara nel 1570-74*, Quaderni storici, numero monografico “Calamità Paure Risposte” a cura di CARACCILO A. e CALVI G., no. 55, pp. 107-135.

GUIDOBONI E., FERRARI G., MARIOTTI D., COMASTRI A., TARABUSI G., VALENSISE G. e INGV-SGA (2007): *CFTI4Med, Catalogue of Strong Earthquakes in Italy (461 B.C.-1997) and Mediterranean Area (760 B.C.- 1500)*., [Online], <http://storing.ingv.it/cfti4med/>.

ISIDE WORKING GROUP (2010): *Italian Seismological Instrumental and parametric database*, [Online], <http://iside.rm.ingv.it>.

LOCATI M., CAMASSI R., ROVIDA A., ERCOLANI E., BERNARDINI F., CASTELLI V., CARACCILO C.H., TERTULLIANI A., ROSSI A., AZZARO R., D'AMICO S., CONTE S., ROCCHETTI E. (2016). *DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15>.

MANTOVANI E., ALBARELLO D., TAMBURELLI C., BABBUCCI D. e VITI M. (1997): *Plate convergence, crustal delamination, extrusion tectonics and minimization of shortening work as main controlling factors of the recent Mediterranean deformation pattern*. Ann. Geofisica, 40(3), 611-643.

MANTOVANI E., VITI M., BABBUCCI D., TAMBURELLI C. e ALBARELLO D. (2001): *Back arc extension: which driving mechanism?* J. Virtual Exp., 3, 17-44.

MUTTONI G., GARZANTI E., ALFONSI L., CIRILLI S., GERMANI D. e LOWRIE W. (2001): *Motion of Africa and Adria since the Permian: paleomagnetic and paleoclimatic constraints from northern Libya*. Earth Plante. Sci. Letts., 192, 159-174.

NINFO A., ZIZIOLI D., MEISINA C., CASTALDINI D., ZUCCA F., LUZI L. e DE AMICIS M. (2012): *The survey and mapping of sand-boil landforms related to the Emilia 2012 earthquakes: Preliminary results*, Annals of Geophysics, vol. 55, no. 4, pp. 727-733, DOI: 10.4401/ag-6114.

PAPATHANASSIOU G., CAPUTO R. e RAPT-CAPUTO D. (2012): *Liquefaction phenomena along the paleo-Reno River caused by the May 20, 2012, Emilia (northern Italy) earthquake*, Annals of Geophysics, vol. 55, no. 4, pp. 735-742, DOI: 10.4401/ag-6147.

PIERI M. e GROPPI G. (1981): *Subsurface geological structure of the Po Plain (Italy)*, Progetto Finalizzato Geodinamica, Pubblicazione 414, C.N.R.

PONDRELLI S., SALIMBENI S., PERFETTI P. e DANECEK P. (2012): *Quick regional centroid moment tensor solutions for the Emilia 2012 (Northern Italy seismic sequence)*, Ann. Geophys., vol. 55, no. 4, pp. 615-621, DOI: 10.4401/ag-6146.

ROBERTSON A.H.F. e GRASSO M. (1995): *Overview of the Late Tertiary-Recent tectonic and palaeo-environmental development of the Mediterranean region*. Terra Nova, 7(2), 114-127.

ROSENBAUM G., LISTER G.S. e DUBOZ C. (2004): *The Mesozoic and Cenozoic motion of Adria (central Mediterranean): a review of constraints and limitations*. Geodin. Acta, 17(2), 125-139.

ROVIDA A., LOCATI M., CAMASSI R., LOLLI B. e GASPERINI P. (eds) (2016): *CPTI15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPTI15>.

SERPELLONI E., DANESI S., TOLOMEI C., CAVALIERE A., GUALANDI A., ANDERLINI L. e SALIMBENI S. (2015): *D4/a1.2 – New geodetic and seismological constraints on active shortening across the pede Apennines and pede Alpine region*. In: ARGNANI A. (Resp.) DPC-INGV 2014-15 Project S1, *Final Report*, 58-82.

SIEBERG A. (1932): *Der Erdbeben, Handbuch der Geophysik*, vol. 4, pp. 550-555.