



Terremoti dell'Emilia - Maggio 2012

RILIEVO MACROSISMICO MCS SPEDITIVO¹

Rapporto finale

15 Giugno 2012

P. Galli¹, S. Castenetto¹, E. Peronace²

1 – Dipartimento della Protezione Civile Nazionale, Roma

2 – CNR-IGAG, Roma

INTRODUZIONE

A seguito dei forti eventi sismici che hanno colpito prevalentemente le provincie di Modena e Ferrara nell'ultima decade di Maggio 2012, a partire dalla mattina del 20 il Dipartimento della Protezione Civile ha intrapreso il rilievo macrosismico delle località interessate dai terremoti, al fine di indentificare e classificare nel più breve tempo possibile ed in modo omogeneo ed oggettivo le aree danneggiate.

Il rilievo è stato condotto utilizzando la scala Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS; Sieberg, 1930), secondo la metodologia prevista da Molin (2003 e 2009) per le finalità precipue del Dipartimento della Protezione Civile, ed è proseguito per diversi giorni, sia per la vastità dell'area mesosismica, sia per il ripetersi degli eventi sismici (Tab. 1) che, almeno in un'occasione (*mainshock* del 29 Maggio, Mw 5.96), hanno prodotto un aggravamento degli effetti e, purtroppo, altre 19 vittime oltre alle 7 della prima scossa.

¹ Documento citabile come: *Galli P., Castenetto S., Peronace E., 2012. Terremoto dell'Emilia, Maggio 2012. Rilievo macrosismico speditivo. Dipartimento della Protezione Civile Nazionale, Roma, 26 pp., <http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/TerremotoEmiliaMCS.pdf>*

Inizialmente, tra il *mainshock* del 20 Maggio e quello del 29 Maggio, le squadre di rilevamento macrosismico hanno condotto osservazioni dirette in 52 località afferenti a 30 diversi comuni, ripetendo poi in gran parte il rilievo dopo il secondo *mainshock* ed estendendolo sino al 15 Giugno 2012 a circa 190 località afferenti a 87 comuni sparsi in 6 provincie dell'Emilia Romagna, Lombardia e Veneto, ed in particolare in quelle di Modena (52 località), Ferrara (32), Bologna (22), Reggio Emilia (14), Mantova (53) e Rovigo (11).

data	ora GMT	Latitudine	Longitudine	Profondità	MI CNT	Mw RCMT	Io
20/05/2012	02.03.52.0	44.889	11.228	6.3	5.9	6.11	VII
20/05/2012	02.06.30.0	44.886	11.189	7.7	4.8	-	-
20/05/2012	02.07.31.0	44.863	11.37	5	5.1	-	-
20/05/2012	03.02.50.0	44.86	11.095	10	4.9	5.05	-
20/05/2012	13:18:02.0	44.831	11.49	4.7	5.1	5.18	-
20/05/2012	17:37:14.0	44.876	11.382	3.2	4.5	4.52	-
29/05/2012	07.00.03.0	44.851	11.086	10.2	5.8	5.96	VII
29/05/2012	08:25:51.0	44.901	10.943	3.2	4.5	4.69	-
29/05/2012	08:27:23.0	44.854	11.106	10	4.7	-	-
29/05/2012	10:55:57.0	44.888	11.008	6.8	5.3	5.53	-
29/05/2012	11:00:02.0	44.873	10.95	11	4.9	-	-
29/05/2012	11:00:25.0	44.879	10.947	5.4	5.2	-	-
03/06/2012	19:20:43.0	44.899	10.943	9.2	5.1	4.89	-

Tab. 1 – Eventi con magnitudo (MI) ≥ 4.5 registrati tra il 20 Maggio ed il 15 Giugno 2012 nell'area epicentrale dei terremoti emiliani del Maggio 2012. L'ultima colonna fornisce l'intensità epicentrale valutata per i due *mainshocks*.

Come accennato, l'attribuzione dei valori d'intensità ai centri abitati è stata effettuata applicando la scala macrosismica Mercalli-Cancani-Sieberg e non la più moderna *European Macroseismic Scale* (EMS, 1998), utilizzata nel rilievo parallelo condotto dai ricercatori dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia su molte delle località interessate dalla sequenza ed alla quale si rimanda per valutazioni diverse rispetto a quelle offerte in questo report.

Di fatto, dal momento che la scala MCS tiene conto solo in parte della differente vulnerabilità degli edifici, essa permette una più rapida applicazione in fase di rilevamento, fornendo valutazioni correlate direttamente al livello di danneggiamento, ovvero quelle di maggiore interesse ai fini di protezione civile e della gestione dell'emergenza.

E' opportuno ricordare che dall'esame specifico della scala MCS, Molin (2003; 2009) ha derivato una distinzione degli effetti in cinque livelli di danno, utilizzati nel presente rilievo e riassumibili come segue:

- 1) **danni leggeri**, ovvero: leggere spaccature negli intonaci con limitati distacchi degli stessi; possibile caduta di qualche tegola o pietra di camino;
- 2) **danni moderati**, ovvero: lievi lesioni nei muri, notevole caduta di intonaci e stucchi, mattoni e tegole; molti fumaioli vengono lesi da incrinature con fuoriuscita di pietre; camini si rovesciano sopra il tetto e lo danneggiano; da torri e costruzioni alte cadono decorazioni mal fissate;
- 3) **danni gravi**, tali da produrre “inabitabilità”; corrispondono a gravi lesioni nei muri, che al momento possono pregiudicare la stabilità degli edifici, ma che possono essere riparate; gli edifici sono quindi recuperabili;
- 4) **distruzioni**, corrispondono a gravissime lesioni nei muri a crolli parziali, tali da rendere non recuperabili gli edifici;
- 5) **crolli**, pressoché totali.

Dalle descrizioni dei gradi d'intensità compresi tra il V ed il XII, sempre Molin (2003; 2009) ha derivato, modificato ed integrato le progressioni di danno e le percentuali di danneggiamento secondo i cinque livelli summenzionati, così come applicati nel presente rilievo e così come sintetizzate in Tab. 2, ove compare anche un “mezzo grado” V-VI, resosi necessario per garantire un'omogenea progressione delle percentuali di danneggiamento.

Is MCS	Livelli di danno					P e r c e n t u a l i
	1	2	3	4	5	
V	-	-	-	-	-	
V-VI	[25]	[5]				
VI	[50]	[25]	[5]	-	-	
VII	-	50	[25]	[5]	-	
VIII	-	-	50	25	5	
IX	-	-	75	50	25	
X	-	-	-	75	50	
XI	-	-	-	-	[75]	
XII	-	-	-	-	[100]	

Tab. 2 - Schema delle progressioni di danneggiamento da adottare per un'applicazione omogenea della scala MCS (1930) per i gradi \geq V (da Molin, 2009).

La sostanziale assenza di danni nel V grado tiene conto del fatto che in qualsiasi centro abitato è praticamente sempre presente una percentuale più o meno modesta di danni di livello 1, dovuta solitamente a mancata o scarsa manutenzione (i.e., nei centri storici può essere addirittura presente

anche una piccola percentuale di danni di livello 2). Tali danni non devono e non sono stati considerati nelle valutazioni di intensità in Emilia, ma a volte è risultato difficoltoso distinguere le nuove lesioni da quelle preesistenti, specialmente se molto lievi.

E' opportuno sottolineare che adottando le percentuali espresse in Tabella 2, il VI grado è raggiunto in quelle località nelle quali circa la metà degli edifici presenta lesioni di livello 1 e circa un quarto di livello 2, ivi compresa una piccola percentuale di danni gravi (5% di livello 3). Di conseguenza, in piccoli centri abitati, composti da poche decine di edifici, l'attribuzione del VI grado MCS si concretizza con il censimento di un numero limitato di case danneggiate. D'altra parte, in un comune costituito da un migliaio di edifici, come molti di quelli visitati nel corso del presente rilievo, sono centinaia le abitazioni che devono presentare i diversi livelli di danno descritti per l'assegnazione del VI grado MCS (p.e., una cinquantina di edifici con danni gravi, 200-300 con danni di livello 2 e uno su due con danni di livello 1).

CENNI SUGLI EFFETTI DEI TERREMOTI STORICI DELL'AREA

L'area mesosismica dei terremoti del 2012 non è stata interessata in tempi storici da eventi con intensità epicentrale superiore al VI grado. Questo si evince con chiarezza dalla Figura 1, ove sono riportati gli epicentri degli eventi estratti dal catalogo CPTI11 (=Rovida et al., 2011. $I_0 > VI$ MCS), tutti ricadenti ai margini occidentali ed orientali della regione colpita nel 2012.

In particolare, il più forte e l'unico rilevante per l'area in oggetto (da cui dista oltre 30 km) è quello di Ferrara del 17 Novembre 1570, parametrizzato nei cataloghi con una I_0 VII-VIII (M_w 5.46) ed avente un'area mesosismica allungata in direzione NW-SE (vedi in DBMI11=Locati et al., 2011), ovvero parallela ai fronti sepolti ferraresi, prosecuzione orientale degli stessi verosimilmente attivatisi nella sequenza in atto.

Anche in quel caso, si trattò di una lunga sequenza composta da più *mainshocks*, con repliche protrattesi sino ad inizio 1572 ed oltre. Tra le località interessate nel 2012, Bondeno ebbe nel 1570 effetti stimati del VII grado MCS, Corpo Reno del VI-VII, mentre Cento e Finale Emilia del VI MCS. In realtà, le fonti narrano che a Bondeno fu danneggiato solo il tetto dell'ospedale e dell'oratorio, a Corpo Reno quello della chiesa di Sant'Antonio (in Marzola, 1976), mentre a Cento ed a Finale cadde qualche camino (ASM, 1570a; 1570b), così da suggerire effetti non oltre il VI MCS.

Analogamente a quanto è accaduto nel 2012, anche nel 1570 si verificarono numerosi fenomeni di liquefazione di depositi granulari saturi in diverse località sparse, prevalentemente intorno Ferrara e

sino a Ficarolo, a nord del Po (Fig. 1; da Galli, 2000). D'altra parte, così come quella del 1570, l'area interessata nel 2012 dai numerosissimi casi di liquefazione rientra interamente nelle aree definite *suscettibili di liquefazione* dall'ISMES (=Galli, 1991; Galli e Meloni, 1993), anche in considerazione della presenza dei depositi di paleoalveo storico della Secchia, del Panaro, del Reno e del Po stesso (Castaldini e Raimondi, 1985).

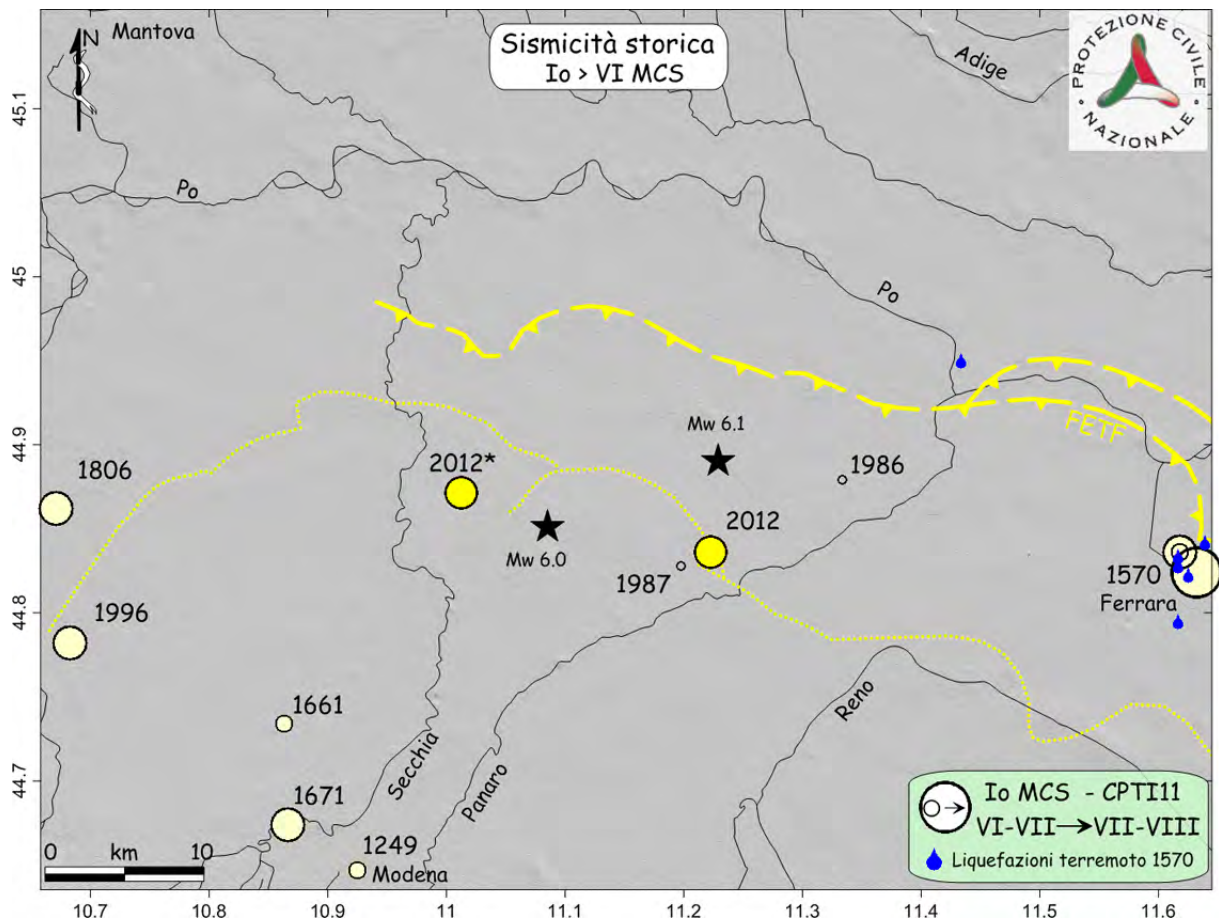


Figura 1 – Quadro della sismicità storica dell'area interessata dagli eventi del Maggio 2012 ($I_o > VI$ MCS; mod. da CPTI11). I due epicentri del 2012 si riferiscono all'evento del 20 Maggio e al cumulo degli effetti con quello del 29 Maggio (asterisco). Le stelle indicano gli epicentri strumentali del 20 (Mw 6.1) e 29 (Mw 6.0). La linea gialla puntinata è il fronte sepolto delle pieghe ferraresi-Mirandola-Cavone. Quella a tratteggio è il fronte esterno sepolto dei *thrust* ferraresi (FETF. CNR, 1995). Notare l'assenza di sismicità di rilievo nell'area degli eventi del 2012, ad eccezione di due terremoti con $I_o VI$ MCS, avvenuti negli anni '80. Le liquefazioni avvenuti nel terremoto del 1570 sono tratte da Galli (2000).

In realtà, una cronaca coeva (Giacomo da Marano, XIV sec.) suggerisce l'esistenza di un forte terremoto a Ferrara anche nel 1346, quando il 22 Febbraio "*cascarono molte case, palazzi e torri...e nelle ville casamenti, fenili, pieze et altri edifitii*". L'evento fu risentito anche a Modena (anche se l'8 Febbraio: Giovanni da Bazzano, XV sec.) e forse in altre città della pianura padana. Si potrebbe trattare, anche in questo caso, di una sequenza protrattasi per diversi giorni.

Sempre in catalogo (DBMI11) sono presenti due recenti terremoti minori (Io VI MCS) più prossimi all'area epicentrale del 2012 e per questo rappresentati in Figura 1. Il primo è avvenuto il 6 Dicembre 1986 (Mw strumentale 4.35) con effetti del VI MCS riportati a Bondeno, Finale Emilia, Gavello e Scortichino ed il secondo l'8 Maggio 1987 (Mw strumentale 4.56), con effetti di VI MCS a Camposanto, Finale Emilia, Massa Finalese e San Felice sul Panaro. Considerando la loro ubicazione epicentrale, entrambi possono essere riconducibili come genesi alla stessa struttura attivatasi nel corso della sequenza del 2012.

Infine, il 15 Ottobre 1996, al margine occidentale dell'area indagata, si è verificato un evento di Mw 5.41 (Io VII MCS; Massucci et al., 1996; De Canini et al., 1997) che interessò essenzialmente Bagnolo in Piano e Correggio, ove furono osservate gravi lesioni a rari edifici storici (come al Torrazzo di Bagnolo e alla chiesa di San Francesco a Correggio), leggere lesioni in numerosi edifici, anche in cemento armato (lesioni alle tamponature dei piani pilotis di un paio di condomini), frequenti cadute di comignoli, slittamento e caduta di tegole e caduta di calcinacci, così come a Carpi, anche se in misura molto minore. L'evento fu allora associato al movimento della rampa laterale sinistra dell'anticlinale di Cavone (in De Canini et al., 1997). Poco più a nord, nel 1806 un analogo evento causò danni sempre a Correggio, oltre che a Brescello, Campagnolo Emilia, Novellara e Viadana (stimati del VII grado MCS in ISMES, 1985) e anche ad altre località più o meno colpite anche dalla sequenza in corso, come Reggiolo e Carpi (VI-VII MCS).

Per concludere, si può affermare che almeno nel corso degli ultimi 500 anni, periodo per il quale è possibile ipotizzare una sostanziale completezza del catalogo per eventi di elevata energia, l'area epicentrale della sequenza del 2012:

- 1) non è mai stata sede di eventi di energia elevata e/o paragonabile a quella liberata nella sequenza in atto;
- 2) non ha mai subito in modo diffuso effetti oltre la soglia del danno causati da terremoti con origine esterna, ad eccezione del forte risentimento di quello ferrarese del 1570, nella porzione più orientale, e di quelli del 1806 e 1996, nell'estrema porzione occidentale, oltre a qualche lieve lesione in occasione dei deboli eventi degli anni '80.

Da quanto detto, è possibile quindi affermare che gli eventi del 2012 abbiano costituito per quasi tutti gli edifici storici il primo - e talvolta anche l'ultimo - reale "collaudo antisismico", almeno per eventi di tale intensità.

RILEVAMENTO MACROSISMICO IN SCALA MCS

Evento del 20 Maggio

Come anticipato, già a partire dalla prima mattina del *mainshock* di Mw 6.1, una squadra DPC composta da due persone ha intrapreso il rilievo macrosismico in area epicentrale, estendendolo nelle giornate successive alle località via via più distanti, sia nelle provincie di Modena, che di Mantova e Ferrara. Seppur necessariamente incompleti, gli esiti di questo primo rilievo hanno permesso di delineare l'area dei maggiori effetti di questa prima scossa - intesi dal VI grado MCS e superiori – che è risultata allungata in senso WNW-ESE, in pieno accordo con i meccanismi focali del *mainshock* della notte del 20 Maggio e dei maggiori *aftershocks* (Fig. 2).

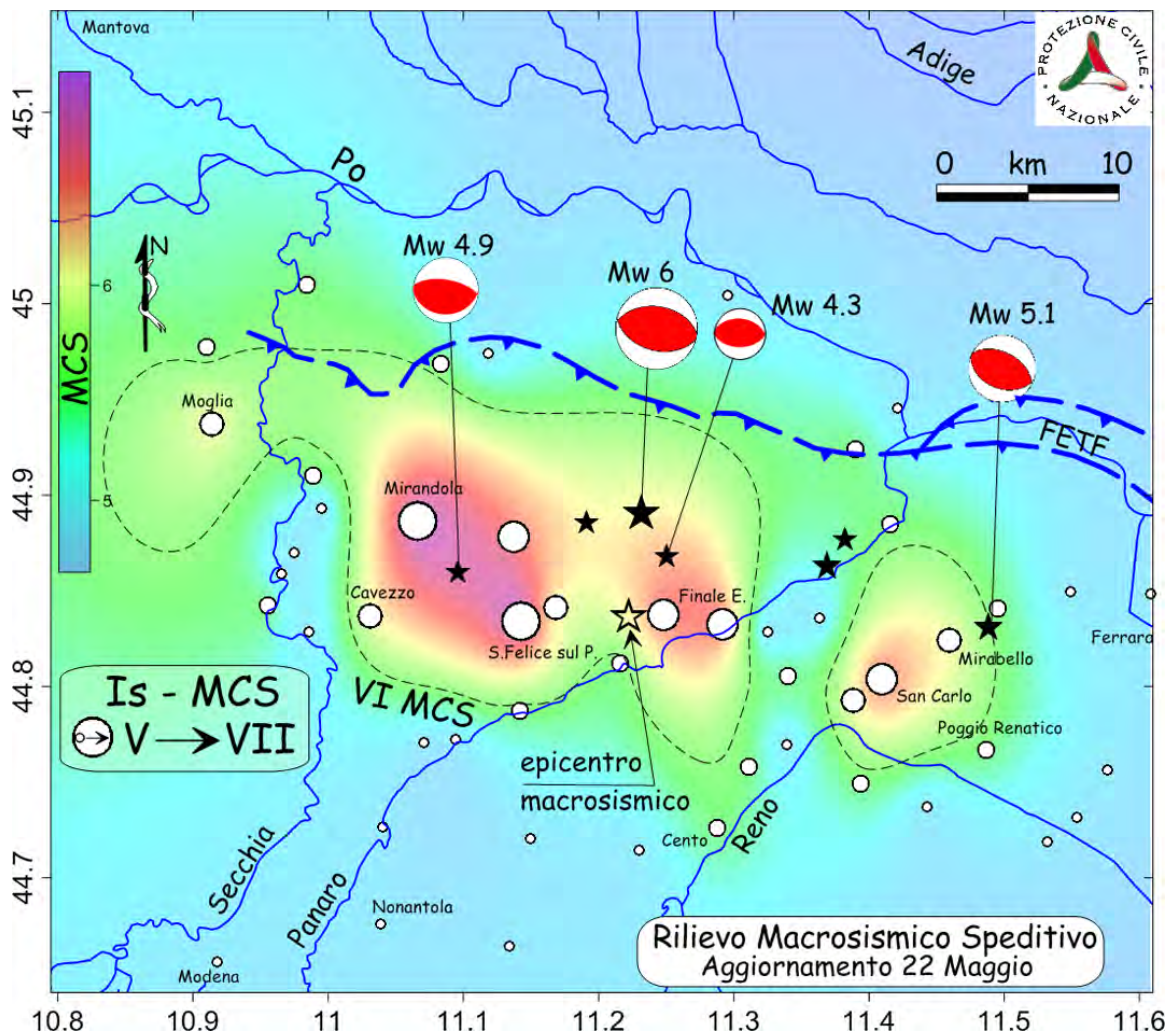


Fig. 2 – Distribuzione dei punti di intensità rilevati da DPC nell'area epicentrale e limitrofa (cerchi bianchi, proporzionali al grado) tra il 20 ed il 22 Maggio. La campitura a colori indica in modo qualitativo lo scuotimento areale in termini MCS. A tratteggio nero l'isoseisma del VI grado MCS. A tratteggio blu il fronte dei *thrusts* sepolti a NW di Ferrara (FETF), cui sono verosimilmente associabili gli eventi della sequenza in atto (vedi meccanismi focali TDMT, 2012 e QRCMT, 2012). L'isoseisma che racchiude l'area con effetti di VI grado MCS è estesa complessivamente, seppur in maniera discontinua, meno di 50 km in direzione WNW-ESE (i.e., 25 km escludendo le riprese di intensità agli estremi est ed ovest).

In dettaglio, l'area è risultata estesa in modo continuo meno di 25 km nella direzione suddetta e circa 15 km in quella ortogonale (Fig. 1), rimanendo interamente nell'*hangingwall* dei *thrusts* ferraresi, ovvero la struttura sismogenetica verosimilmente responsabile della sequenza in atto (FETF in Fig. 2; vedi meccanismi focali ivi riportati). Esternamente a quest'area, sia a ovest, ma soprattutto ad est, è stata osservata una ripresa dell'intensità, ripetivamente nella zona di Moglia e in quella corrispondente al corso del paleo-Reno, ovvero tra i paesi di Sant'Agostino e Mirabello. L'intensità massima stimata a seguito di questo primo rilievo è stata del VII grado MCS, assegnata a Mirandola e a San Felice sul Panaro (Figg. 2-3). Valori tra il VI ed il VII grado sono stati osservati a Finale Emilia e nelle frazioni di Canaletto, Mortizzuolo e San Carlo. A tutte le altre località sono stati assegnati il VI grado MCS ed inferiori. L'intensità epicentrale - stimata tramite l'utilizzo dell'algoritmo Boxer4 (Gasperini et al., 1999) - è ugualmente pari a VII MCS, mentre la magnitudo momento calcolata col medesimo algoritmo è molto più bassa (Mw 5.1) di quella strumentale (Mw 6.11). Le coordinate epicentrali derivate tramite Boxer4 sono 44.836 (Lat. nord) e 11.222 (Long. est), ed identificano un punto ubicato circa 5 km a sud dell'epicentro strumentale (Figg. 1-2).



Fig. 3 – Immagine del Duomo della Mirandola (XV sec.) la mattina del 20 Maggio. Si noti la caduta di alcuni elementi architettonici del coronamento della facciata e l'incipiente distacco di quest'ultima. All'interno, non visibile, il crollo parziale delle coperture.



Fig. 4 – Una delle innumerevoli cascine crollate (destra) e crollo di edificio storico-industriale tra Mirandola e San Felice sul Panaro (foto 21 Maggio)



Fig. 5 – Crollo parziale della Rocca Estense di Finale Emilia (XV sec.) ripreso la mattina del 20 Maggio 2012.

La maggior parte dei danni gravi, ivi compresi crolli totali e parziali, ha riguardato edifici storici e in particolare chiese, campanili, torri civiche, castelli e palazzi, cascine (Figg. 3-6), oltre che molti capannoni industriali (Fig. 7) e magazzini nelle aree di Mirandola e Sant'Agostino.

L'edilizia residenziale, sia in muratura che in cemento armato, ha subito in genere un basso grado di danneggiamento (di solito livelli di danno 1-2), con isolati casi di danno di livello 3 (i.e., lesioni gravi) e rarissimi crolli parziali (spesso dei cornicioni, sottotetti o di solai di edifici fatiscenti) e distruzioni (livello 4), oltre a cadute diffuse di camini, tegole, cornicioni ed intonaci, quasi ovunque limitati ai centri storici, ad eccezione delle menzionate cascine nelle campagne. Questa circostanza spiega come mai questo primo evento, pur essendo avvenuto in piena notte, non abbia provocato vittime, se non gli operai dei turni di notte nei capannoni industriali. Tuttavia, danni significativi agli edifici in c.a. sono stati osservati sia nel centro storico che alla periferia di alcune località. In particolare, a Mirandola un edificio nel centro storico mostrava evidenze di schiacciamento dei pilastri e danni alle tamponature, così come alcuni condomini alla periferia nord dello stesso comune e un altro nel centro di Cavezzo (Fig. 8).



Fig. 6 – Finale Emilia, crollo della torre civica e del timpano del duomo ripresi la mattina del 20 Maggio 2012. La torre è successivamente crollata interamente nel corso della sequenza.

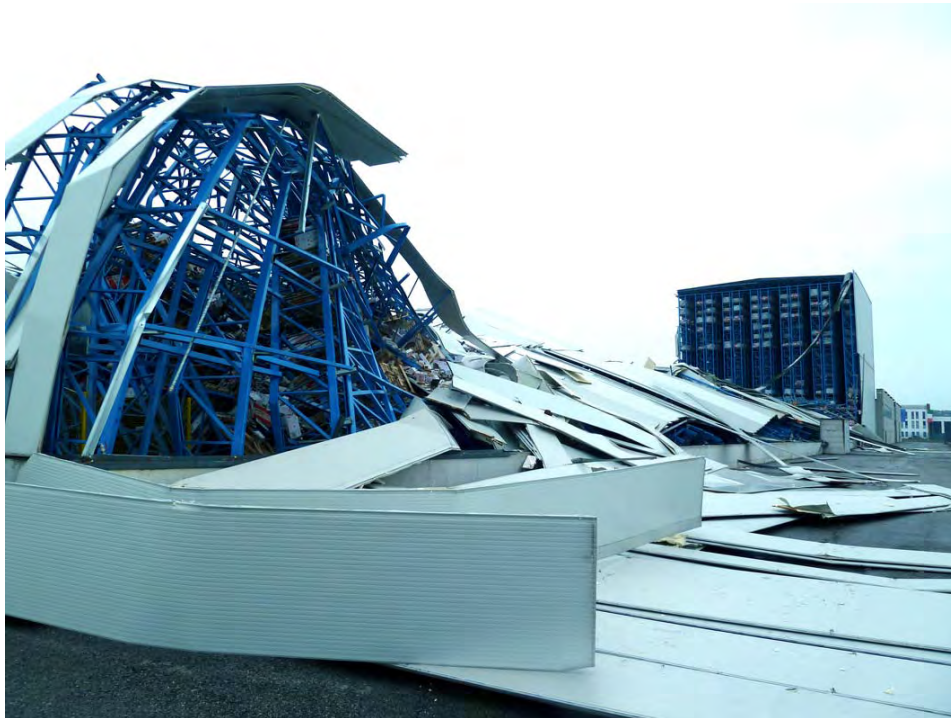


Fig. 7 – Crollo del capannone delle ceramiche Sant’Agostino alla periferia dell’omonimo paese.



Fig. 8 – A sinistra, Cavezzo, 22 Maggio 2012: lesioni 3-4 al giunto di un condominio in c.a. del centro storico, successivamente crollato con la scossa del 29 Maggio. A destra, Mirandola, 21 Maggio: schiacciamento di un pilastro in c.a. in un condominio del centro storico.

In alcuni casi ben circoscritti, più che lo scuotimento cosismico, il danneggiamento degli edifici o di parti di essi è stato causato da estesi fenomeni di liquefazione avvenuti al di sotto degli stessi, con

conseguente perdita di portanza e cedimento differenziale e/o basculamento della fondazione, rispettivamente nel caso di fondazioni dirette su travi o platee in c.a. (Fig. 9). Tale fenomeno è avvenuto in modo esteso nelle località sorte lungo il paleoalveo sospeso del Fiume Reno, come a Sant’Agostino, ma soprattutto a San Carlo e Mirabello (Fig. 10), mentre altre centinaia di manifestazioni, senza conseguenze per l’edilizia, sono state osservate nei campi coltivati di tutta l’area epicentrale, come a Bondeno, San Felice sul Panaro, Dodici Morelli, San Martino Spino, Cavezzo, Quistello e San Possidonio. La maggior parte di queste è avvenuta in corrispondenza dei paleoalvei storici degli altri fiumi della pianura, come il Panaro, la Secchia e il Po stesso (vedi tracciati in Castaldini e Raimondi, 1985).

In particolare, nelle località sorte sul paleo-Reno, i processi di liquefazione e fratturazione cosismica, talvolta sviluppati per centinaia di metri con geometrie complesse *en-echelon* su sistemi sintetici e antitetici (Fig. 11) hanno comportato anche la rottura delle tubazioni di servizio di acqua e gas, prontamente riparate a partire dal so Maggio stesso. E’ quindi palese che la menzionata ripresa in intensità visibile ad est in Figura 1 all’interno dell’isosisma di VI grado sia dovuta prevalentemente agli effetti indotti da questo fenomeno.



Fig. 9 – San Carlo. Cedimento differenziale di un edificio misto in c.a. e muratura per liquefazione con sviluppo di lesioni di livello 3. A destra, poco lontano, evidenze di liquefazione di sabbie eiettate da un pozzetto.

Nelle grandi città della *Pianura* non sono stati mai osservati danni gravi, neppure isolati. A Mantova e Modena il terremoto è stato avvertito da tutti o quasi tutti con panico. Le persone si sono svegliate e sono uscite nelle strade, ma non si sono registrati danni, se non di livello 1-2 a rarissime abitazioni. A Ferrara diverse abitazioni hanno subito danni di livello 1-2, specialmente come riapertura di lesioni pregresse, e sono avvenute cadute di camini, tegole, arredi lapidei sospesi sulle facciate di chiese ed edifici storici, ma senza danni gravi o feriti.



Fig. 10 – Fenomeni di liquefazione a San Carlo. Vulcanetti coalescenti di sabbie allineati lungo una frattura nei pressi di una strada (foto del 21 Maggio).



Fig. 11 – Fenomeni di fratturazione cosismica e liquefazione a San Carlo. Formazione di fratture con rigetti decimetrici e geometrie *en echelon*, con sviluppo di sistemi sintetici ed antitetici dai quali è fuoriuscito lo strato sabbioso ora visibile in affioramento (foto del 21 Maggio).

La stima dell'intensità al sito per molte località è risultata quasi sempre complicata dall'estrema diversità dei livelli di danno osservati tra edifici residenziali moderni, generalmente di piccole dimensioni (spesso villette monofamiliari) e quelli storici, specie se con grandi luci e sviluppo verticale. Come detto, a fronte del crollo, parziale o totale di alcuni edifici monumentali come chiese, castelli e rocche e della distruzione di campanili, torri e palazzi nobiliari, il danno diffuso nell'edilizia residenziale, anche in molti centri storici, è stato fortunatamente basso o assente. Di conseguenza, a una prima valutazione, il grado macrosismico pesato sul totale degli edifici di ciascuna località potrebbe essere più basso di quanto poi in realtà assegnato.

Si è preferito, tuttavia, dare maggior enfasi al danneggiamento grave subito dagli edifici monumentali dei centri storici, come già avvenuto nel terremoto aquilano del 2009, in attesa che il rilevamento in scala EMS, in corso di svolgimento da parte dei colleghi dell'INGV, fornisca un dato analitico pesato sull'intero abitato e sulle diverse tipologie costruttive.

Evento del 29 Maggio

A seguito del secondo *mainshock* del 29 Maggio (Mw 5.96) una squadra DPC composta da quattro persone si è nuovamente recata in area epicentrale, compiendo il rilievo macrosismico sia delle località già visitate tra il 20-22 Maggio sia di nuove località, per un totale di 190 (Fig. 12). Il rilievo è stato condotto in più tornate nelle giornate tra il 29 Maggio e il 15 Giugno.

Da un punto di vista generale, si è stato constatato un aggravamento degli effetti nel settore occidentale dell'area, con aumento da uno a due gradi di intensità MCS e con gravi danni a Reggiolo (VI-VII MCS), Novi di Modena (VII MCS), Concordia sulla Secchia (VII MCS, con diversi crolli parziali e danni gravi diffusi nel corso porticato del c.s.; Fig. 13.), Moglia (VII MCS), ma soprattutto Rovereto (VII-VIII MCS, intensità massima stimata per l'intera area), nel comune di Novi di Modena, dove sono stati osservati diversi crolli parziali e danni gravi anche ad alcuni edifici di recente costruzione, sia in cemento armato (Fig. 14) che in muratura. Nelle altre località, in genere sempre ad ovest di Mirandola, ma con casi isolati anche a sud ed est, l'aggravamento è sempre inferiore a un grado MCS.

A Mirandola, gli eventi del 29 Maggio hanno comportato il crollo quasi totale della chiesa di San Francesco, solo in parte lesionata il 20 Maggio, ulteriori crolli nel duomo e numerosi danni di livello 3 e alcuni crolli parziali agli edifici del centro storico (Fig. 14), ivi compresi alcuni in c.a. Anche a Cavezzo l'aggravamento del danno, specie in alcuni edifici in c.a. che hanno subito lo

schacciamento/collasso dei piani inferiori (Fig. 15), ha comportato l'innalzamento della stima macrosismica ad almeno il VII MCS.

Esternamente all'isosisma di VI grado, nei quadranti meridionali, sia Crevalcore che Cento hanno subito un notevole incremento del danneggiamento del centro storico, che presenta ora una diffusione dei livelli di danno 2 a circa un quarto delle abitazioni, con diversi danni gravi di livello 3 ed isolati crolli parziali di sottotetti.

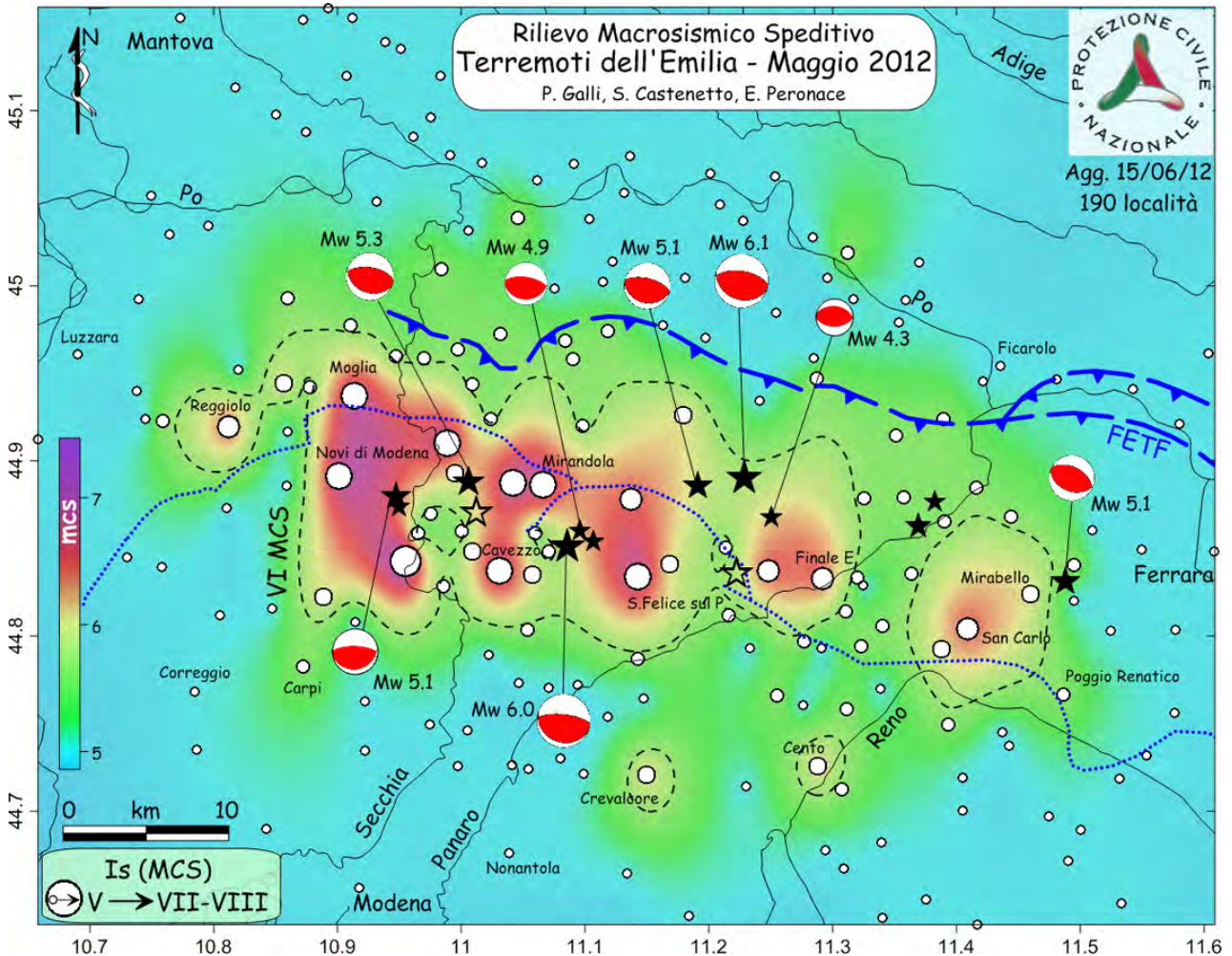


Fig. 12 – Distribuzione dei punti di intensità rilevati da DPC nell'area epicentrale e limitrofa al 15 Giugno 2012 (cerchi bianchi, proporzionali al grado assegnato). La campitura a colori indica in modo qualitativo lo scuotimento areale in termini MCS. A tratteggio nero l'isosisma del VI grado MCS interpolata dai dati di intensità. A tratteggio blu il fronte dei *thrusts* sepolti a NW di Ferrara (FETF), cui sono verosimilmente associabili gli eventi della sequenza in atto (stelle nere; vedi meccanismi focali, da TDMT, 2012 e QRCMT, 2012), oltre che delle pieghe ferraresi-Mirandola-Cavone (linea puntinata blu). L'immagine è da confrontare con quella di Figura 2, relativa al solo *mainshock* del 20 Maggio. Le due stelle gialle sono gli epicentri macrosismici del 20 Maggio (ad est) e del cumulo degli effetti dei due *mainshocks*.



Fig. 13 – Concordia sulla Secchia. Crolli di edifici disabitati nel centro storico (foto 6 Giugno 2012).

A nord, invece, l'area del danneggiamento non si è sostanzialmente estesa, con la comparsa tuttavia di numerose località con effetti stimabili al V-VI MCS anche a ridosso del Po (p.e., Quistello e Quingentole) o eccezionalmente anche a nord dello stesso (Castelmassa). Danni gravi isolati, spesso alla sola chiesa o al campanile, sono stati comunque osservati in numerosissime località alle quali si è in ogni caso attribuito il V grado, in mancanza di effetti percentualmente rilevanti nel resto dell'abitato. Il piano quotato riportato in Appendice 1 conserva memoria di questi casi nella colonna DJ (danni gravi a edifici isolati), ove le sigle A-B-C testimoniano lesioni gravi e/o crolli, rispettivamente a edifici *l.s.*, torri/campanili e chiese.

Nel complesso, l'area di VI grado MCS si è così estesa verso ovest, raggiungendo un'ampiezza di circa 35 km in direzione WNW-ESE, 10 km in più rispetto a quella causata dal primo evento. Anche in questo caso sussistono due aree estreme, a est e ovest, caratterizzate da una ripresa dell'intensità. La prima corrisponde sempre a quella relativa ai paesi sorti sul dosso del paleo-Reno, mentre la seconda, precedentemente centrata su Moglia, è migrata intorno a Reggiolo, in un primo tempo non danneggiato dal sisma del 20 Maggio. Complessivamente dunque, l'area di VI raggiunge un'estensione di circa 55 km, sempre in direzione WNW-ESE, mantenendo un'ampiezza in senso meridiano di circa 15-20 km (Figg. 12-16).



Fig. 14 – A sinistra, Rovereto, lesioni di livello 3 ad edificio in c.a. A destra, Mirandola, crollo parziale dei sottotetti di un edificio in laterizio del centro storico (foto 29 Maggio).



Fig. 15 – Cavezzo. Collasso totale del piano pilotis in un condominio in c.a. del centro storico ripreso la mattina del 29 Maggio.

Osservando la distribuzione interpolata delle intensità di Figura 12 ed assumendo una vulnerabilità sismica pressoché simile in tutti le località rilevate, sia per quanto attiene i centri storici che le zone di espansione residenziale recente, appare verosimile attribuire le riprese di intensità localizzate all'estremo ovest (Reggiolo), ad est (Sant'Agostino-San Carlo-Mirabello) e a sud (Crevalcore e Cento) a possibili fenomeni di amplificazione geologica locale. In un caso, come già accennato, quest'ultima è palesemente dovuta alle ingenti manifestazioni di liquefazione verificatesi il 20 Maggio lungo tutto il corpo del paleo-Reno ed agli effetti indotti sulle fondazioni (Fig. 16). Nelle altre, escludendo l'occorrenza di fenomeni di liquefazione, le cause andranno investigate tramite studi di microzonazione sismica *ad hoc*.

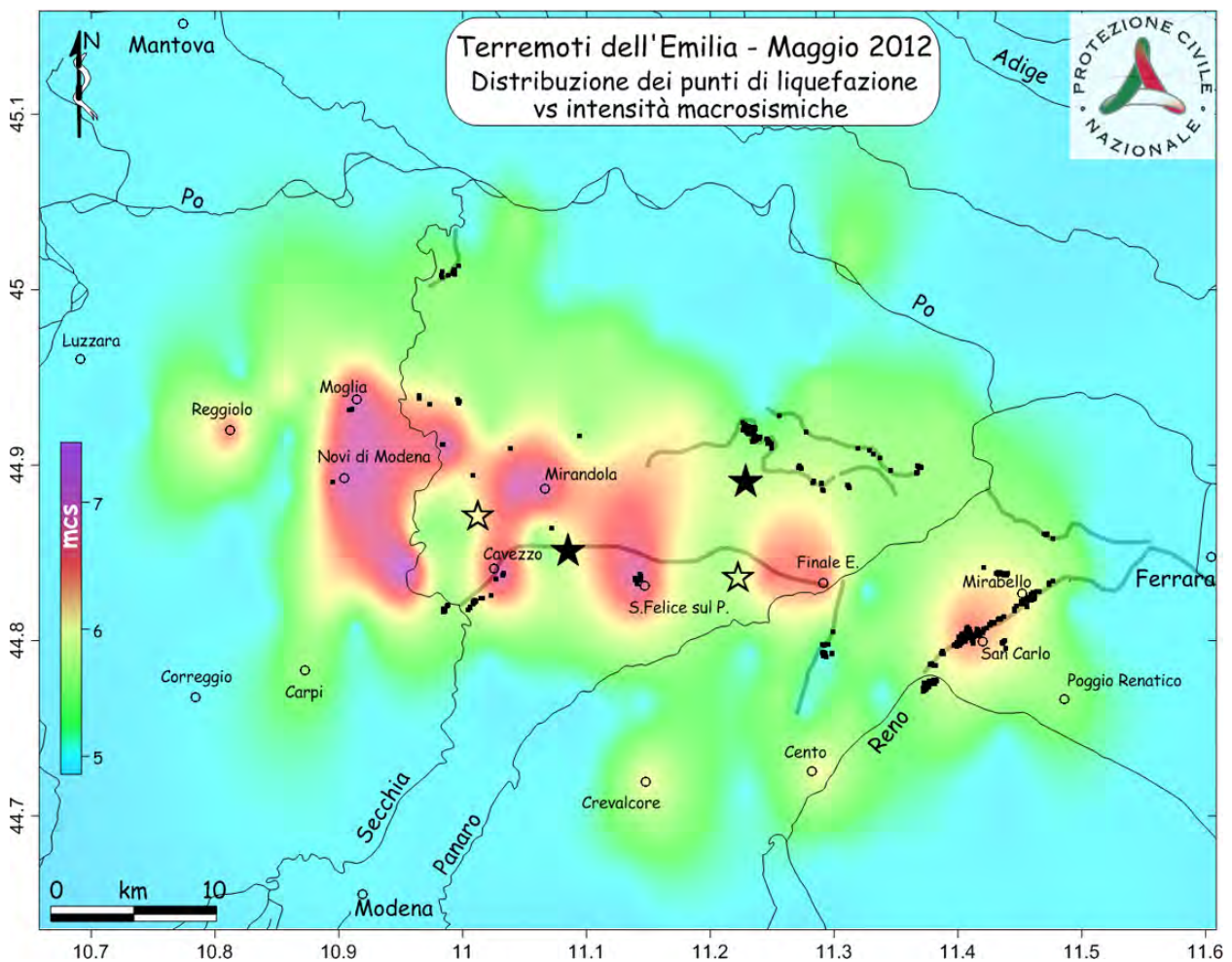


Fig. 16 – Distribuzione dei fenomeni di liquefazione osservati a seguito dei due *mainshocks* della sequenza del 2012 in confronto alla distribuzione dell'intensità macrosismica (stelle nere e vuote, epicentri strumentali e macrosismici, rispettivamente). E' evidente una scarsa correlazione tra i massimi di intensità e le liquefazioni che sembrano più che altro guidate dalla presenza di depositi altamente suscettibili di liquefazione relativi ai paleo alvei (linee grigie, da Castaldini e Raimondi, 1985), come nel caso di quello del Reno, verso Mirabello, e della Secchia, verso Cavezzo e San Felice sul Panaro o degli alvei abbandonati del Po nei casi più a nord.

Nell'impossibilità di stimare i parametri macrosismici della sola scossa del 29 Maggio, l'intensità epicentrale relativa al cumulo degli effetti dei due *mainshocks* (20 e 29 Maggio) - calcolata anche in questo caso tramite l'utilizzo dell'algoritmo Boxer4 - è risultata sempre pari a VII grado MCS, con una magnitudo momento sempre più bassa (M_w 5.23) rispetto a quella strumentale (M_w 6.11 + M_w 5.96). Le coordinate epicentrali relative al cumulo degli effetti sono 44.877 (Lat. nord) e 11.004 (Long. est), ed identificano un punto ubicato oltre 15 km a ovest sia dell'epicentro strumentale che macrosismico del 20 Maggio, e 5 km ad ovest di quello strumentale del 29 Maggio (Fig. 12). Questa deriva verso ovest del baricentro degli effetti macrosismici rispetto agli epicentri strumentali potrebbe indicare, grossolanamente, il verso di propagazione della rottura lungo la struttura responsabile in profondità della sequenza, ovvero da est verso ovest.

Come già detto, tutte le intensità sono da riferirsi prevalentemente ai piccoli, talora piccolissimi centri storici delle località rilevate (quasi esclusivamente edifici storici in laterizio), in quanto quasi ovunque e con rare eccezioni, anche con la scossa del 29 Maggio tutta la porzione residenziale esterna al centro ha subito rare lesioni di livello 1-2, ad eccezione di casi eclatanti, come quelli citati di Rovereto (Fig. 17) o Fossoli (lesioni di livello 3 ai piani bassi di una serie di condomini in c.a.).



Fig. 17 – Rovereto. Caso isolato di danni gravissimi (livelli 4-5) in edilizia residenziale moderna. Collasso parziale del piano “pilotis” in muratura di un edificio nuovo all'esterno del centro storico di Rovereto. Notare la rottura a taglio dei maschi murari nel piano terra.

In alcune località (p.e., Cento, Concordia, Crevalcore, Moglia, Reggiolo, San Giacomo delle Segnate) il danno è molto diffuso negli edifici porticati delle vie centrali, tipici di molti centri storici

della pianura padana, dove danni di livello 2 e più raramente 3 hanno interessato le colonne/pilastri e le sovrastanti porzioni di muratura dei piani su arcate.

Si è infine cercato di “chiudere” la distribuzione dei punti di intensità macrosismica sia a sud (province di Modena e Bologna) che a nord, nelle province di Ferrara, Rovigo e Mantova, identificando diverse località interessate da danni lievi in alcuni comuni del Mantovano, ma comunque sempre a sud del Po, ad eccezione di Castelmassa (Rovigo), ove si sono osservate diverse lesioni di livello 2 agli edifici del corso porticato del c.s., alle due chiese ed al teatro.

Per contro, non si è riscontrato un aumento significativo del danno nelle località ad est di San Felice sul Panaro, se non quello dovuto al crollo di lacerti murari rimasti in precario equilibrio dopo le prime scosse e ai già citati casi di Crevalcore e Cento, a sudest.

Infine, è opportuno segnalare che anche in occasione dell’evento del 29 Maggio si sono verificati fenomeni di liquefazione, alcuni laddove già in precedenza segnalati (p.s., a San Felice sul Panaro), altri in località precedentemente non interessate, come Quistello, Cavezzo e San Possidonio, anche se in maniera molto meno estensiva e senza indurre ulteriore danneggiamento alle abitazioni.

Le figure 18-20 illustrano la distribuzione delle intensità sia per ogni singola località – così come riportato nel piano quotato di Appendice 1 - sia per comuni. A ciascuno di questi ultimi è stata assegnata l’intensità massima della frazione o del capoluogo stesso.

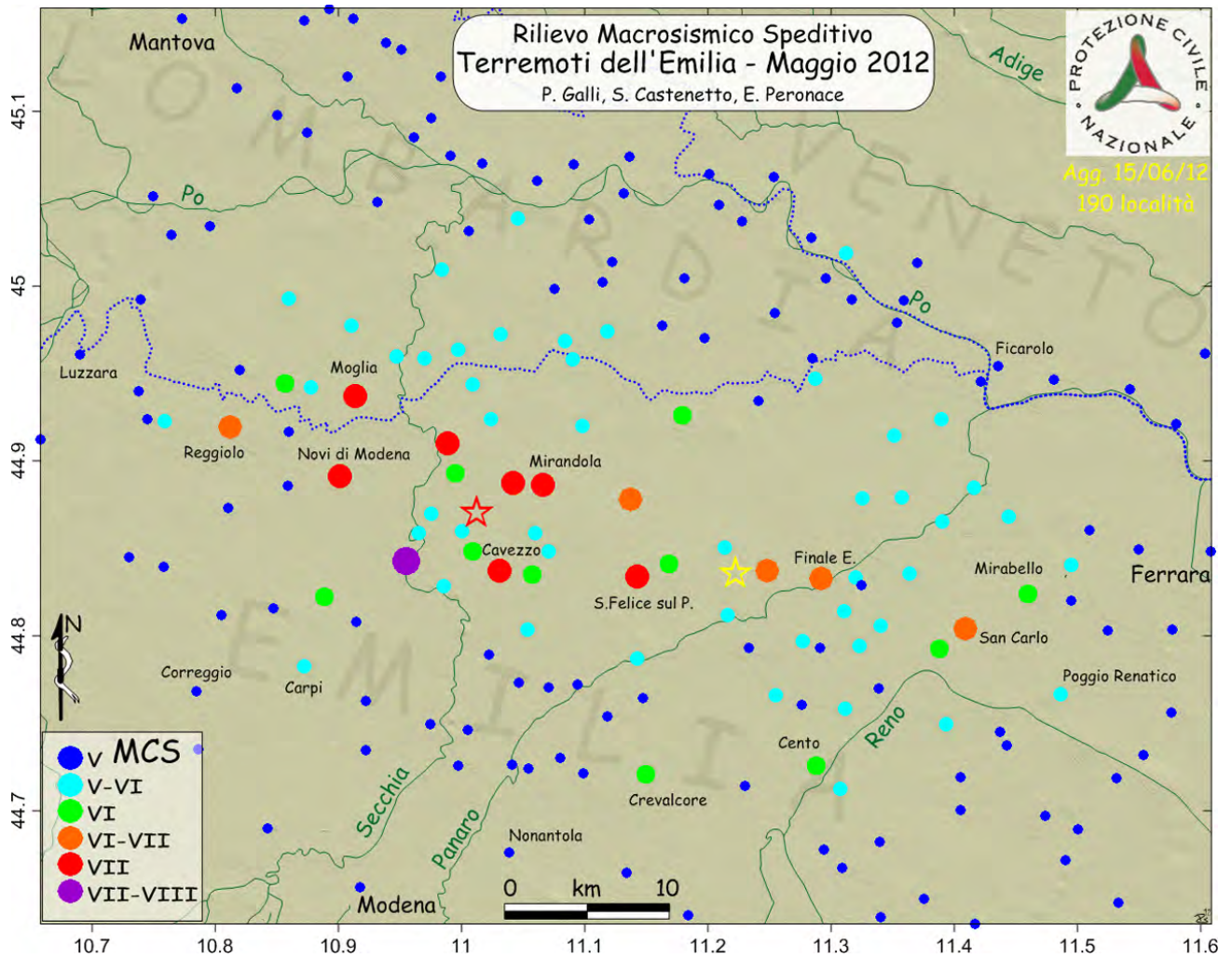


Fig. 18 – Distribuzione delle intensità macrosismiche cumulate per località.
 Rilevamento DPC 20 Maggio-15 Giugno 2012. Stella gialla e rossa, epicentri macrosismici del terremoto del 20 Maggio e del cumulo degli effetti col terremoto del 29 Maggio, rispettivamente.

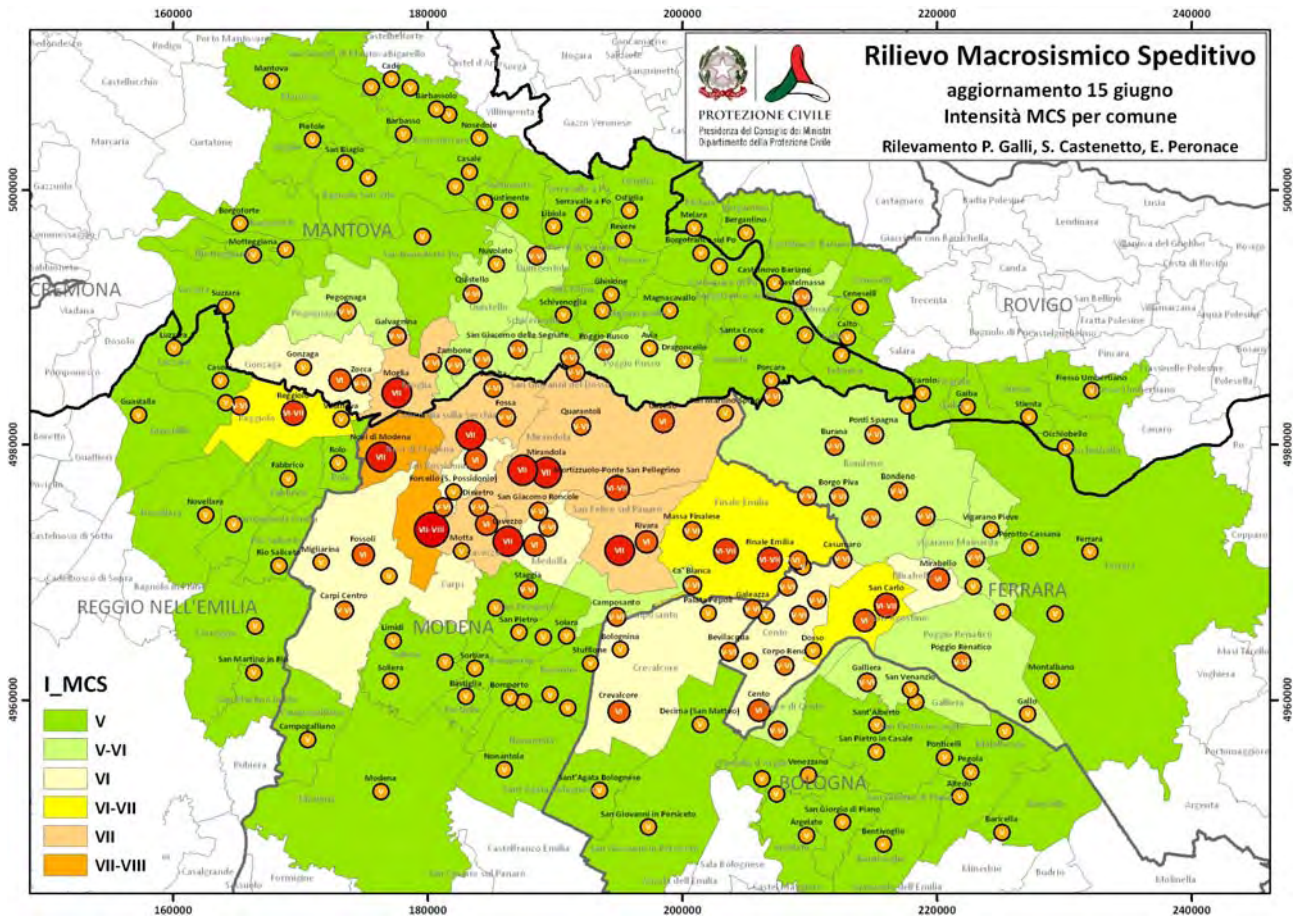


Fig. 19 – Distribuzione delle intensità macrosismiche per località e per territorio comunale, rilevata dopo il *mainshock* del 29 Maggio e aggiornata al 15 Giugno 2012. Ad ogni poligono è stata associata l'intensità massima ricadente nei confini comunali.

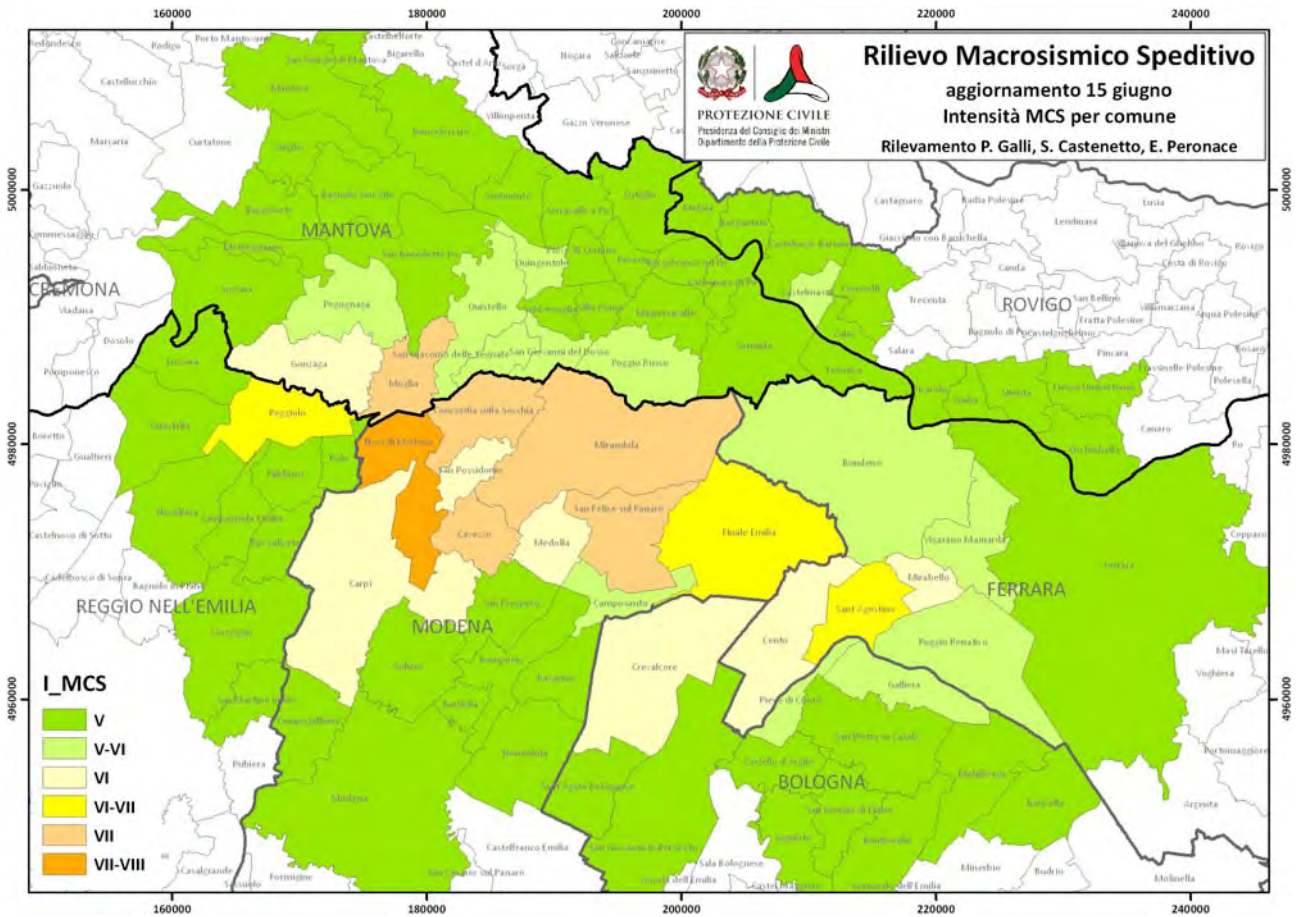


Fig. 20 – Distribuzione delle intensità macrosismiche per territorio comunale rilevata dopo il *mainshock* del 29 Maggio e aggiornata al 15 Giugno 2012. Ad ogni poligono è stata associata l'intensità massima ricadente nei confini comunali.

Bibliografia citata

- ASM, 1570a - Archivio di Stato di Modena, Archivio Segreto Estense, Cancelleria ducale, Interno, Rettori dello Stato, Ferrarese, b.22, Lettera di Giovan Battista Filippi al duca Alfonso II d'Este, Cento 21 novembre 1570.
- ASM, 1570b - Archivio Segreto Estense, Cancelleria ducale, Interno, Rettori dello Stato, Modenese, b 21, Lettera di Silvio Bartolaio al segretario ducale Giovan Battista Pigna, Finale 22 novembre 1570.
- Castaldini D., Raimondi S., 1985 – Geomorfologia dell'area di Pianura Padana compresa tra Cento, Finale Emilia e S. Agostino. *Atti Soc. Nat. Mat. di Modena*, **116**, 147-176.
- CNR, 1995 – Structural Model of Italy, Sheet n.1, Quaderni della Ricerca Scientifica **114**, 3, CNR-Edizioni.
- Decanini L., Di Pasquale, Orsini G., Colozza R., Galli P., Marcucci A., Milana G., Molin D., Pugliese A., 1997 – Ricognizione degli effetti del sisma del 15 ottobre 1996 in provincia di Reggio Emilia, Dipartimento dei Servizi Tecnici Nazionali, Servizio Sismico Nazionale, Rapporto Tecnico SSN/RT/97/4, 191 pp.
- Galli P., 1991 - Liquefazione storica di terreni sabbiosi durante i passati terremoti, Prog.CGA-6241, RAT-CGA-0023, ISMES Roma, 29 pp.
- Galli P., 2000 - New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction. *Tectonophysics*, **324**, 169-187.
- Galli P. e Meloni A., 1993 – Nuovo catalogo nazionale dei processi di liquefazione avvenuti in occasione dei terremoti storici in Italia, *Il Quaternario*, **6**, 271-292.
- Gasperini P., F. Bernardini, G. Valensise e E. Boschi, 1999 - Defining seismogenic sources from historical felt reports, *Bull. Seism Soc. Am.*, **89**, 94-110. Codice disponibile su: <http://ibogfs.df.unibo.it/user2/paolo/www/paolo.html>
- Giacomo da Marano, XIV sec. - Cronaca inedita di Ferrara estense dal 1298 al 1412, in: *Bollettino statistico del Comune di Ferrara*, **56-58**, 1929-1931.
- Giovanni da Bazzano, XV sec. - *Chronicon Mutinense*, T. Casini (ed.), in: *Rerum Italicarum Scriptores*, 2a ed., **15**(4).
- Grünthal G. (ed.), 1998 - European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). European Seismological Commission, subcommission on Engineering Seismology, working Group Macroseismic Scales. Conseil de l'Europe, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, **15**, Luxembourg.

- ISMES, 1985. Studi e indagini per l'accertamento dell'idoneità tecnica delle aree suscettibili di insediamento di impianti nucleari per le Regioni Piemonte, Lombardia e Puglia: indagini di sismica storica. Rapporti tecnici predisposti per ENEL da ISMES-SGA, Roma.
- Locati M., Camassi R. e Stucchi M. (eds.), 2011 - DBMI11, the 2011 version of the Italian Macroseismic Database. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>.
- Marzola M., 1976 - Per la storia della Chiesa Ferrarese nel secolo 16 (1497-1590), **2**, Torino.
- Massucci A., Molin D., Tertulliani A., 1996 – Terremoto di Reggio nell'Emilia del 15 Ottobre 1996. Rilevamento macrosismico preliminare. Protezione Civile, relazione riservata, Roma, 5 pp.
- Molin D., 2003 - Considerazioni sull'eventuale adozione in Italia della scala macrosismica europea (EMS- 1998) – Atti del 22° convegno nazionale GNGTS, ISBN/ISSN:88-900385-9-4, 06.21, 11 pp.
- Molin D., 2009 - Rilievo macrosismico in emergenza. Rapporto interno Dipartimento della Protezione Civile; Ufficio III Valutazione, prevenzione e mitigazione del rischio sismico.
- QRCMT, 2012 – Quick Regional Centroid Moment Tensor, INGV-Bologna, <http://autorecmt.bo.ingv.it/quicks.html>.
- Rovida A., Camassi R., Gasperini P. e Stucchi M. (a cura di), 2011 - CPTI11, la versione 2011 del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI>
- Sieberg A., 1930 - Geologie der Erdbeben. Handboch der Geophysic, **4**, Berlin, 552-554.
- TDMT, 2012 – Time Domain Moment Tensor, INGV-Centro Nazionale Terremoti, <http://cnt.rm.ingv.it/tdmt.html>.

Appendice 1 – Piano quotato al 15 Giugno 2012. Is, intensità MCS; DJ, danni gravi a edifici isolati (A, Edifici, B, torri/campanili, C, chiese) nelle sole località con Is<VI MCS.

Località	Comune	Is	DJ
Rovereto	Novi di Modena	VII-VIII	
Moglia	Moglia	VII	
Cavezzo	Cavezzo	VII	
Concordia sulla Secchia	Concordia sulla Secchia	VII	
Mirandola	Mirandola	VII	
San Martino Carano	Mirandola	VII	
Novi di Modena	Novi di Modena	VII	
San Felice sul Panaro	San Felice sul Panaro	VII	
Reggiolo	Reggiolo	VI-VII	
Finale Emilia	Finale Emilia	VI-VII	
Canaletto	Finale Emilia	VI-VII	
Mortizzuolo	Mirandola	VI-VII	
San Carlo	Sant'Agostino	VI-VII	
Bondeno	Gonzaga	VI	
Fossoli	Carpi	VI	
La Bottega	Cavezzo	VI	
Villafranca	Medolla	VI	
Gavello	Mirandola	VI	
Rivara	San Felice sul Panaro	VI	
San Possidonio	San Possidonio	VI	
Crevalcore	Crevalcore	VI	
Cento	Cento	VI	
Mirabello	Mirabello	VI	
Sant'Agostino	Sant'Agostino	VI	
Zocca	Gonzaga	V-VI	C
Bondanello	Moglia	V-VI	B C
Pegognaga	Pegognaga	V-VI	A C
Galvagnina	Pegognaga	V-VI	
Poggio Rusco	Poggio Rusco	V-VI	B C
Quingentole	Quingentole	V-VI	C
Quistello	Quistello	V-VI	A C
Zambone	Quistello	V-VI	
San Giacomo delle Segnate	San Giacomo delle Segnate	V-VI	A C
Malcantone	San Giacomo delle Segnate	V-VI	
San Giovanni del Dosso	San Giovanni del Dosso	V-VI	C
Castelmassa	Castelmassa	V-VI	A C
Brugneto	Reggiolo	V-VI	C
Camposanto	Camposanto	V-VI	A B C
Ca' Bianca	Camposanto	V-VI	
Carpi Centro	Carpi	V-VI	C
Motta	Cavezzo	V-VI	B
Disvetto	Cavezzo	V-VI	C
Fossa	Concordia sulla Secchia	V-VI	
Vallalta	Concordia sulla Secchia	V-VI	C
Reno Finalese	Finale Emilia	V-VI	C
Massa Finalese	Finale Emilia	V-VI	C
Medolla	Medolla	V-VI	B C
San Giacomo Roncole	Medolla	V-VI	B C
Quarantoli	Mirandola	V-VI	C
Tramuschio	Mirandola	V-VI	C
Forcello	San Possidonio	V-VI	
Pioppa	San Possidonio	V-VI	
Staggia	San Prospero	V-VI	B C
Galeazza	Crevalcore	V-VI	A C
Galliera	Galliera	V-VI	B C
Pieve di Cento	Pieve di Cento	V-VI	C
Bondeno	Bondeno	V-VI	B C
Santa Bianca	Bondeno	V-VI	B C
Ponte Rodoni	Bondeno	V-VI	C
Borgo Piva	Bondeno	V-VI	
Scortichino	Bondeno	V-VI	
Burana	Bondeno	V-VI	B C
Ponti Spagna	Bondeno	V-VI	
Pilastrì	Bondeno	V-VI	A B C
Corpo Reno	Cento	V-VI	C
Bevilacqua	Cento	V-VI	C
Pilastrello	Cento	V-VI	
Buonacompria	Cento	V-VI	B C
Alberone	Cento	V-VI	C
Casumaro	Cento	V-VI	B C
Poggio Renatico	Poggio Renatico	V-VI	A B C
Vigarano Mainarda	Vigarano Mainarda	V-VI	B C
Bagnolo San Vito	Bagnolo San Vito	V	
San Biagio	Bagnolo San Vito	V	
Borgoforte	Borgoforte	V	
Borgofranco sul Po	Borgofranco sul Po	V	
Carbonara di Po	Carbonara di Po	V	
Felonica	Felonica	V	
Gonzaga	Gonzaga	V	
Magnacavallo	Magnacavallo	V	
Mantova	Mantova	V	C
Moteggiana	Moteggiana	V	
Villa Saviola	Moteggiana	V	
Ostiglia	Ostiglia	V	C
Pieve di Coriano	Pieve di Coriano	V	
Dragoncello	Poggio Rusco	V	
Avia	Poggio Rusco	V	
Nuvolato	Quistello	V	C
Revere	Revere	V	
Roncoferraro	Roncoferraro	V	
Barbassolo	Roncoferraro	V	
Barbasso	Roncoferraro	V	
Cadè	Roncoferraro	V	
Casale	Roncoferraro	V	
Governolo	Roncoferraro	V	B C

Località	Comune	Is	DJ
Nosedole	Roncoferraro	V	
Villa Garibaldi (Breda)	Roncoferraro	V	
San Benedetto Po	San Benedetto Po	V	
Villanova de Bellis	San Giorgio di Mantova	V	
Schivenoglia	Schivenoglia	V	
Sermide	Sermide	V	
Porcara	Sermide	V	
Santa Croce	Sermide	V	
Caposotto	Sermide	V	
Serravalle a Po	Serravalle a Po	V	A
Libiola	Serravalle a Po	V	
Sustinente	Sustinente	V	
Sacchetta-Ca' Vecchia	Sustinente	V	C
Suzzara	Suzzara	V	B
Villa Poma	Villa Poma	V	
Ghisione	Villa Poma	V	B
Virgilio	Virgilio	V	
Bergantino	Bergantino	V	
Calto	Calto	V	C
Castelnovo Bariano	Castelnovo Bariano	V	
Ceneselli	Ceneselli	V	C
Ficarolo	Ficarolo	V	B C
Fiesso Umbertiano	Fiesso Umbertiano	V	C
Gaiba	Gaiba	V	
Melara	Melara	V	
Occhiobello	Occhiobello	V	
Stienta	Stienta	V	
Campagnola Emilia	Campagnola Emilia	V	
Correggio	Correggio	V	
Fabbrico	Fabbrico	V	C
Guastalla	Guastalla	V	
Luzzara	Luzzara	V	
Villarotta	Luzzara	V	
Casoni	Luzzara	V	C
Novellara	Novellara	V	
Villanova	Reggiolo	V	
Rio Saliceto	Rio Saliceto	V	
Rolo	Rolo	V	C
San Martino in Rio	San Martino in Rio	V	
Bastiglia	Bastiglia	V	
Bomporto	Bomporto	V	
Sorbara	Bomporto	V	
Gorghetto	Bomporto	V	
Solara	Bomporto	V	A B
Campogalliano	Campogalliano	V	
San Marino	Carpi	V	
Migliarina	Carpi	V	
San Martino Spino	Mirandola	V	
Modena	Modena	V	
Nonantola	Nonantola	V	
Ravarino	Ravarino	V	B C
Rami	Ravarino	V	
Casoni	Ravarino	V	
Stuffione	Ravarino	V	
San Prospero	San Prospero	V	B
San Pietro	San Prospero	V	A B
Soliera	Soliera	V	
Sozzigalli	Soliera	V	
Limidi	Soliera	V	
Argelato	Argelato	V	
Volta Reno	Argelato	V	
Baricella	Baricella	V	
Bentivoglio	Bentivoglio	V	
Castello d'Argile	Castello d'Argile	V	
Venezzano	Castello d'Argile	V	
Bolognina	Crevalcore	V	B
Palata Pepoli	Crevalcore	V	B C
San Venanzio	Galliera	V	
San Vincenzo	Galliera	V	
Malalbergo	Malalbergo	V	
Altedo	Malalbergo	V	
Pegola	Malalbergo	V	
Ponticelli	Malalbergo	V	
San Giorgio di Piano	San Giorgio di Piano	V	
San Giovanni in Persiceto	San Giovanni in Persiceto	V	
San Matteo della Decima	San Giovanni in Persiceto	V	
San Pietro in Casale	San Pietro in Casale	V	
Sant'Alberto	San Pietro in Casale	V	
Sant'Agata Bolognese	Sant'Agata Bolognese	V	
Stellata	Bondeno	V	C
Renazzo	Cento	V	
Dodici Morelli	Cento	V	
Reno Centese	Cento	V	B
Ferrara	Ferrara	V	
Chiesuol del Fosso	Ferrara	V	
Montalbano	Ferrara	V	
Porotto	Ferrara	V	C
Gallo	Poggio Renatico	V	
Coronella	Poggio Renatico	V	
Madonna dei Boschi	Poggio Renatico	V	
Dozzo	Sant'Agostino	V	
Vigarano Pieve	Vigarano Mainarda	V	B C