



**Istituto Nazionale di
Geofisica e Vulcanologia**

***RELAZIONE SULLO STATO DELLE CONOSCENZE
sulla sequenza sismica in centro Italia 2016-2017
(aggiornamento al 2 febbraio 2017)***

Gruppo di Lavoro INGV sul Terremoto in centro Italia

2 febbraio 2017

Riassunto

Nella presente relazione vengono descritte una parte delle attività svolte dall'INGV dall'inizio della sequenza sismica iniziata il 24 agosto 2016.

Sulla base dei dati a disposizione, si evidenzia in particolare l'area che collega la parte settentrionale della sequenza aquilana del 2009 e la parte meridionale della sequenza in corso, dove sia il numero di eventi avvenuti finora che il momento sismico rilasciato sono stati inferiori rispetto alle aree adiacenti a nord-ovest e a sud-est.

Sulla base delle dimensioni dell'area, questa zona rimane potenzialmente in grado di generare terremoti di $M > 5$. Le faglie riconosciute in quest'area appartengono alla prosecuzione meridionale del sistema di faglie che ha prodotto i maggiori terremoti della sequenza del 2016. Per questo settore del sistema di faglia studi paleosismologici permettono di stimare una massima magnitudo 6.6.

Dal punto di vista statistico, la probabilità di un evento di magnitudo pari o superiore a 5, calcolata su tutta l'area interessata dalla sismicità degli ultimi mesi, è stimata nell'ordine del 5% dai modelli probabilistici adottati dall'Operational Earthquake Forecasting (OEF) per la settimana dal 25/01 al 01/02 (vedi *infra*, pag. 48).

Nelle prossime settimane, tra gli scenari possibili di evoluzione della sequenza il più probabile è quello di avere molti aftershocks di magnitudo inferiore a quella massima registrata nella zona di Montereale-Campotosto ($M_{5.5}$). Lo scenario intermedio, in termini di probabilità di accadimento, prevede anche eventi di magnitudo intorno a quella massima registrata nelle ultime settimane ($M \geq 5$), mentre lo scenario meno probabile prevede l'occorrenza di un terremoto di magnitudo confrontabile con quella massima registrata durante la sequenza ($M_{6.5}$).

Una stima quantitativa di tali probabilità è riportata nella sezione "Forecast dei terremoti" (*infra*, pag. 48) che fornisce i valori per la settimana dal 25/1 all'1/2/2017. Questi sono dell'ordine del 37% per eventi di $M \geq 4$, dell'ordine del 5% per $M \geq 5$, dello 0.5% per $M \geq 6$.

I valori di probabilità descritti sopra, anche quelli relativamente agli eventi più grandi, sono da considerare elevati se rapportati a quelli di fondo calcolati dagli stessi metodi statistici in assenza di sequenze sismiche rilevanti.

Va sottolineato che l'area interessata dalla sequenza è tra le zone del territorio italiano con più alta pericolosità sismica, come riportato dal modello di riferimento MPS04.

Introduzione

Questo documento è stato elaborato con il duplice obiettivo di descrivere le numerose attività scientifiche svolte dall'INGV nelle aree colpite dalla sequenza sismica dell'Appennino centrale iniziata il 24 agosto 2016 e di rispondere alla nota formale del Capo Dipartimento della Protezione Civile del 28 gennaio 2017.

Il documento è strutturato in diverse sezioni, ognuna delle quali affronta un aspetto della crisi sismica in atto.

Nella sezione **Sismicità** (*infra*, pag. 5) vengono delineate le caratteristiche sismologiche dei tre terremoti principali della sequenza, così come si evincono dai dati della Rete Sismica Nazionale dell'INGV, che conta oggi oltre 400 stazioni distribuite sul territorio nazionale, integrate da dati registrati dalle reti di altri paesi e istituzioni. Vengono inoltre mostrati i modelli **cinematici di faglia finita** (*infra*, pag. 15).

Nella successiva sezione di **Sismicità Storica** (*infra*, pag. 20) viene invece delineato il quadro della sismicità che ha colpito la regione nel corso dei secoli, e che costituisce una guida fondamentale per valutare la risposta sismica delle aree colpite, la sua propensione a generare nuovi terremoti e la magnitudo massima caratteristica delle diverse aree sismogenetiche.

Si passa quindi a descrivere i cinque pilastri fondamentali dell'intervento INGV nelle aree colpite, gruppi di ricercatori e tecnici che svolgono attività finalizzate a obiettivi operativi molto chiari a supporto sia delle attività di Protezione Civile che di una molteplicità di processi decisionali.

Sismiko: questo gruppo sovrintende al funzionamento della Rete Sismica Mobile, una rete altamente tecnologica che integra temporaneamente la Rete Sismica Nazionale per consentirci di registrare scosse anche molto piccole, fino a magnitudo zero, e garantire la massima accuratezza delle localizzazioni ipocentrali (*infra*, pag. 23).

Emersito: anche in questo caso si tratta di un gruppo che utilizza una rete sismica temporanea per indagare la risposta sismica di sito attesa area per area. I risultati di Emersito hanno grande rilevanza negli studi propedeutici alle scelte di localizzazione dei nuovi insediamenti, temporanei o definitivi, e quindi come guida nel processo di ricostruzione dei centri terremotati (*infra*, pag. 24).

Emergeo: questo gruppo è formato prevalentemente da geologi esperti nell'indagine degli effetti dei terremoti sull'ambiente, il cui compito primario è l'identificazione di dettaglio delle eventuali rotture provocate dall'emersione in superficie di faglie attive a diverse scale. Analogamente al caso precedente, questa funzione assume grande rilevanza nella localizzazione dei nuovi insediamenti, delle vie di comunicazione e delle infrastrutture più critiche (dighe, viadotti, ponti, oleodotti e gasdotti, cabine di trasformazione dell'elettricità), oltre a consentire di ampliare le conoscenze sulla sismogenesi e sulla frequenza dei forti terremoti (*infra*, pag. 26).

QUEST: è un gruppo dedicato al rilevamento e alla quantificazione degli effetti dei forti terremoti

sul patrimonio costruito e secondariamente sull'ambiente, ovvero dei cosiddetti *effetti macrosismici*. Si tratta di una funzione molto delicata che, come per i due gruppi precedenti, serve principalmente per indirizzare la ricostruzione e per stabilire priorità di intervento nelle zone più duramente colpite dai terremoti. L'indagine degli effetti macrosismici costituisce un patrimonio di esperienza e conoscenze utile per prevenire gli effetti di futuri terremoti (*infra*, pag. 33).

IES: Informazione in Emergenza Sismica è il gruppo operativo INGV che in occasione delle emergenze sismiche realizza uno specifico lavoro informativo rivolto a insegnanti delle scuole, agli operatori dei servizi di base e alla popolazione in genere in forma di assemblee pubbliche. Questo lavoro viene realizzato in accordo con il Dipartimento della Protezione Civile nell'ambito del Gruppo di Lavoro DPC-INGV per l'informazione, la formazione e la comunicazione (*infra*, pag. 34).

Nella sezione **Deformazioni del suolo da dati InSAR e GPS e modelli di sorgente** (*infra*, pag. 35) vengono descritti e commentati i risultati conseguiti attraverso l'analisi di dati di interferometria satellitare e da misure geodetiche di precisione su stazioni GPS. Si riassumono i risultati delle osservazioni dal 24 agosto fino ad oggi, includendo anche parte dei risultati ottenuti per la sequenza de L'Aquila. I dati geodetici vengono utilizzati per elaborare modelli delle sorgenti sismiche, ma possono contenere anche deformazioni asismiche (eventi *slow slip* o *afterslip*). Come nuovo risultato viene mostrato il modello di sorgente preliminare per gli eventi del 18 gennaio scorso, che risultano localizzati in profondità lungo il settore centro-meridionale della faglia del Monte Gorzano. Si evidenziano anche due zone di basso o nullo *slip* lungo la stessa faglia, immediatamente a nord e a sud della zona di rottura del 18 gennaio.

La sezione **Shakemaps** (*infra*, pag. 47) descrive i risultati di un gruppo di ricercatori e tecnologi il cui obiettivo primario è quello di realizzare in tempo reale mappe dello scuotimento sismico. Queste mappe sono cruciali nelle prime ore che seguono il verificarsi di un terremoto perché consentono di mettere subito a fuoco le aree in cui ci si aspetta siano avvenuti i danni più gravi e quindi, incrociando le stime ottenute con la distribuzione della popolazione esposta, di stabilire le priorità di intervento in emergenza.

Nella sezione **Forecast dei terremoti (OEF)** (*infra*, pag. 48) viene descritto il funzionamento e l'utilità della tecnica dello Operational Earthquake Forecasting (OEF). Sappiamo che, purtroppo, un forte terremoto è sempre possibile nella maggior parte del territorio italiano. Questa possibilità aumenta drasticamente durante una sequenza sismica come quella iniziata il 24 agosto 2016 che include eventi di magnitudo maggiore di 6.0. Il compito dei ricercatori che operano in questo settore di ricerca di frontiera è quello di trasformare il concetto di possibilità, vago e inutilizzabile a fini pratici, in una "probabilità", che invece ben si presta ad essere posta alla base di processi decisionali di natura diversa.

Sismicità

La sequenza sismica del centro Italia, iniziata con il terremoto M_w 6.0 di Amatrice e la forte replica M_w 5.4 avvenuti il 24 agosto 2016, è stata caratterizzata da forti terremoti alla fine del mese di ottobre 2016. Il 26 ottobre due eventi di M_w 5.4 e 5.9 hanno interessato l'area posta al confine Marche - Umbria tra i Comuni di Castelsantangelo sul Nera (MC), Norcia (PG) e Arquata del Tronto (AP). La mattina del 30 ottobre un terremoto di M_w 6.5 con epicentro non lontano da Norcia ha interessato l'intera area già profondamente colpita dalla sequenza; questo è stato il più forte terremoto registrato negli ultimi 30 anni in Italia.

A quasi 5 mesi dall'inizio dell'emergenza sismica, il 18 gennaio 2017 si sono verificati quattro eventi di magnitudo ≥ 5.0 . Gli eventi si collocano nella parte meridionale della sequenza sismica.

La sismicità 2016-2017 del centro Italia si sviluppa in un'area compresa tra la sequenza del 1997 (Umbria - Marche) a nord e la sequenza del 2009 (L'Aquila) a sud. In figura 1 sono evidenziati in mappa i rapporti tra queste sequenze.

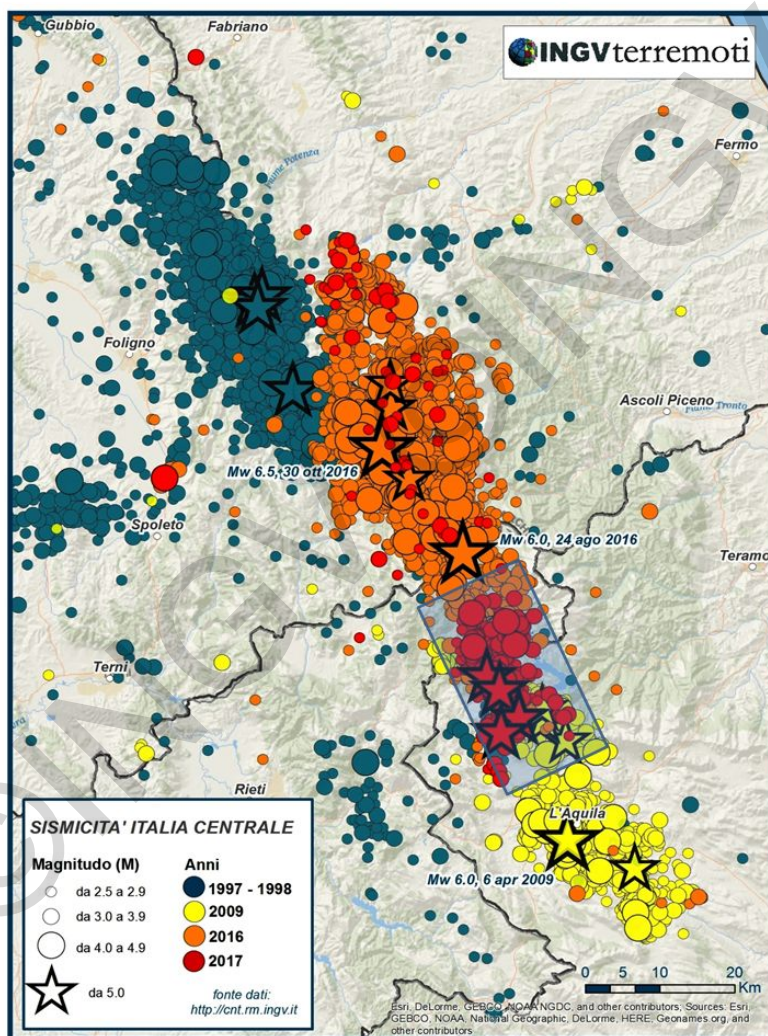


Figura 1. MAGGIORI SEQUENZE SISMICHE IN ITALIA CENTRALE NEGLI ULTIMI ANNI. Sono riportati gli epicentri dei terremoti: in blu la sequenza sismica del 1997 (Umbria – Marche, Colfiorito), in giallo la sequenza del 2009 (L'Aquila), in arancione (2016) e in rosso (2017) la sismicità di questi ultimi 5 mesi. Nel rettangolo è rappresentata l'area dove la sismicità e il momento sismico rilasciato sono stati finora inferiori rispetto alle aree adiacenti e si possono attendere eventi di $M > 5$.

In figura 2 è riportata la mappa degli epicentri aggiornati al 29_01_2017-01-30; le localizzazioni riportate sono quelle distribuite nella banca dati ISIDe [2016; Marchetti et al., 2016; Annals of Geophysics, Vol. 59, Fast Track 5 2016: The Amatrice seismic sequence: preliminary data and results].

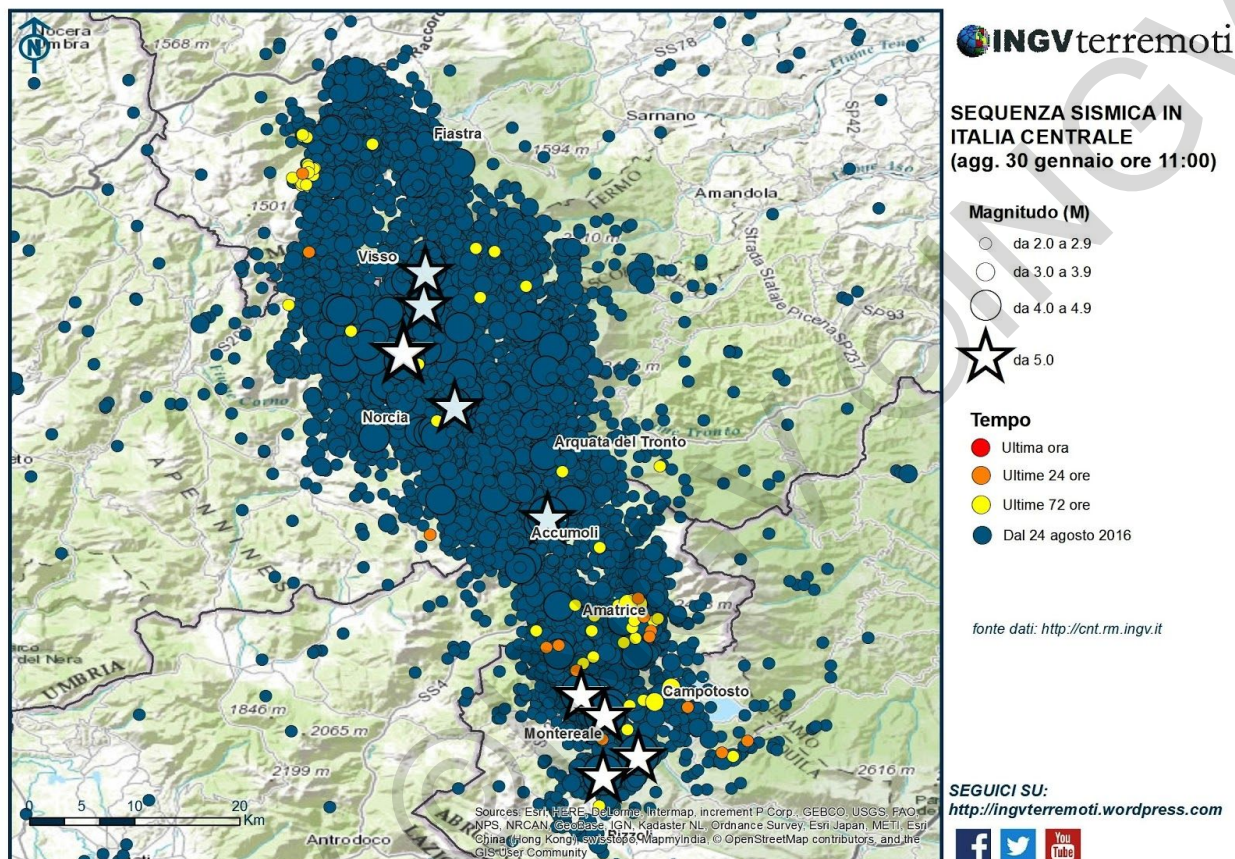
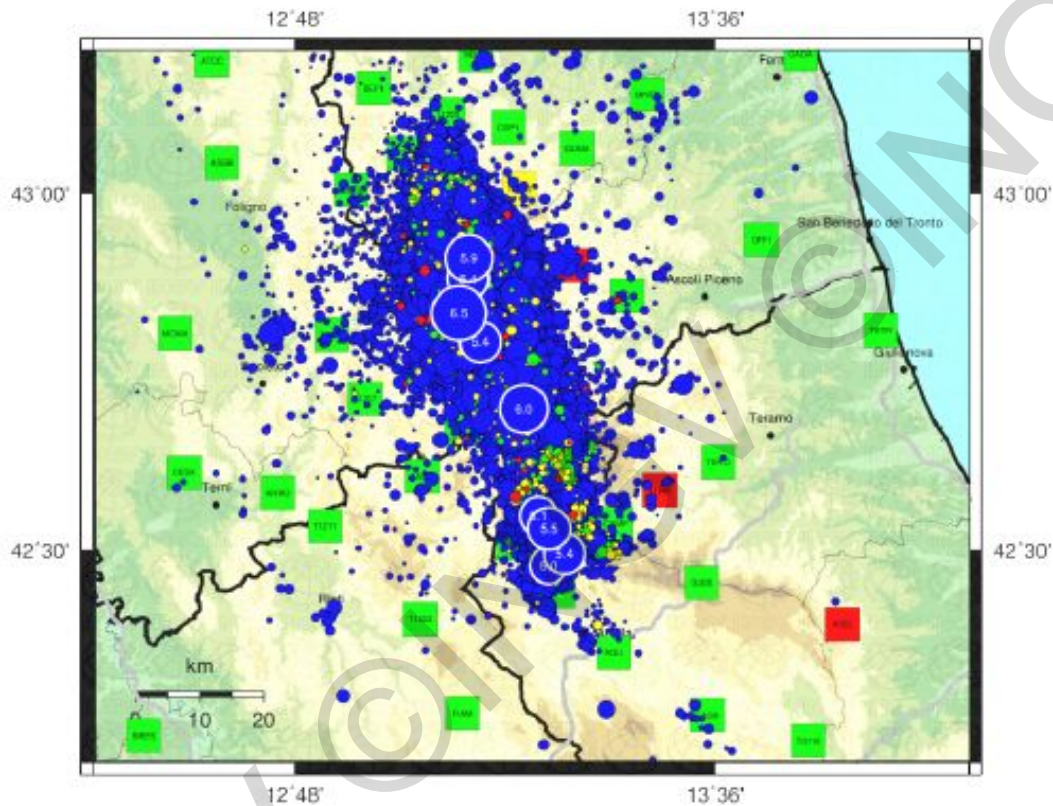


Figura 2. SEQUENZA SISMICA IN ITALIA CENTRALE AGGIORNAMENTO 30 GEN 2017 ORE 11. Mappa degli eventi sismici con magnitudo maggiore di 2.0, distribuzione degli epicentri della sequenza sismica del Centro Italia.

La sequenza sismica conta più di 50mila scosse localizzate, di cui 9 con magnitudo ≥ 5.0 , 59 con magnitudo tra 4.0 e 5.0, e quasi 1000 eventi di magnitudo compresa tra 3.0 e 4.0. (Figura 3).

Mappa Epicentrale della Sequenza Sismica per il periodo 23-08-2016 : 01-02-2017



Aggiornata al 2017-02-01,06:01:06 UTC, numero di eventi 52146

	Oggi	Ieri	2gg fa	Precedenti
MI < 3.0	45	266	256	50502
3.0 ≤ MI < 4.0	0	0	0	988
4.0 ≤ MI < 5.0	0	0	0	59
MI ≥ 5.0	0	0	0	9

Stato della rete

■ Funzionante
 ■ Parzialmente funzionante
 ■ Guasta

(<http://iside.rm.ingv.it>)

Figura 3. Mappa epicentrale della sequenza sismica.

L'andamento temporale della sequenza è descritta nei grafici che contano il numero di terremoti giornalieri e cumulati della sequenza (Figura 4) e il rilascio di momento sismico giornaliero (Figura 5). La sequenza è ancora molto attiva.

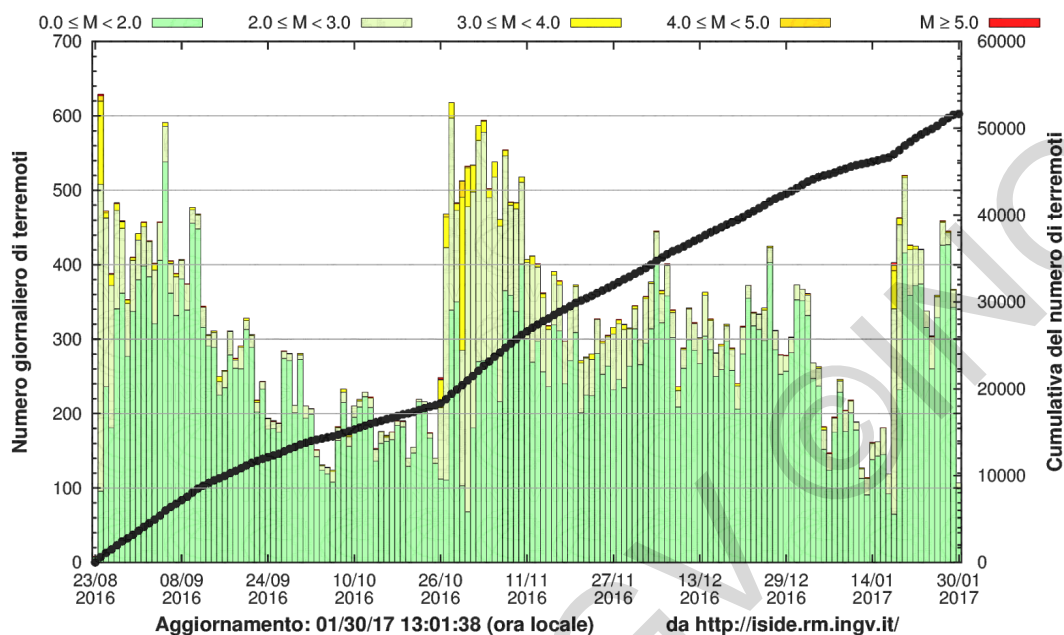


Figura 4. Numero di eventi giornalieri e cumulati della sequenza sismica.

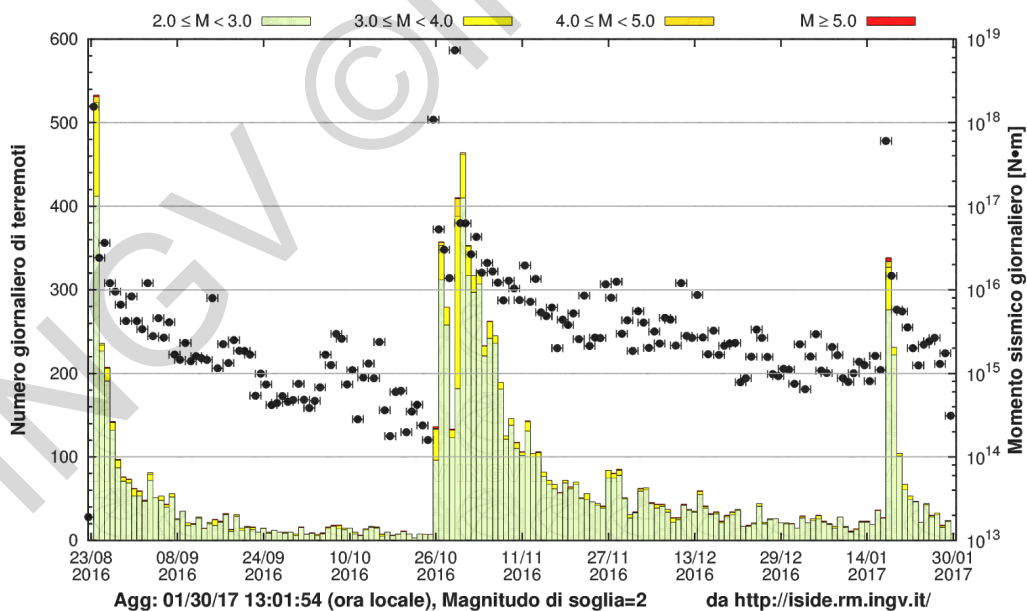
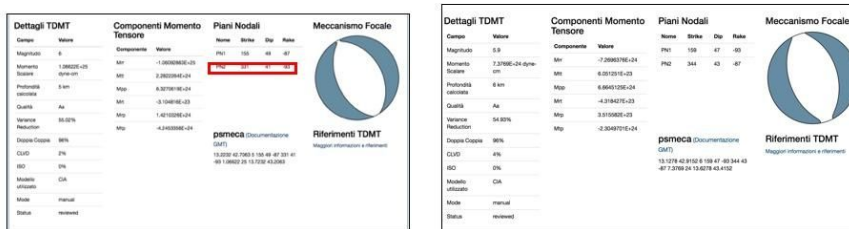


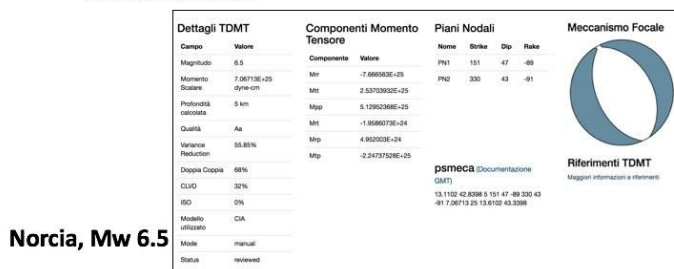
Figura 5. Numero di eventi giornalieri e rilascio di momento sismico giornaliero della sequenza sismica.

I meccanismi focali degli eventi principali a partire dal 24 agosto 2016 mostrano una cinematica coerente con una faglia distensiva con piani nodali in direzione NW-SE (Figura 6).



AMATRICE, Mw 6.0

USSITA, Mw 5.9



Norcia, Mw 6.5

Da: <http://cnt.rm.ingv.it/>

Metodo: inversione delle forme d'onda di lungo periodo con il Time Domain Moment Tensor (TDMT) di Dreger e Helmberger (1993) usato da INGV con un modello di velocità calibrato per la gli Appennini centro-settentrionali (Scognamiglio et al., 2009, 2011)

2016-08-24	155	49	-87	1.06 1025	6.0
2016-10-26	159	47	-93	7.37 1024	5.9
2016-10-30	151	47	-89	7.06 1025	6.5

Figura 6. Meccanismi focali dei terremoti più forti e valori del momento sismico rilasciato dagli eventi principali.

La figura 7 mostra l'andamento spazio-temporale della sequenza.

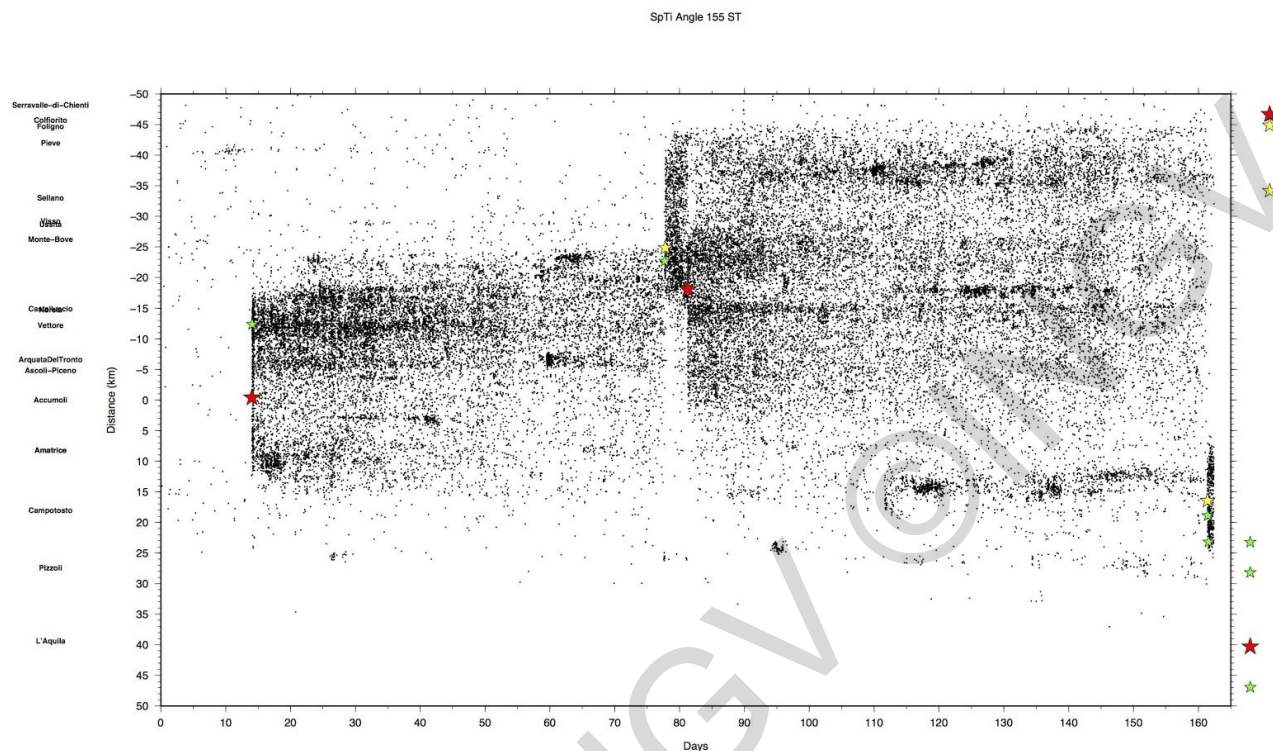


Figura 7. Distribuzione spazio temporale della sismicità da agosto 2016 al 19 gennaio 2017, lungo un profilo ad andamento NW-SE che va da Serravalle di Chienti a L'Aquila. Le stelle indicano gli eventi più forti. La figura mostra in quale sequenza temporale si sono attivati i vari segmenti del sistema di faglie. Le stelle sulla destra del grafico indicano la posizione lungo questo profilo dei terremoti più forti delle sequenze del 1997 e del 2009.

Le localizzazioni ipocentrali della sequenza ci mostrano la geometria del sistema di faglie in profondità. In figura 8 sono mostrate 4 sezioni da nord a sud. La faglia principale, su cui ha avuto luogo il maggior rilascio di slip è la faglia immergente a sud-ovest che da una profondità di circa 10 km raggiunge la superficie in corrispondenza dei sistemi di faglia noti come M.ti della Laga e M.te Vettore-M.te Bove.

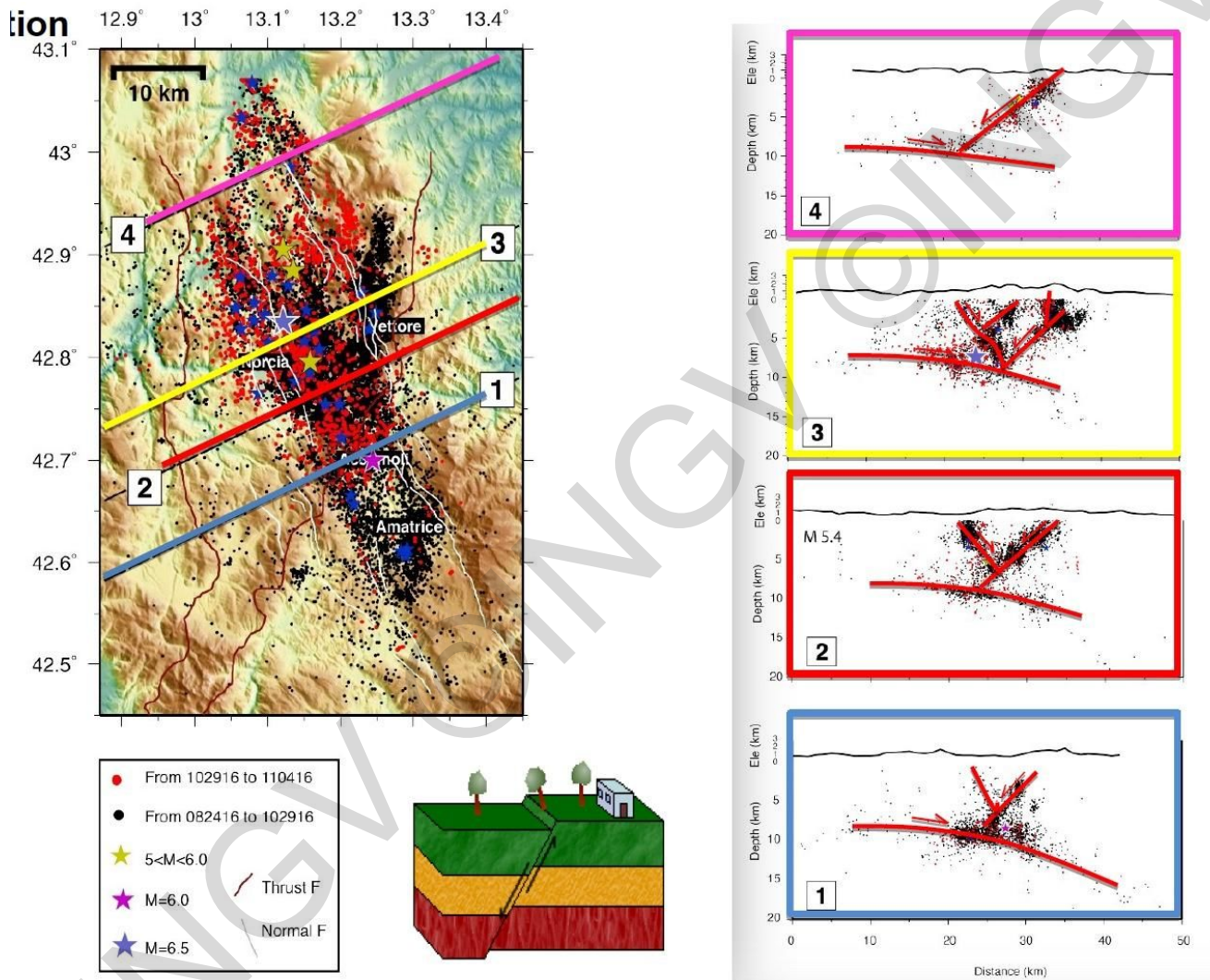


Figura 8. Mappa e distribuzione in profondità degli ipocentri dei terremoti. A destra le quattro sezioni che corrispondono alle linee riportate nella mappa. Gli ipocentri disegnano un sistema di faglie distensivo piuttosto complesso; queste sono schematizzate con le linee rosse sulle sezioni stesse.

Per meglio definire i rapporti spaziali tra la sequenza sismica del 2009 e la sismicità in corso è riportata in una mappa di maggior dettaglio la porzione meridionale della sequenza (Figura 9).

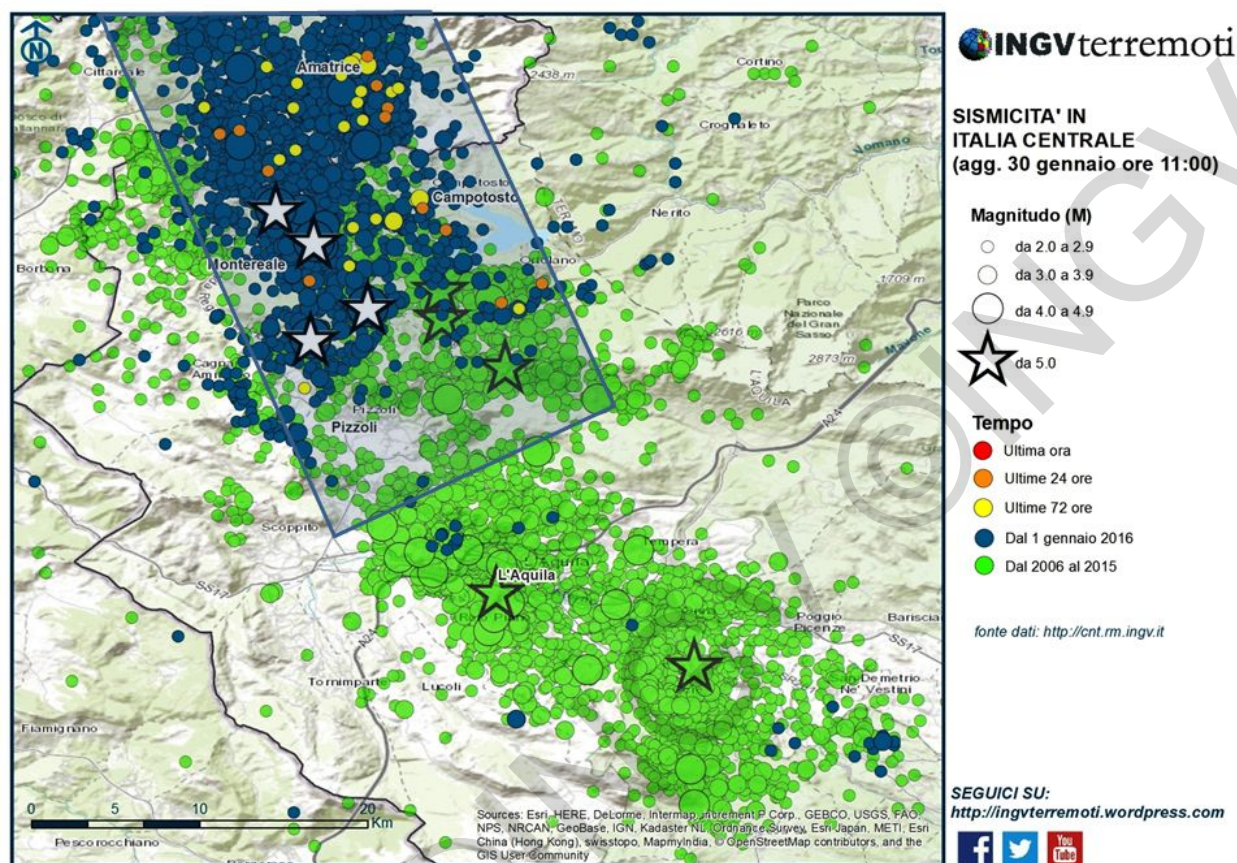


Figura 9. SISMICITÀ IN ITALIA CENTRALE (ZONA AQUILANO), AGGIORNAMENTO 30 GEN 2017 ORE 11. Sismicità nella zona tra Amatrice e L'Aquila: in verde gli epicentri dei terremoti dal 2006 al 2015, in blu gli eventi 2016-2017. Nel rettangolo è rappresentata l'area dove la sismicità e il momento sismico rilasciato sono stati finora inferiori rispetto alle aree adiacenti e si possono attendere eventi di $M>5$.

In particolare, grazie agli studi precedenti fatti sulla sequenza del 2009, e avendo a disposizione in questa emergenza una rete densa di stazioni sismiche trasmesse in tempo reale (grazie all'intervento di SISMO, v. paragrafi successivi), possiamo ottenere localizzazioni ipocentrali accurate e definire su quali segmenti di faglia nucleano i terremoti man mano che avvengono (Figura 10).

La rilocalizzazione degli eventi di magnitudo maggiore o uguale a 5.0 del 18 gennaio 2017 e delle successive repliche (riportati in rosso nelle sezioni di figura 10) mostrano una chiara riattivazione della parte centro-meridionale del sistema di faglia dei Monti della Laga (Faglia di Campotosto) con una geometria del tutto consistente a quella osservata nel corso della sequenza del 2009 (sismicità in blu). In particolare, si identifica una struttura immergente a SW con pendenza di circa 45° che tende a verticalizzarsi nella parte più alta sopra i 5 km dove né prima del 18 gennaio 2017, né durante la sequenza del 2009, era stata osservata sismicità rilevante.

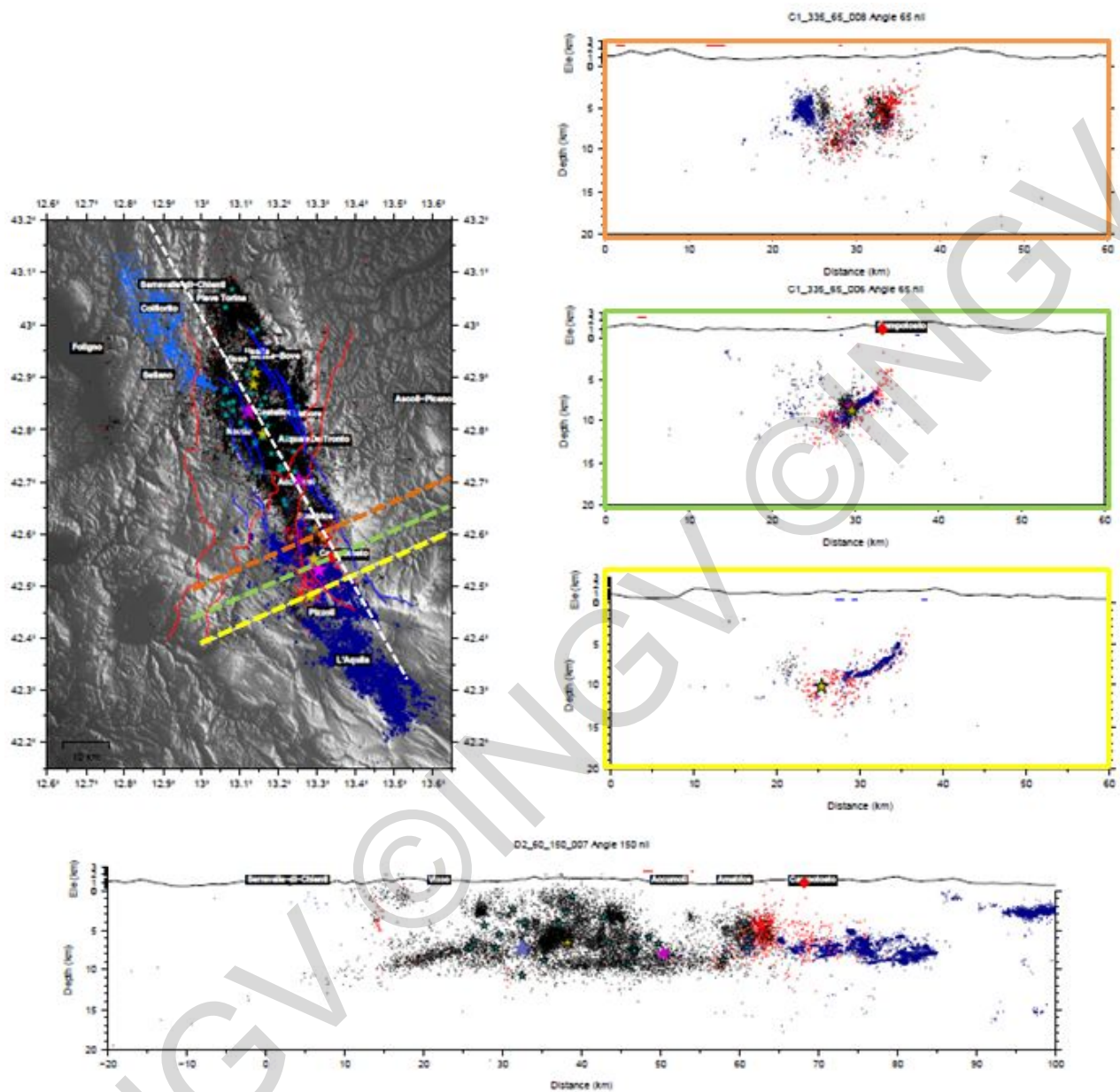
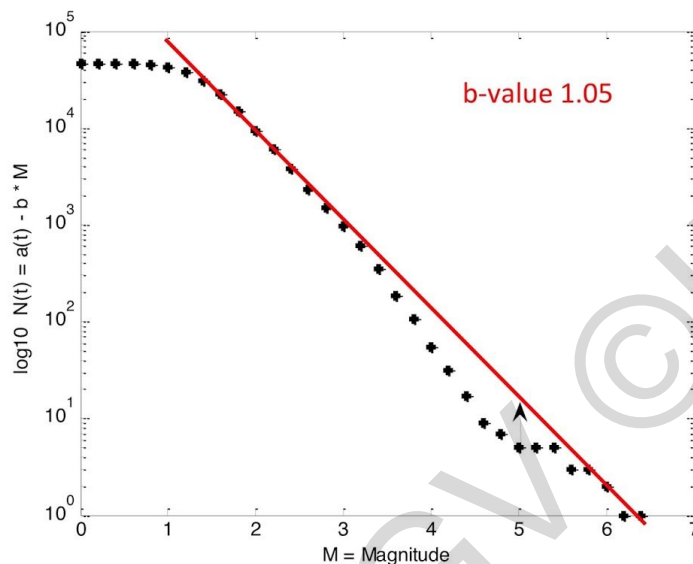


Figura 10. Mappa e sezioni della sismicità delle sequenze del: 1997 (in celeste, Chiaraluce et al., 2003); del 2009 (in blu, Valoroso et al., 2013); del 2016-2017 (in nero, Chiaraluce et al., 2017). La sismicità del 18 e 19 gennaio è riportata in rosso. Gli eventi con magnitudo maggiore o uguale a 5.0 sono le stelle colorate. Nelle sezioni sono chiare le geometrie dei segmenti di faglia che si sono attivati nella sequenza del 2009 e che sono stati nuovamente interessati dalla sismicità della sequenza in corso. In particolare, gli eventi con magnitudo maggiore o uguale a 5.0 si localizzano alla base della “faglia di Campotosto”.

La Figura 11 mostra la Gutenberg-Richter per l'area interessata dalla sequenza prima e dopo gli eventi del 18 gennaio.

Total b-value 24.08.2016 - 17.01.2017



Total b-value 24.08.2016 - 18.01.2017

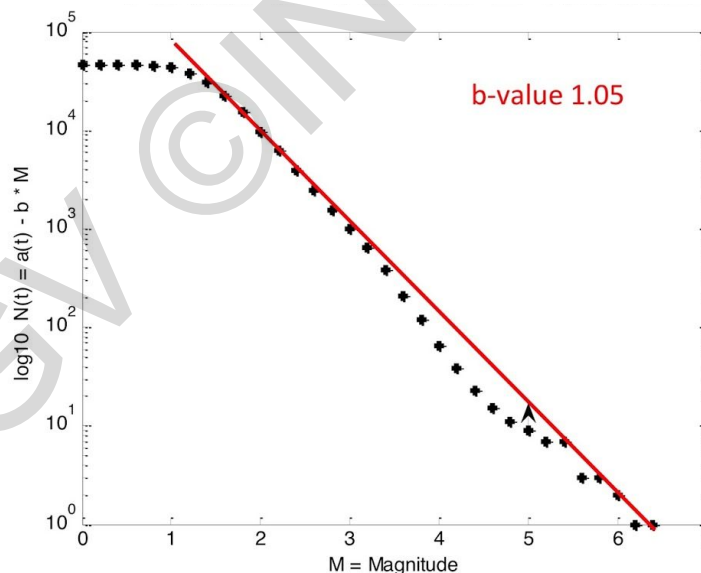


Figura 11. *b-value della Gutenberg-Richter dell'area dal 24 agosto 2016 al 17 gennaio 2017 (pannello superiore) e dopo il 18 gennaio 2017. Premesso che l'andamento della frequenza in funzione della magnitudo in zone limitate non presenta sempre un andamento rettilineo, gli eventi del 18 gennaio hanno parzialmente rettificato la curva. Eventi che la rettifichino ulteriormente sono possibili tra la M 3.5 e 5.5. A scala globale, negli ambienti estensionali il b-value è mediamente 1.1.*

Modelli cinematici di faglia finita

I modelli di faglia estesa permettono di comprendere la cinematica della rottura, in particolare, la distribuzione di dislocazione sul piano di faglia, la durata dell'evento e la velocità di rottura. Solitamente tali modelli vengono ricavati invertendo i dati accelerometri (di norma fino a frequenze di 0.5/1 Hz) e/o dati geodetici (SAR/GPS a frequenza zero).

Una volta ottenuto il modello cinematico è possibile utilizzarlo come input per calcolare sismogrammi sintetici anche in zone dove non si hanno dati registrati. In questo modo si possono ricavare i parametri del ground motion stimati.

Per la sequenza dell'Italia centrale del 2016-2017 sono disponibili modelli cinematici ottenuti invertendo solo i dati accelerometrici per i seguenti eventi:

#	Lat	Lon	Depth	Day	Month	Year	Mw	Strike	Dip
1	42.70	13.24	7.3	24	08	2016	6.0	156	50
2	42.90883	13.1403	5.5	26	10	2016	5.9	159	47
3	42.8398	13.11	9.52	30	10	2016	6.5	151	47
4	42.55	13.29	8.5	18	01	2017	5.5	161	51
5	42.51957	13.29224	11	18	01	2017	5.4	140	40

Referenze dei modelli plottati:

- 1) Tinti et al., 2016, GRL
- 2) Chiaraluce et al., 2017, submitted to SRL
- 3) Chiaraluce et al., 2017, submitted to SRL
- 4) Personal communication Tinti & Scognamiglio
- 5) Personal communication Tinti & Scognamiglio

Per ricavare i modelli di sorgente cinematica abbiamo usato il metodo d'inversione Non-negative least-squares [per il metodo vedi bibliografia in Tinti et al., 2016]. Gli accelerometri sono stati integrati nel tempo e filtrati tra 0.02 e 0.5 Hz. Le funzioni di Green sono calcolate utilizzando il modello CIA [per il metodo vedi bibliografia in Tinti et al., 2016 e filtrate nella stessa banda di frequenza.

Le caratteristiche principali dei modelli ottenuti sono le seguenti:

24 agosto Mw=6 (AMATRICE EQ.). Il modello ricavato mostra una distribuzione di slip eterogenea rappresentata da due aree di massima dislocazione (slip patches): una localizzata up-dip rispetto all'ipocentro e una seconda più estesa verso nord-ovest. Il massimo valore di dislocazione è di circa 100 cm [Tinti et al., 2016].

26 ottobre Mw=5.9 (VISSO EQ.). Questo evento è in realtà un doppio evento i cui ipocentri sono localizzati a 4 km di distanza l'uno dall'altro. La rottura inizia propagandosi verso il basso e poi si propaga in modo unilaterale verso nord-ovest. Il massimo valore di dislocazione è di circa 80 cm.

30 ottobre Mw=6.5 (CASTELLUCCIO EQ.). Il modello cinematico di questo evento mostra un'estesa area di slip (10x6 km²) caratterizzata da un valore medio di slip di circa 130 cm e un massimo slip di 260 cm. L'inversione non include la topografia ma il modello mostra un

significativo contributo di slip nella parte più superficiale della faglia modellata (il top della faglia si trova a 850 m sopra il livello del mare) in corrispondenza e in accordo con le rotture superficiali riportate da EMERGEO (vedi paragrafi successivi).

18 gennaio 2017 Mw=5.5 (MONTEREALE EQ.). Il modello cinematico (ancora in revisione) mostra una direttività up-dip verso NW e in particolare, data la sua posizione geografica, mostra una forte direttività verso Amatrice e Accumoli. Anche i dati registrati riportano ampiezze maggiori in direzione Nord. Il valore massimo di dislocazione è di circa 40 cm. Il top della faglia si trova 800 m circa sopra il livello del mare.

18 gennaio 2017 Mw=5.4 (MONTEREALE EQ.). Il modello cinematico (ancora in revisione) mostra un'area di slip up-dip rispetto all'ipocentro. Il valore di massimo slip raggiunge i 60 cm. L'evento è più profondo quindi il top della faglia ha una profondità di 5.5 km rispetto al livello del mare.

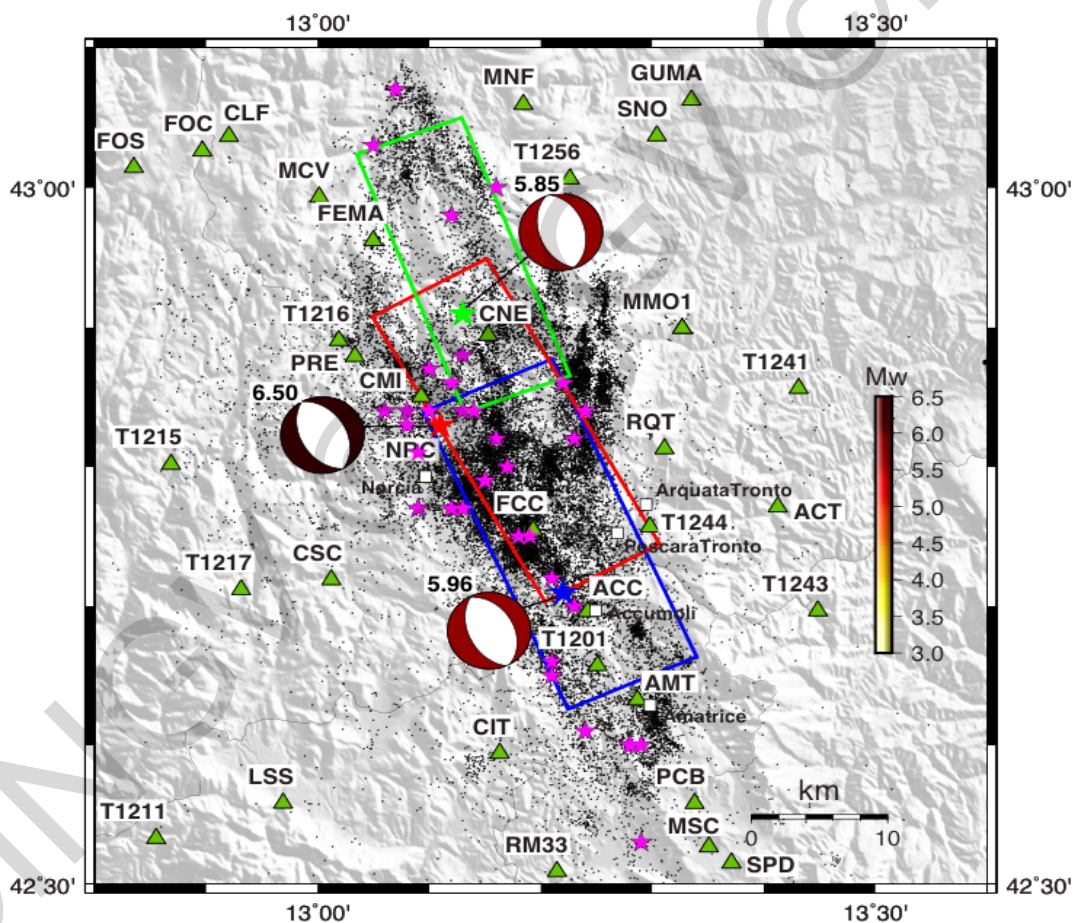


Figura 12. Stazioni accelerometriche utilizzate durante l'inversione cinematica dei tre eventi principali della sequenza. La geometria dei piani di faglia dei tre eventi è stata scelta utilizzando i momenti tensori TDMT dei tre eventi. In blu l'evento del 24/08/2016, in verde l'evento del 26/10/2016 e in rosso l'evento del 30/10/2016.

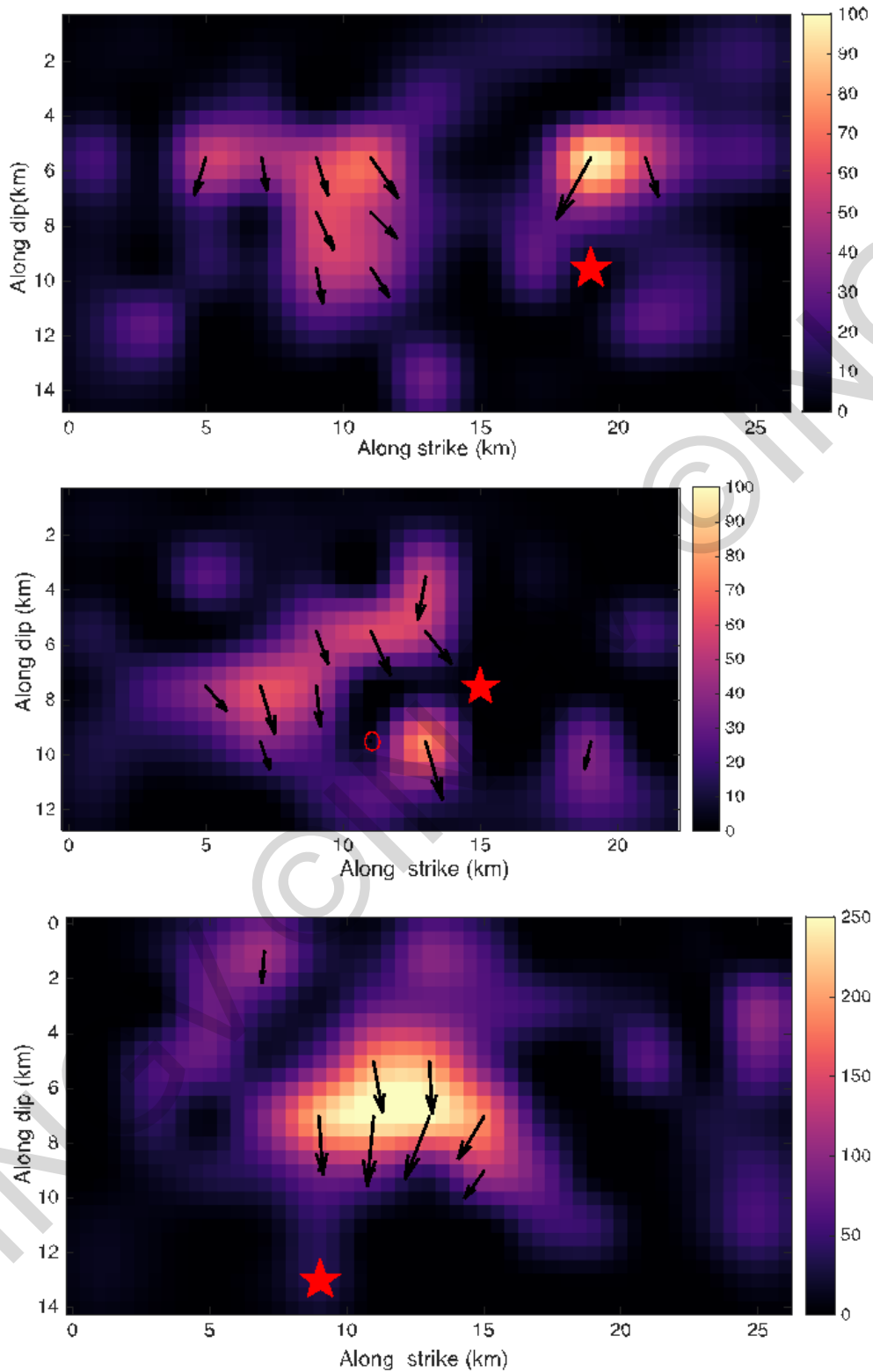


Figura 13. Distribuzione di slip in centimetri dei tre eventi principali: in alto l'evento del 24/08/2016 ($M_w=6.0$), al centro l'evento del 26/10/2016 ($M_w=5.9$) e in basso l'evento del 30/10/2016 ($M_w=6.5$).

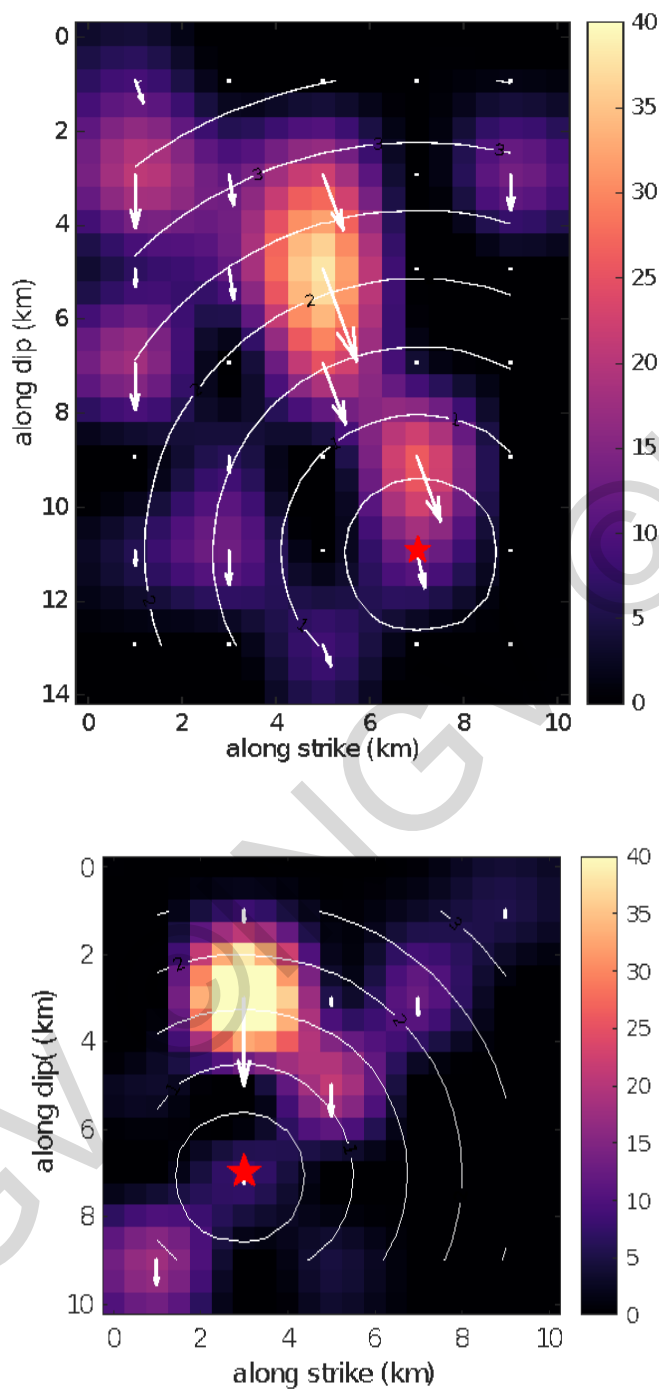


Figura 14. Distribuzione di slip in centimetri dei due eventi più significativi del 18/01/2017: in alto l'evento di magnitudo $M_w=5.5$ delle ore: 10.14 UTC, in basso l'evento di magnitudo $M_w=5.4$ delle ore 10.25 UTC. Il top della faglia è circa 800 m sopra il livello del mare per il primo evento e ad una profondità di 5.5 km per il secondo evento.

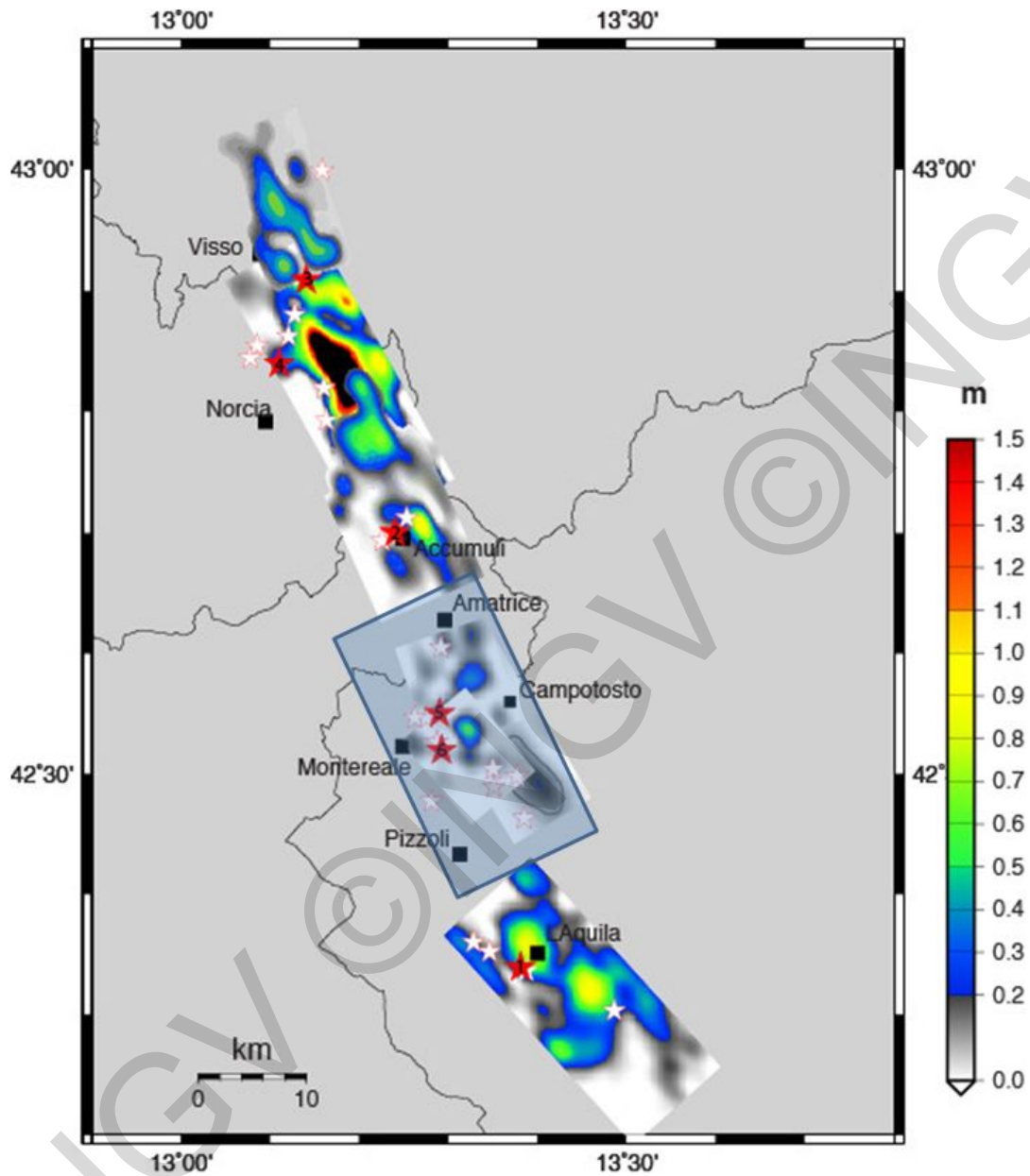


Figura 15. Distribuzione dello slip sui piani di faglia principali che si sono attivati dal 6 aprile 2009 al 31 gennaio 2017. Il rettangolo grigio corrisponde ad un'area di deficit di slip e sismicità rispetto alle zone adiacenti a nord-ovest e a sud-est.

La sismicità storica

Gli eventi principali della sequenza in corso, fra i Monti della Laga, la Valnerina e l'Aquilano, hanno interessato un territorio che storicamente è caratterizzato da numerosi terremoti molto forti, alcuni dei quali sono avvenuti all'interno di sequenze complesse. Nessuna delle sequenze sismiche storiche presenta però caratteristiche del tutto confrontabili con quella in corso.

Nel suo complesso la storia sismica dell'area è relativamente ben conosciuta, ma i livelli di completezza delle conoscenze variano molto nei diversi settori dell'area e le caratteristiche della sismicità in ciascun settore sono sensibilmente diverse.

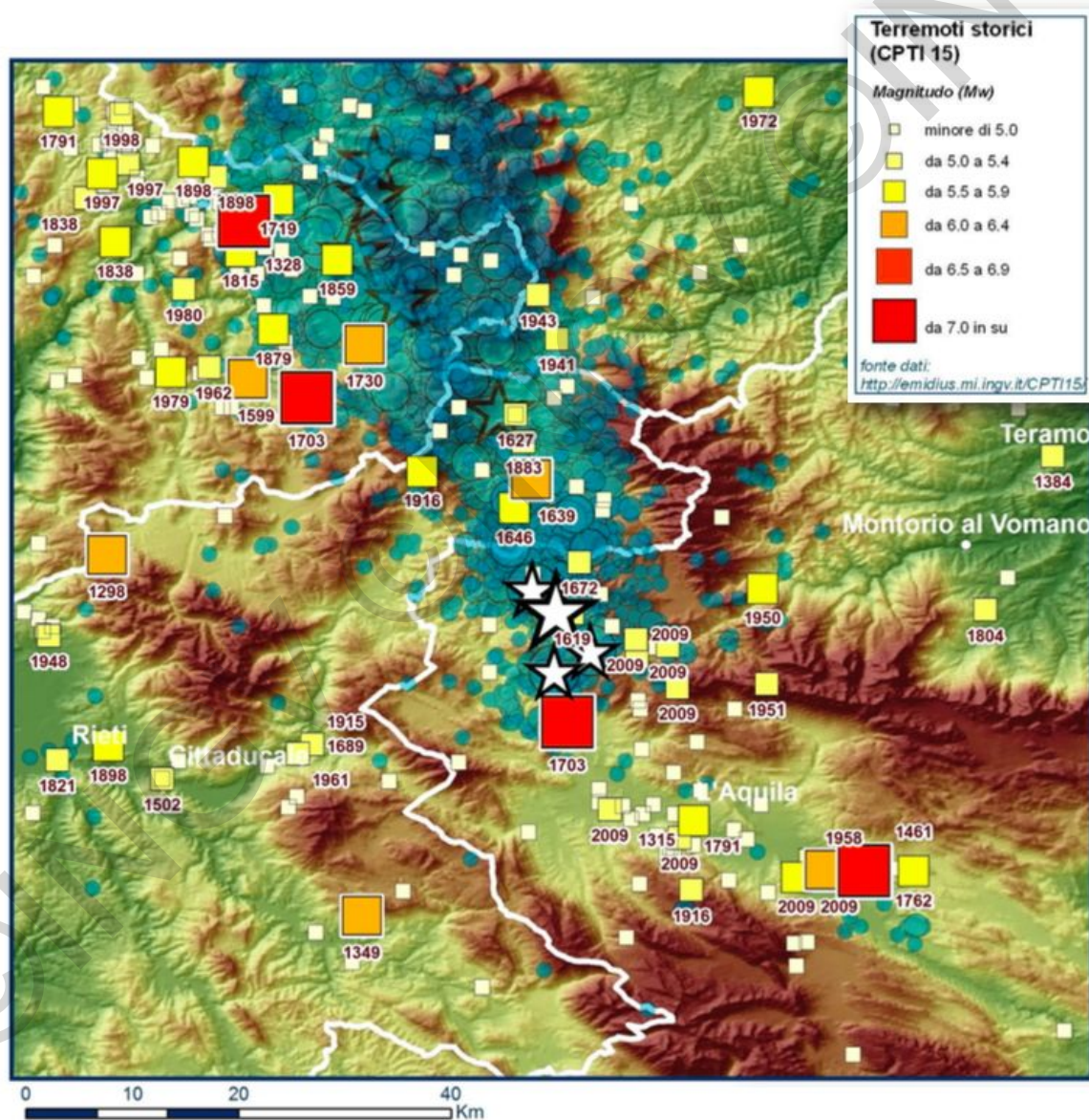


Figura 16. Mappa dei terremoti storici della regione. Le stelle rappresentano gli eventi del 18 gennaio.

Il settore di Amatrice - dove si sono verificati gli effetti maggiori del terremoto del 24 agosto 2016 - ha come caratteristica principale la presenza di un cluster di quattro terremoti, verificatisi rispettivamente nel luglio 1627 (Accumoli, lo 7-8 MCS, M W 5.3); il 7 ottobre 1639 (Amatrice, lo 9-10 MCS, M W 6.2) – terremoto che devastò il centro urbano di Amatrice e diverse località circostanti; nel 1646 (Monti della Laga, lo 9 MCS, M W 5.9) e nel 1672 (Amatrice, lo 7-8 MCS, M W 5.3).

□ Nella Valnerina i terremoti storici del 1 dicembre 1328 (Valnerina, lo 10 MCS, M W 6.5); del 27 giugno 1719 (Valnerina, lo 8 MCS, M W 5.6); del 12 maggio 1730 (Valnerina, lo 9 MCS, M W 6) e del 22 agosto 1859 (Valnerina, lo 8-9 MCS, M W 5.7) hanno localizzazioni prossime a quella dell'evento principale del 30 ottobre.

Nell'area di Visso, Ussita e Castelsantangelo sul Nera le intensità raggiunte dalle scosse del 26 ottobre, potrebbero rappresentare i massimi storici per questi comuni, almeno allo stato attuale delle conoscenze.

Nel settore più meridionale, interessato dagli eventi del 18 gennaio scorso, gli eventi storicamente più importanti appartengono al 'cluster' seicentesco, con gli eventi del 7 luglio 1619 (Aquilano, lo 7-8 MCS, M W 5.3), che fu avvertito a Roma, produsse danni leggeri a L'Aquila e alcuni crolli a Mascioni e Montereale, e quello dell'8 giugno 1672 (Monti della Laga, lo 7-8, M W 5.3), avvertito in un'area molto vasta fino a Roma, con danni gravi a Montereale e Campotosto, gravissimi in alcuni villaggi non meglio precisati tra Amatrice e Montereale. Si annovera inoltre, tra gli eventi più recenti che hanno procurato danni rilevanti nella zona tra Amatrice, Montereale e il settore occidentale del Teramano, quello del 5 settembre del 1950 (lo 8 MCS, Mw W 5.7).

La sequenza in corso non è confrontabile con la lunga e complessa sequenza del 1703 (14 gennaio, Valnerina, lo 11, M W 6.9; 2 febbraio, Aquilano, lo 10, M W 6.7) il cui impatto sul territorio fu sensibilmente più grave di quello che sta emergendo per la sequenza attuale.

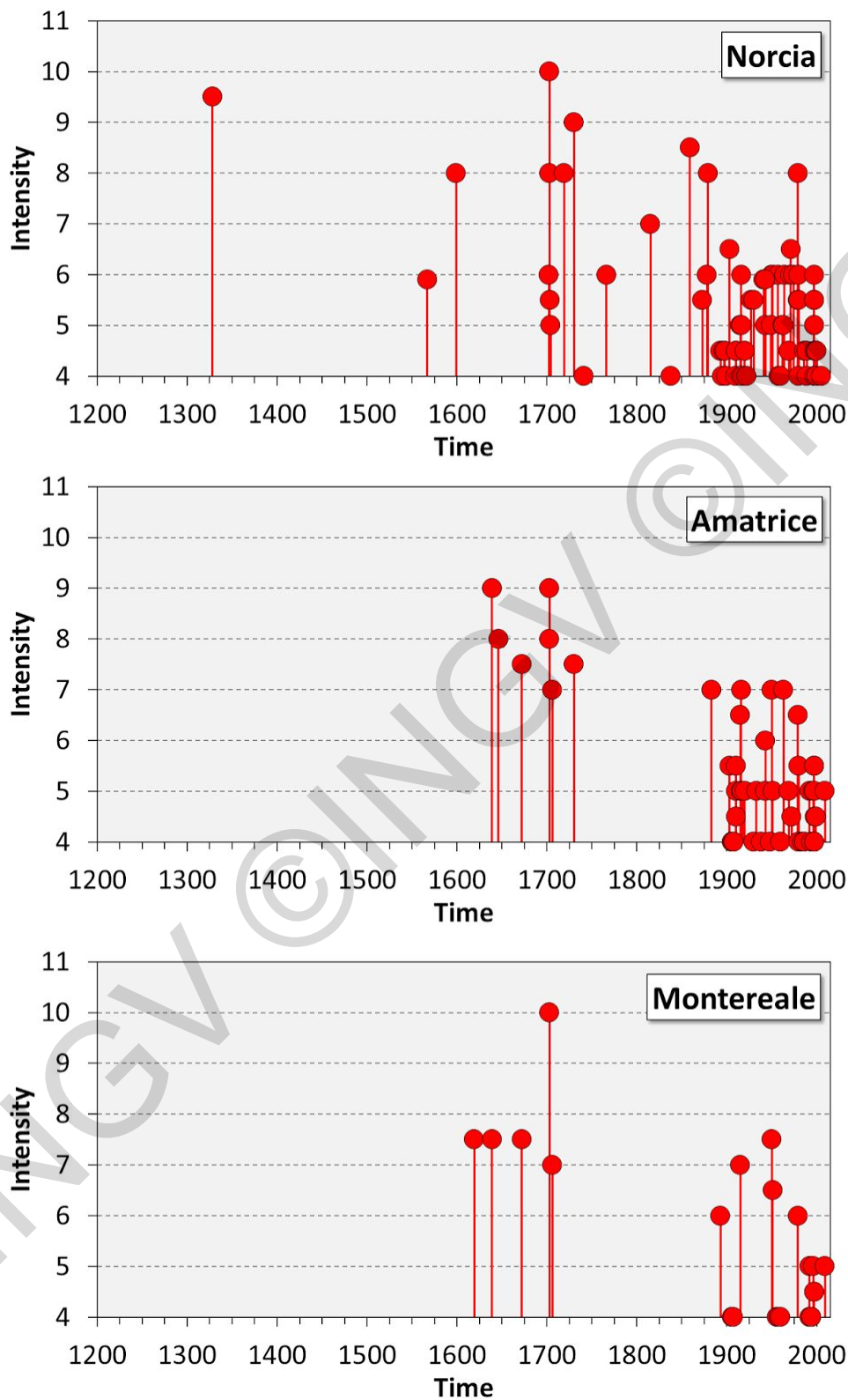


Figura 17. Storie sismiche di Norcia, Amatrice e Monteverde a confronto, [<http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>].

SISMIKO: la Rete Sismica Mobile

SISMIKO è una *task force* operativa che prevede il coordinamento a livello nazionale delle Reti Sismiche Mobili di Pronto Intervento [Moretti et al., 2012; 2016] e coinvolge le diverse Sezioni INGV che si occupano di norma del monitoraggio sismico del territorio nazionale.

L'installazione di stazioni sismiche temporanee ad integrazione delle reti permanenti aumenta la capacità di detezione dei terremoti e la qualità delle loro localizzazioni consentendo nell'immediato di definire con maggiore precisione il fenomeno in corso e fornendo dei dati di ottima qualità e dettaglio anche per studi *off-line* di sismotettonica e fisica dei terremoti.

Il 24 agosto 2016, a poche ore dalla prima forte scossa di terremoto, il gruppo operativo INGV SISMIKO si è attivato per l'implementazione di una rete sismica temporanea che, alla fine della prima settimana di emergenza, contava 18 stazioni di cui 13 trasmesse in tempo reale [Moretti et al., 2016; SISMIKO working group, 2016a]. La geometria della rete è stata più volte rimodulata a seguito delle scosse di fine ottobre 2016 e di metà gennaio 2017 con l'aggiunta di 5 stazioni [SISMIKO working group, 2016b].

Attualmente la rete temporanea SISMIKO è costituita da 24 stazioni tutte trasmesse in tempo reale coprendo un'area di circa 75 x 65 km, dall'abitato di Camerino in provincia di Macerata a nord sino a Pizzoli in provincia dell'Aquila a sud, da Morro Reatino in provincia di Rieti a ovest sino a Pedara in provincia di Ascoli Piceno ad est (Figura 18). A queste stazioni vanno aggiunte altre 25 stazioni sismiche *Broad Band* (BB) installate nell'ambito di una collaborazione con British Geological Survey che ha consentito di dimezzare l'inter-distanza tra le stazioni, passando da circa 15-18 km a 6-8 km, anche nelle aree prossimali alla sequenza (esagoni blu in Figura 18).

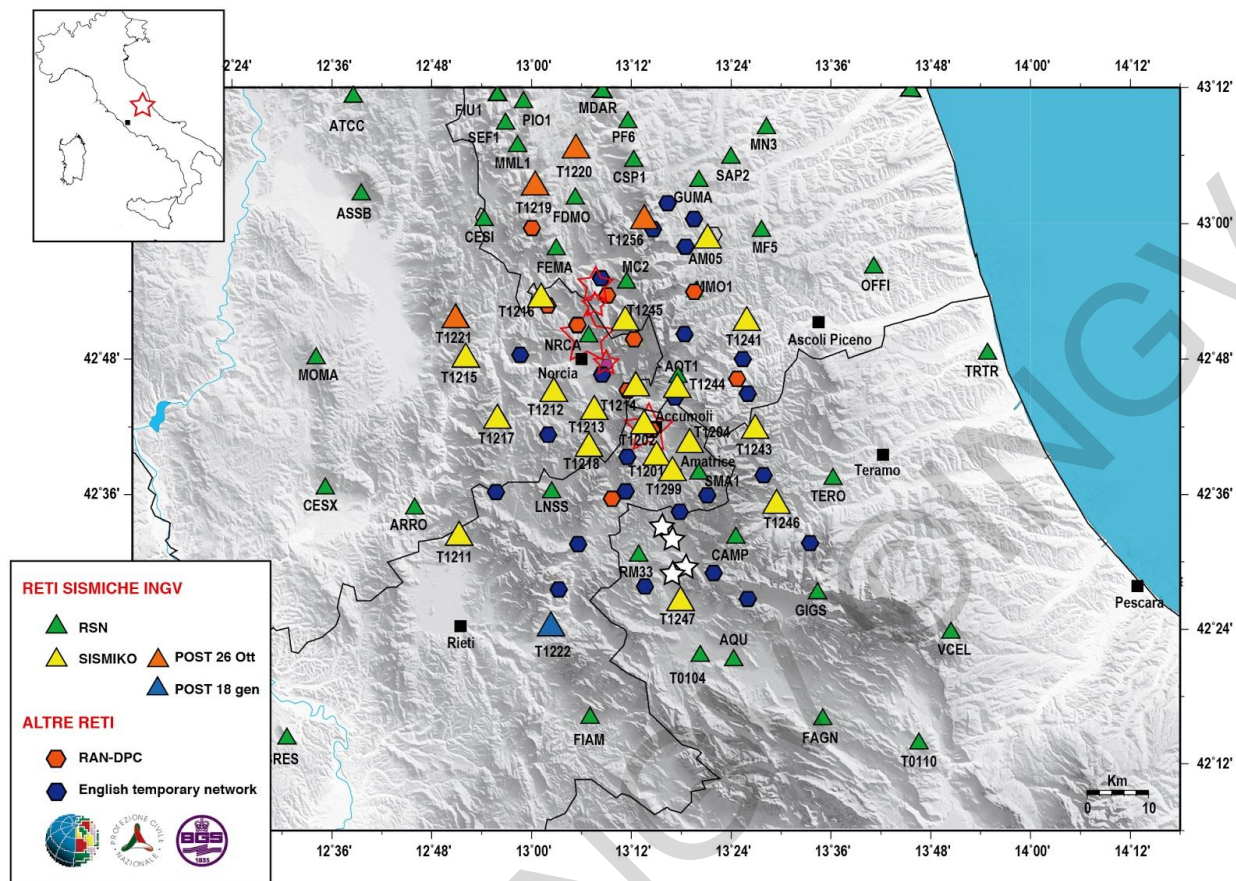


Figura 18. Mappa delle stazioni sismiche, permanenti e temporanee, in acquisizione nel centro Italia aggiornate al momento della pubblicazione del presente report. Sono mostrate le stazioni permanenti della RSN (triangoli verdi) e le stazioni temporanee di SISMIKO (triangoli gialli dopo il 24 agosto, arancioni dopo il 26 ottobre e blu dopo il 18 gennaio 2017), della RAN-DPC (esagoni arancioni) e del BGS (esagoni blu). Le stelle indicate con il solo bordo in rosso, rappresentano le forti scosse di agosto e ottobre; in bianco quelle di gennaio 2017.

EMERSITO e Rete sismica temporanea nel comune di Amatrice

A seguito del terremoto del 24 agosto, il gruppo di emergenza Emersito si è attivato per effettuare studi sugli effetti di sito nelle aree colpite dalla sequenza sismica.

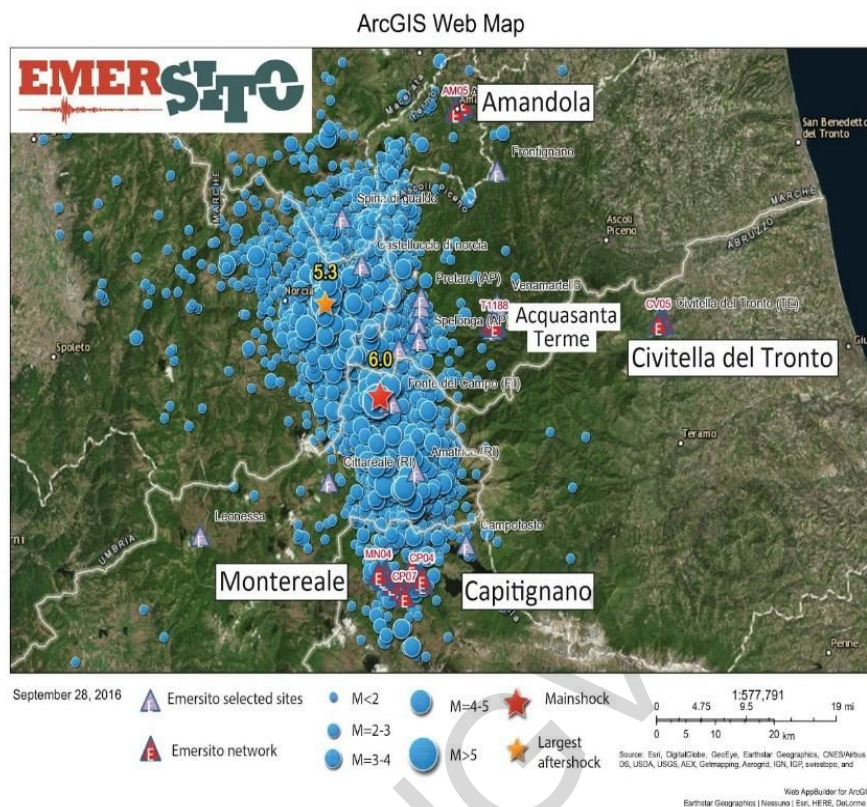


Figura 19. Emersito ArcGIS on-line con le localizzazioni della sequenza del centro Italia (24 agosto - 28 settembre 2016) e la posizione delle stazioni della rete sismica temporanea di Emersito.

Durante la prima fase dell'emergenza (24 – 25 agosto 2016) sono stati selezionati alcuni siti prossimi all'area epicentrale per l'installazione della rete sismica temporanea. In particolare, sono state individuate aree urbanizzate, logisticamente semplici da raggiungere e dove sono presenti situazioni geologiche e strutturali che possono aver dato luogo a effetti di sito. I criteri di selezione hanno portato ad individuare 4 comuni (Amandola, FM; Civitella del Tronto, TE; Montereale, AQ, e Capitignano, AQ) dove sono state installate 22 stazioni sismiche a partire dal 26 agosto 2016 e che hanno operato fino al periodo compreso tra il 16 settembre e il 10 ottobre 2016.

Le analisi preliminari sui dati raccolti hanno messo in evidenza effetti di amplificazioni legati ai depositi sedimentari nelle zone vallive, effetti topografici non facilmente interpretabili nei paesi costruiti su alture, e scarsa evidenza di effetti direzionali legati alla presenza di zone di faglia.

Emersito si è successivamente attivato nell'ambito del Centro di Microzonazione Sismica (<http://www.centromicrozonazione.sismica.it>), avviate a seguito dell'Ordinanza 394, Art.14 (“ [...] per verifiche sugli effetti prodotti dal sisma e rilievi sui terreni, anche attraverso lo svolgimento di indagini propedeutiche alle attività di microzonazione sismica e rilevamenti di tipo geofisico, geomorfologico, geologico e geotecnico.”). In particolare, l'INGV è stato incaricato di studiare, insieme al CNR, l'area del comune di Amatrice a partire dalla metà di settembre 2016. Le attività svolte si sono concretizzate con l'installazione di una rete temporanea di 28 stazioni sismiche dotate di velocimetri e accelerometri, misure per ricavare la velocità delle onde S negli strati più superficiali e rilievi geologici.

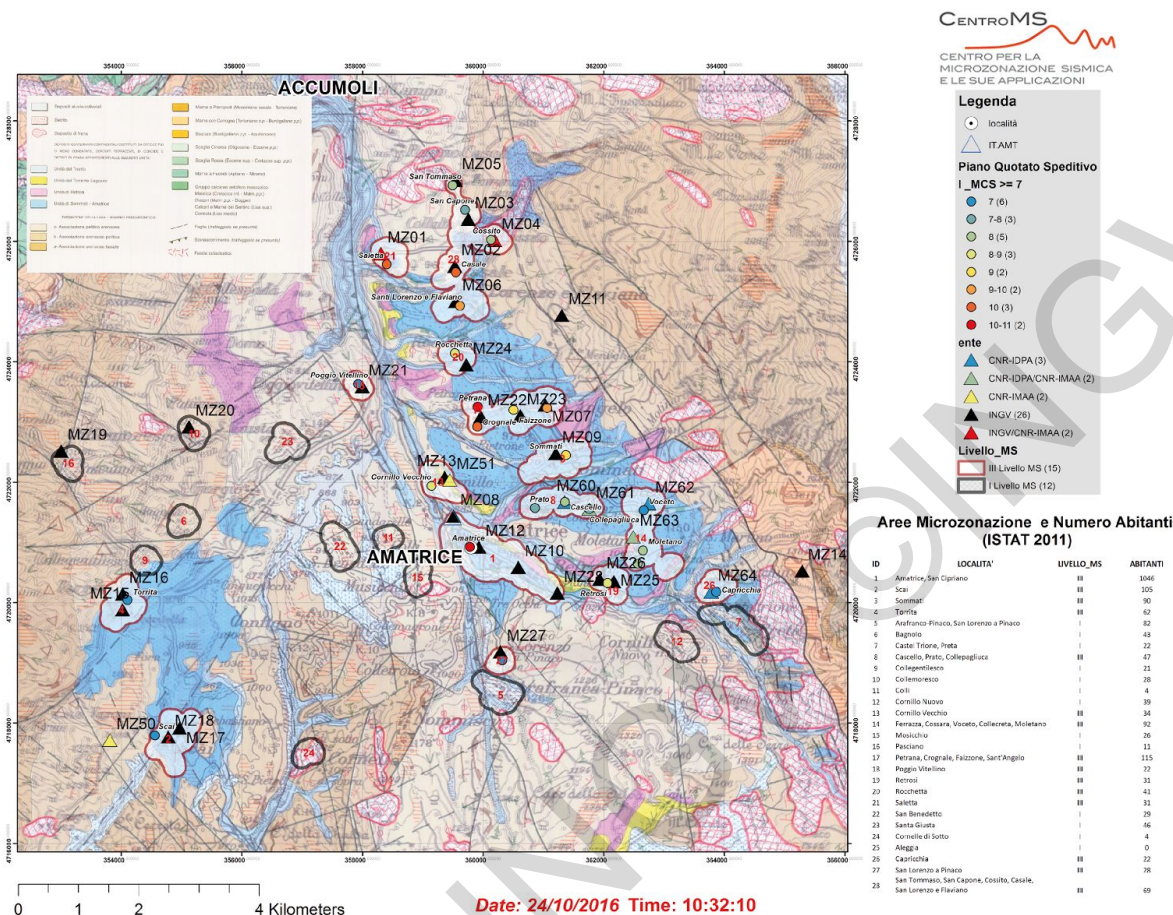


Figura 20. Indagini propedeutiche alla microzonazione sismica (OCDPC 394 del 19 settembre 2016) nel comune di Amatrice, in collaborazione con il Centro di Microzonazione Sismica (<http://www.centromicrozonazioneisismica.it>).

EMERGEO: i sistemi di faglie

A partire dal 24 agosto 2016 le squadre di rilevatori del Gruppo Emergeo-INGV si sono attivate per effettuare le prime indagini sugli effetti dei terremoti sul territorio concentrandosi sia sugli effetti cosismici primari (ovvero direttamente legati alla rottura del terremoto come fagliazione e fratturazione superficiale) che su quelli secondari (ovvero riconducibili allo scuotimento provocato dalle onde sismiche come frane, scoscendimenti, crolli di massi, liquefazioni, ecc).

Le squadre dei rilevatori stanno investigando l'area epicentrale per una lunghezza totale di circa 50 km, ponendo particolare attenzione alle faglie attive note in letteratura. Al momento sono state catalogate informazioni geologiche su circa 8000 punti di osservazione.

Un totale di circa 28 km di fagliazione superficiale sono stati mappati tra gli abitati Arquata del Tronto e Cupi. I primi rilievi nella zona colpita dagli eventi del 18 gennaio 2017 che corrisponde all'area di deficit di slip e sismicità (inclusa nel rettangolo nelle figure 1 e 15) non hanno

evidenziato effetti cosismici di rilievo. Studi paleosismologici [Galadini e Galli, 2003] effettuati lungo la faglia attiva che borda quest'area a est (Gorzano-Campotosto) concludevano che la faglia può generare terremoti fino a magnitudo M 6.6. Queste affermazioni si basano sulla lunghezza dell'espressione superficiale della faglia e sulle indagini geologiche. In particolare, sulla faglia dei monti della Laga (Campotosto) si ha evidenza di attività recente per una lunghezza di 20 km e almeno due eventi di fagliazione di superficie sono avvenuti negli ultimi 8.000 anni. Si è stimato un tempo minimo trascorso dall'ultima rottura in superficie di circa 800 anni.

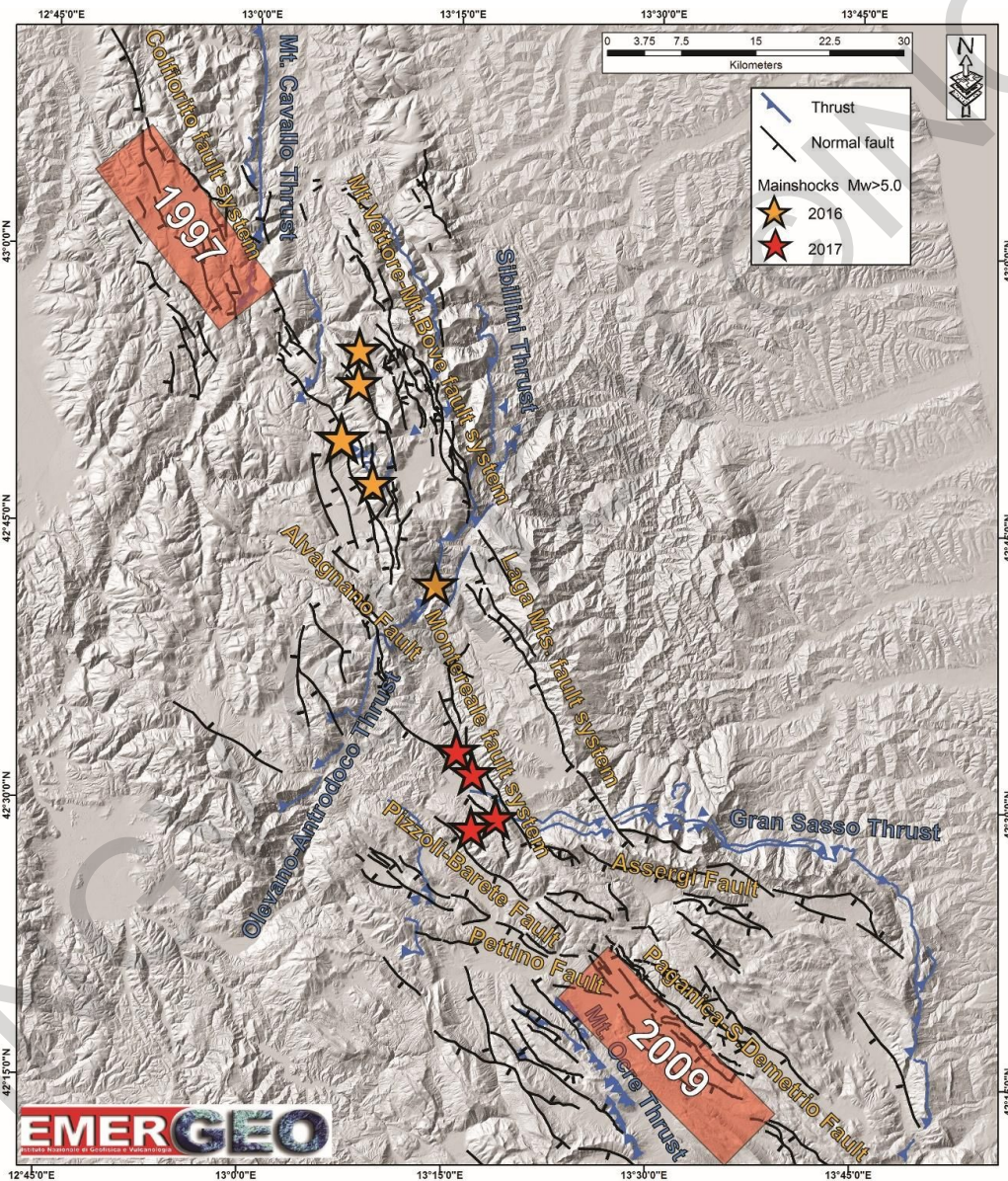


Figura 21. Mappa degli eventi sismici di magnitudo >5 avvenuti a partire dal 24 agosto 2016. Gli epicentri si distribuiscono per una lunghezza totale di circa 50 km nell'area compresa tra la sequenza sismica di Colfiorito del 1997 e la crisi sismica dell'Aquila del 2009. I sistemi di faglia coinvolti da questi eventi sono quelli denominati Monte Vettore – Monte Bove e Monti della Laga.

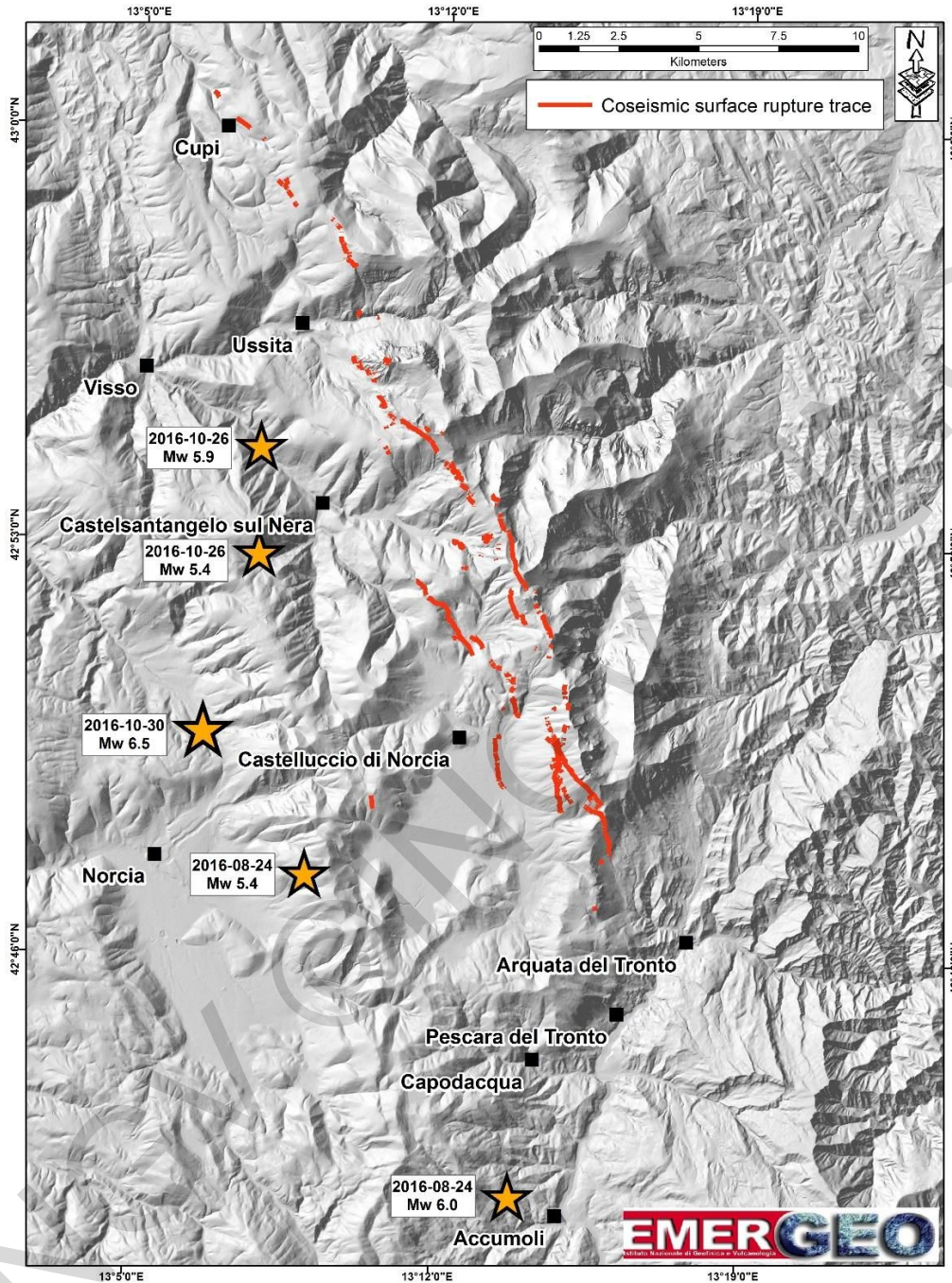


Figura 22. Mappa delle rotture superficiali prodotte dagli eventi sismici di magnitudo >5 avvenuti a partire dal 24 agosto 2016. La lunghezza delle rotture in direzione appenninica raggiunge i 28 km, tra Arquata del Tronto e Cupi. Si consideri che le rotture superficiali dell'evento di Mw 6.5 del 30 ottobre 2016 si sovraimpongono alle deformazioni superficiali riscontrate a seguito degli eventi del 24 agosto e del 26 ottobre 2016.

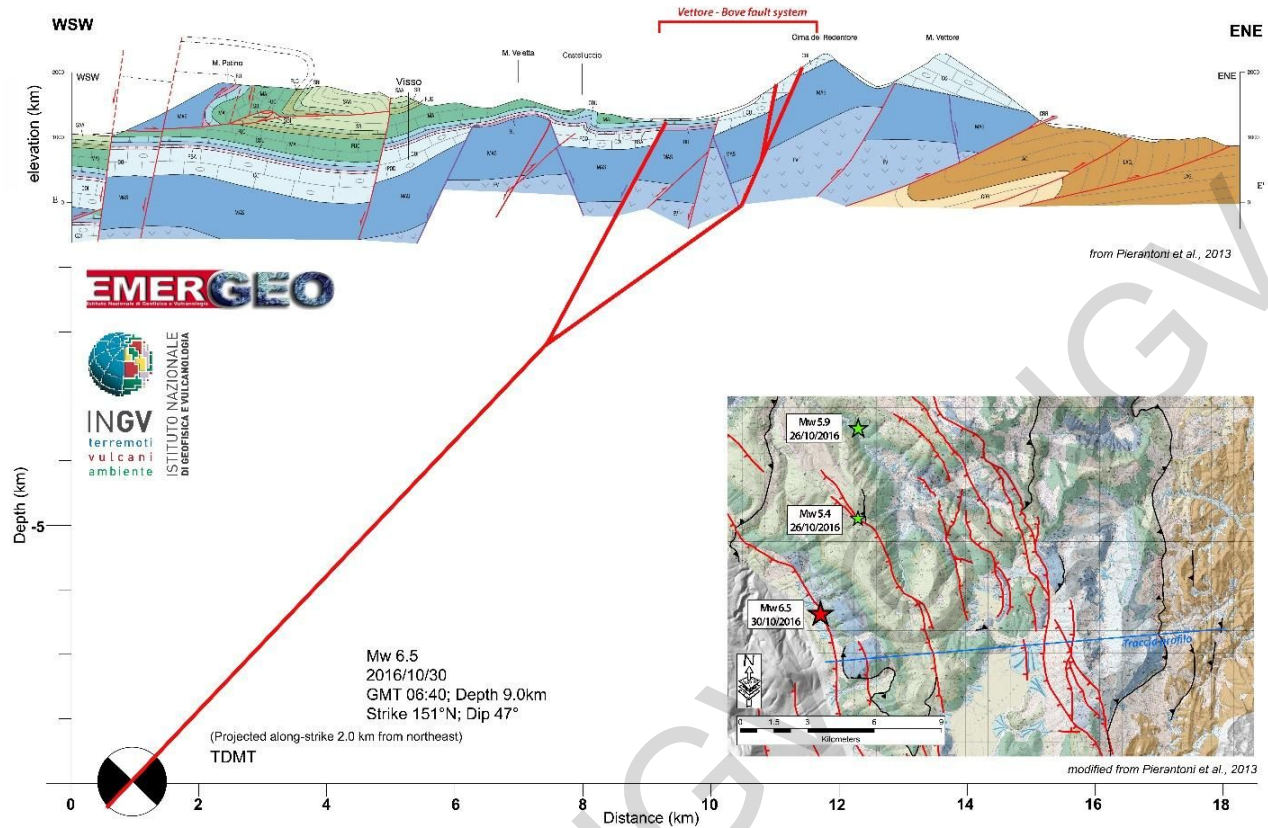


Figura 23. Sezione geologica interpretativa preliminare che mostra la relazione tra l'ipocentro dell'evento di Mw 6.5 del 30 ottobre 2016 e i sistemi di faglie attive note in superficie. La soluzione del meccanismo focale e la localizzazione delle principali rotture cosismiche suggerisce l'attivazione del sistema di faglia Monte Vettore – Monte Bove.



continua>>



Figura 24. Esempi di rotture cosismiche rilevate dal Gruppo Emergeo nel settore del Monte Vettore. In alto foto da elicottero delle rotture cosismiche presenti sui due splay principali del sistema di faglia attivo; a seguire dettaglio di rottura cosismica che coinvolge i depositi di versante con rigetto verticale superiore a 1 m; in basso dettaglio di rottura cosismica su piano di faglia in roccia con rigetto verticale di circa 2 m.

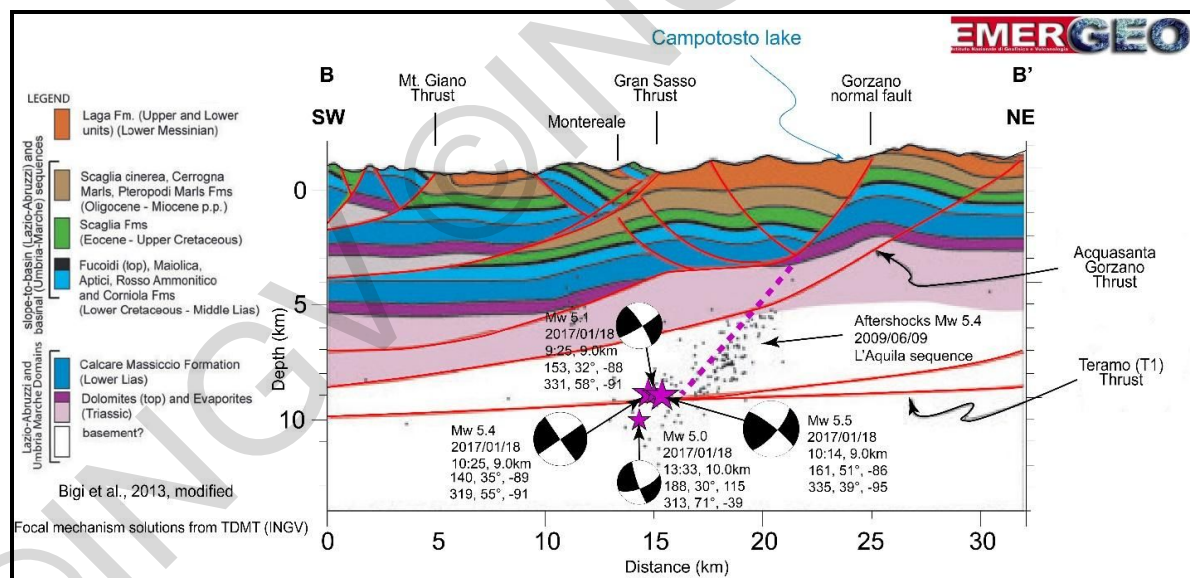
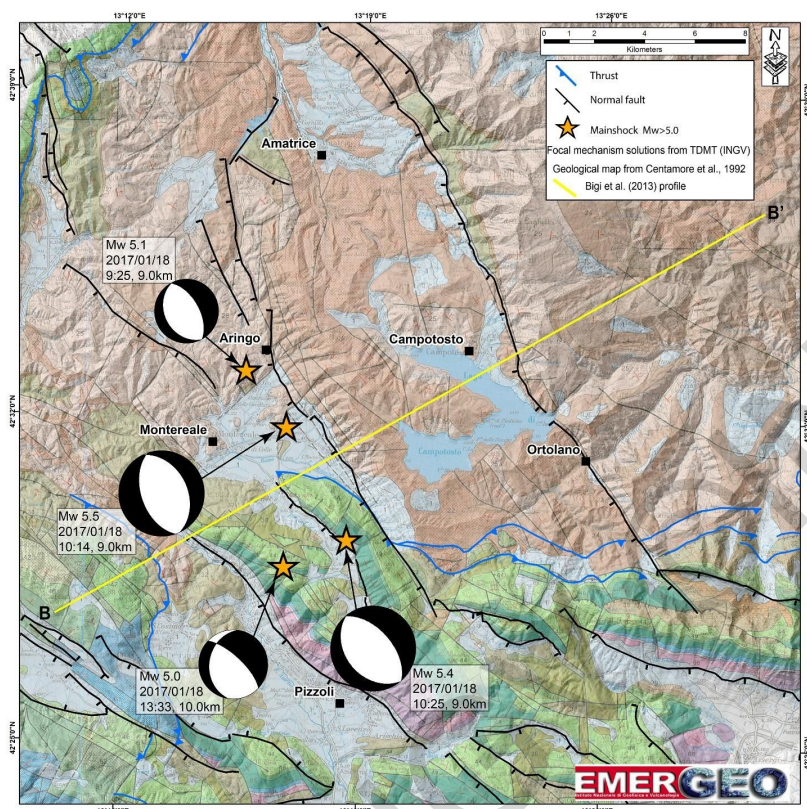


Figura 25. Mappa geologica ed epicentri degli eventi di magnitudo >5 del 18 gennaio 2017; sotto, la sezione geologica interpretativa che mostra la relazione tra gli ipocentri e i sistemi di faglie attive noti in superficie. Le soluzioni dei meccanismi focali suggeriscono l'attivazione della parte basale della faglia del Monte Gorzano appartenente al sistema di faglie dei Monti della Laga. Un rilievo speditivo effettuato il 25 gennaio 2017 dal Gruppo Emergeo non ha evidenziato la presenza di rotture superficiali legate a questi eventi sismici, sebbene la presenza di un copioso manto nevoso abbia sicuramente limitato le aree da rilevare.

QUEST: i rilievi macrosismici

Dopo gli eventi del 26 e 30 ottobre 2016 è stato intrapreso un ulteriore rilievo da parte delle squadre di QUEST in collaborazione con squadre ENEA.

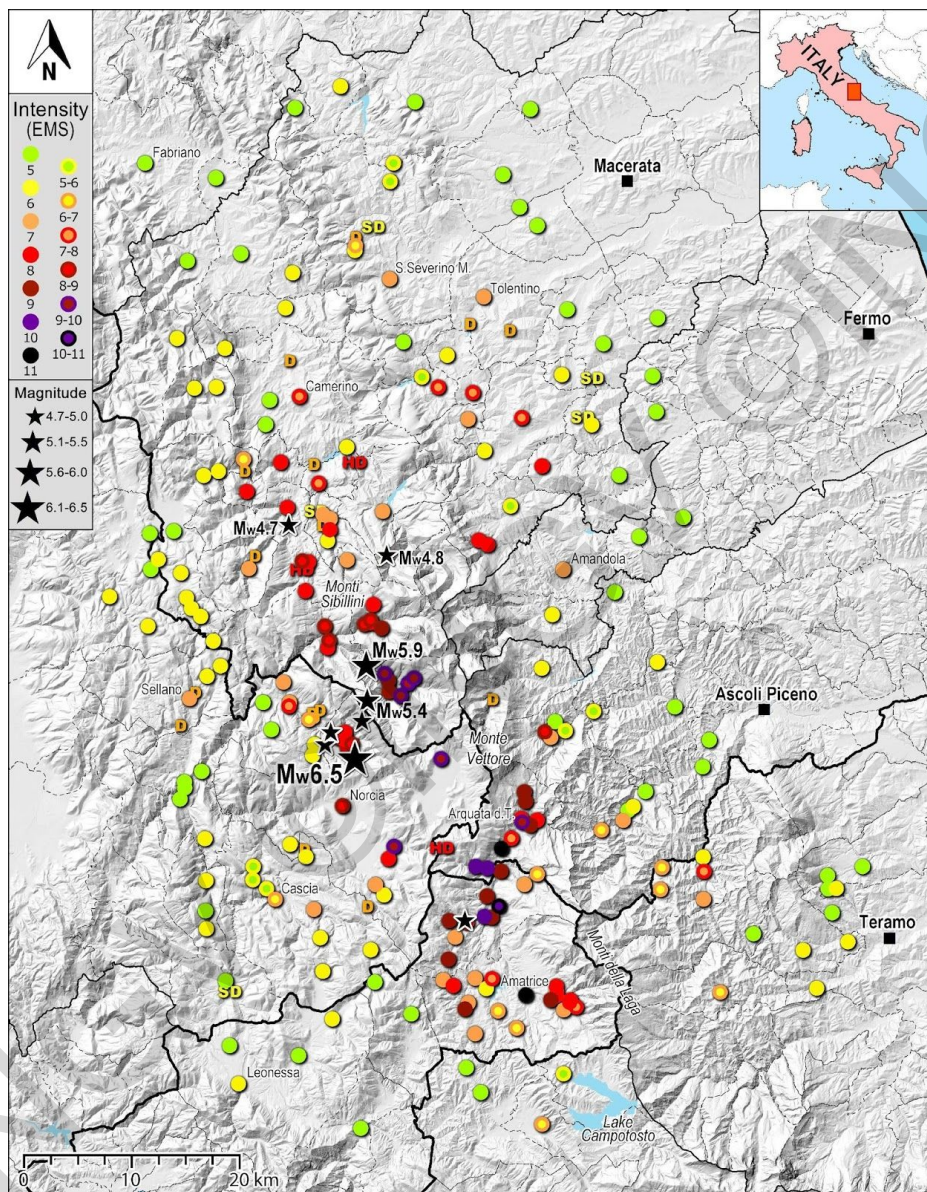


Figura 26. Mappa dei punti di intensità rilevati dopo il 26/10/2016.

In sintesi:

Personale QUEST: 17 rilevatori INGV (BO, CT, CNT, MI, RM1, RM2).

Personale ENEA: 6 rilevatori.

Rilevate ca. 240 località dal 27 ottobre a fine dicembre (Figura 26) (il rilievo non è ancora

concluso, mancando la parte del post 18 gennaio).

Complessivamente sono state rilevate 310 località a partire dal 24 agosto.

Molte località sono state riviste più di due volte.

A tutte le località è stata assegnata un'intensità sia in MCS che in EMS.

Il rilievo di dettaglio in EMS viene eseguito edificio per edificio sulla totalità (o su un numero statisticamente significativo) degli edifici e richiede tempi piuttosto lunghi.

Diverse località danneggiate il 24 agosto nella zona di Amatrice, non sono ancora state rivisitate dopo il 30 ottobre, per valutarne l'aggravamento.

Oltre che alla diversa vulnerabilità, differenze significative di intensità sono dovute anche ad **effetti locali di amplificazione** ("effetti di sito"): effetti "di cresta" o "sella" (ad es. i casi dei centri storici di **Amandola** (FM) e di **Gualdo** (MC), danneggiati sia dal terremoto del 24 agosto che dai successivi); il caso di **Amatrice** (PGA di circa 0.8 g) e delle sue frazioni (Saletta, Sommati, Casale, San Lorenzo e Flaviano, ecc.) ubicate a nord e a est, sul versante dei Monti della Laga, costruite su sedimenti quaternari recenti (a fronte delle frazioni a ovest situate sulle arenarie della formazione della Laga, e molto meno danneggiate); il quartiere periferico di **San Severino Marche** costruito su sedimenti alluvionali. Un caso eclatante è quello di Pescara del Tronto edificata su un corpo di frana, il cui movimento indotto dal sisma è una importante concausa per la distruzione dell'abitato.

Inoltre nella distribuzione degli effetti macrosismici ha giocato un ruolo importante anche la **direttività della sorgente sismogenetica**: a seguito del 6.5 del 30 ottobre si è notata una forte attenuazione dell'intensità in direzione W e SW (ad esempio danni complessivamente leggeri o irrilevanti a **Cascia** [6-7 EMS, ma centro storico 5 EMS] e **Cerreto di Spoleto** [5 EMS] a pochi km dall'epicentro), contrapposta ad una forte propagazione dello scuotimento verso N e NE (danni diffusi e importanti a **Camerino** [7-8 EMS], **Tolentino** [7 EMS], **San Severino Marche** [7 EMS] e **San Ginesio** [7-8 EMS] a distanze epicentrali significative).

IES: #RipartiamoDallaScuola – Terremoto 2016: parliamone a scuola

Qui si descrive brevemente il **ciclo di incontri realizzato nelle scuole delle quattro Regioni coinvolte nella sequenza sismica tra il 12 e il 22 dicembre 2016**. In queste due settimane sono stati realizzati complessivamente **24** incontri in **21** tra Istituti Comprensivi o Istituti di Istruzione Superiore dell'ascolano, aquilano, maceratense e reatino (Figura 27). Agli incontri hanno partecipato complessivamente quasi **millecinquecento** tra insegnanti, personale ATA e, in qualche caso, rappresentanti dei genitori.

Pur in presenza di situazioni molto complesse dal punto di vista organizzativo, materiale, di tensioni e stress emotivo evidente, molto differenziati fra le diverse aree in cui sono stati realizzati, tutti gli incontri sono stati molto positivi e sono stati sensibilmente apprezzati dai presenti.

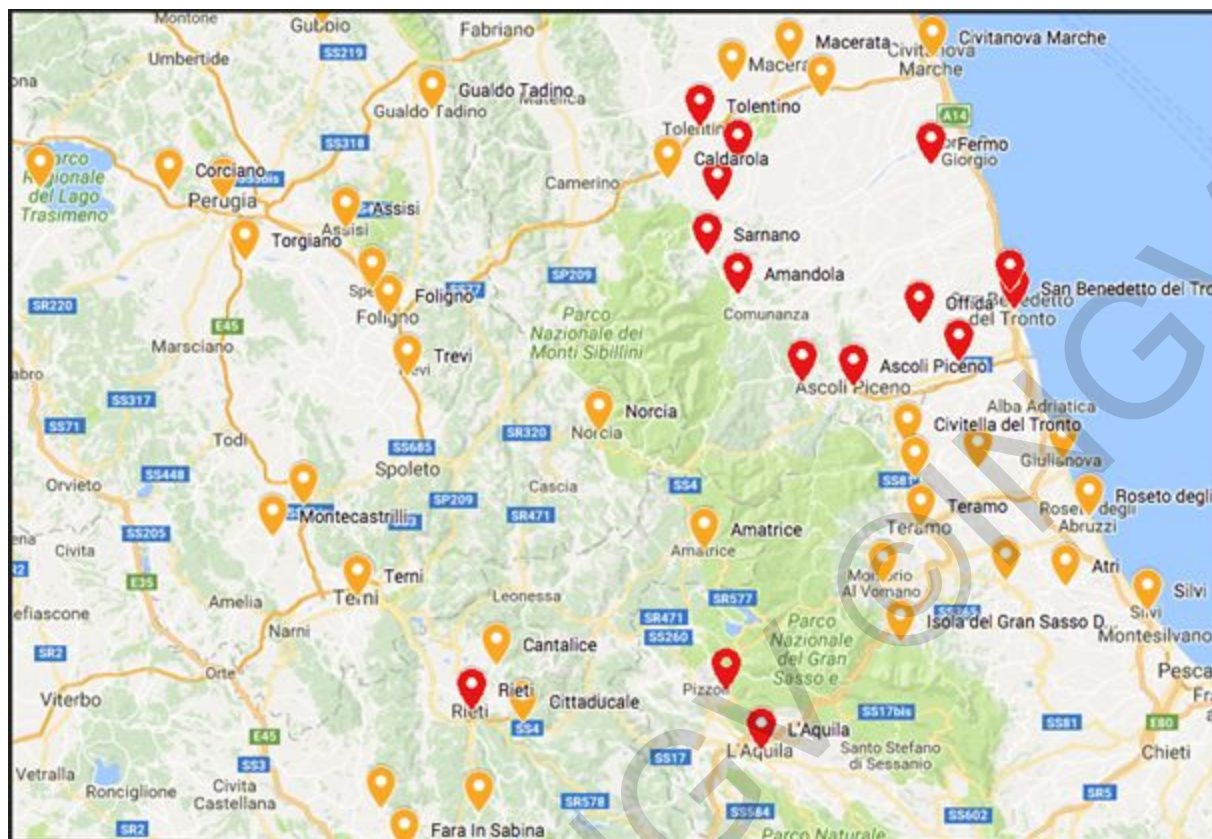


Figura 27. Istituti che hanno aderito al progetto “Terremoto 2016: parliamone a scuola”. In rosso sono evidenziati i centri in cui si sono svolti gli incontri dal 12 al 22 dicembre 2016.

Ove inizialmente erano riconoscibili situazioni di diffidenza, se non di aperta ostilità, nel corso dell’incontro si sono generalmente sciolte in modo positivo per tutti.

A quasi tutti gli incontri hanno partecipato le/i Dirigenti scolastici, in un caso (Fermo) ha partecipato attivamente l’assessore comunale alla Protezione Civile.

Personale IES coinvolto: 8 Ricercatori, tecnologi, tecnici (BO, CNT, MI, RM1).

Deformazioni del suolo da dati InSAR e GPS e modellazione delle sorgenti

Nel seguito viene riportata una descrizione sintetica dei dati geodetici InSAR e GPS e dei modelli di sorgente elaborati a partire da questi. Per quanto riguarda l’InSAR maggiore dettaglio viene fornito per i dati e la sorgente dei terremoti del 18/1, mentre per i dati GPS non sono ancora disponibili soluzioni per questi ultimi eventi.

Dati InSAR

Nelle figure seguenti gli interferogrammi SAR ottenuti dal satellite ALOS-2 dell’Agenzia

Spaziale giapponese JAXA mostrano le deformazioni del suolo degli eventi principali verificatisi a partire da aprile 2009. In tutte le figure ogni frangia di colore equivale ad un movimento del suolo in linea di vista di circa 12 cm, questo permette di apprezzare la diversa quantità di deformazione causata dai vari eventi.

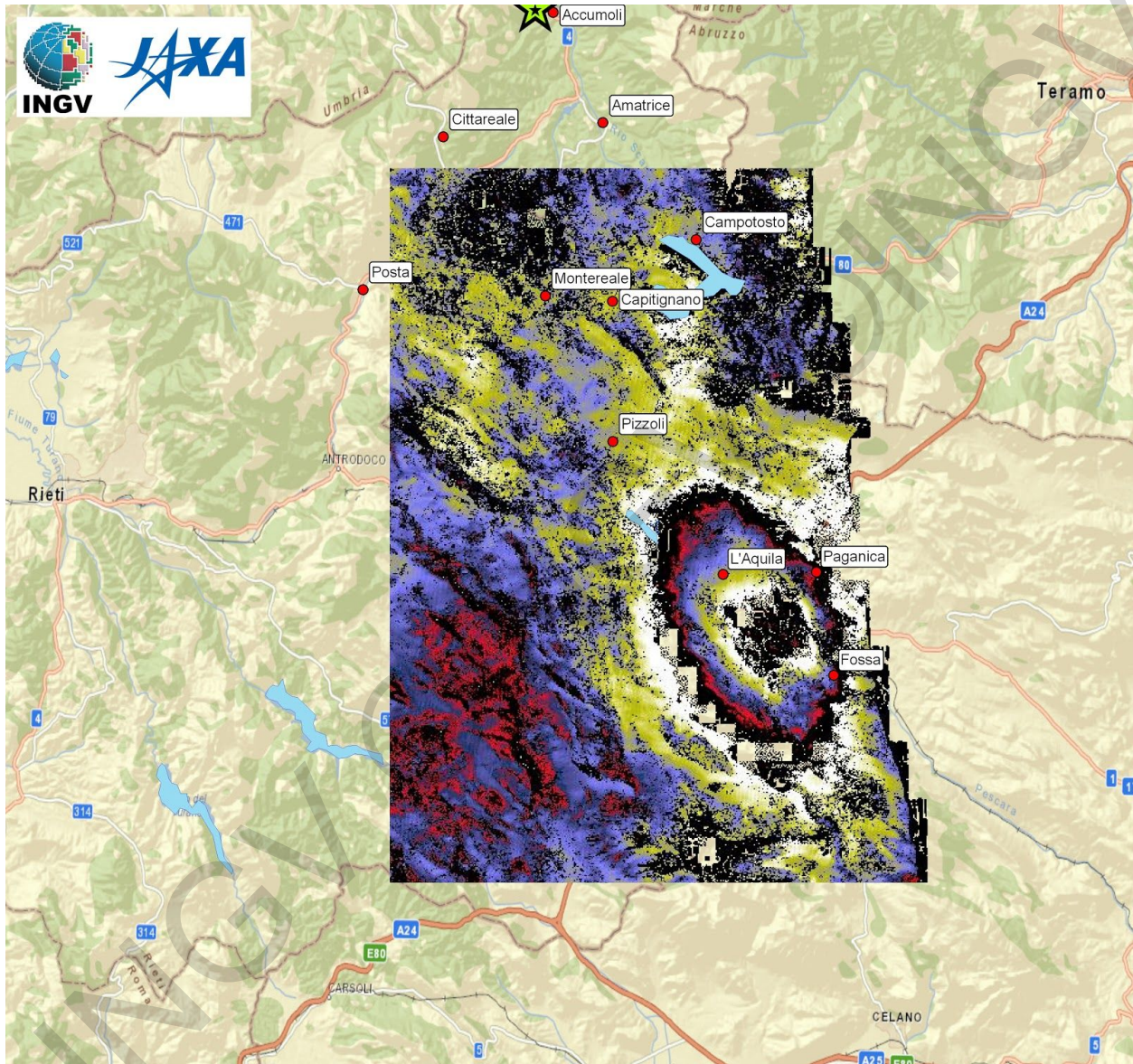


Figura 28. Interferogramma ascendente ALOS-2 del terremoto de L'Aquila del 2009. Contiene tutta la deformazione del suolo verificatasi tra il 2/9/2007 e il 23/10/2009. È chiaramente visibile il pattern principale di abbassamento del suolo nell'area tra L'Aquila e Fossa con un massimo di circa -20 cm in linea di vista. Si nota anche nell'area a sud del lago di Campotosto un abbassamento minore (2-3 cm) collegato ai due aftershocks di $M_w=5$ e 5.2 avvenuti nell'area.

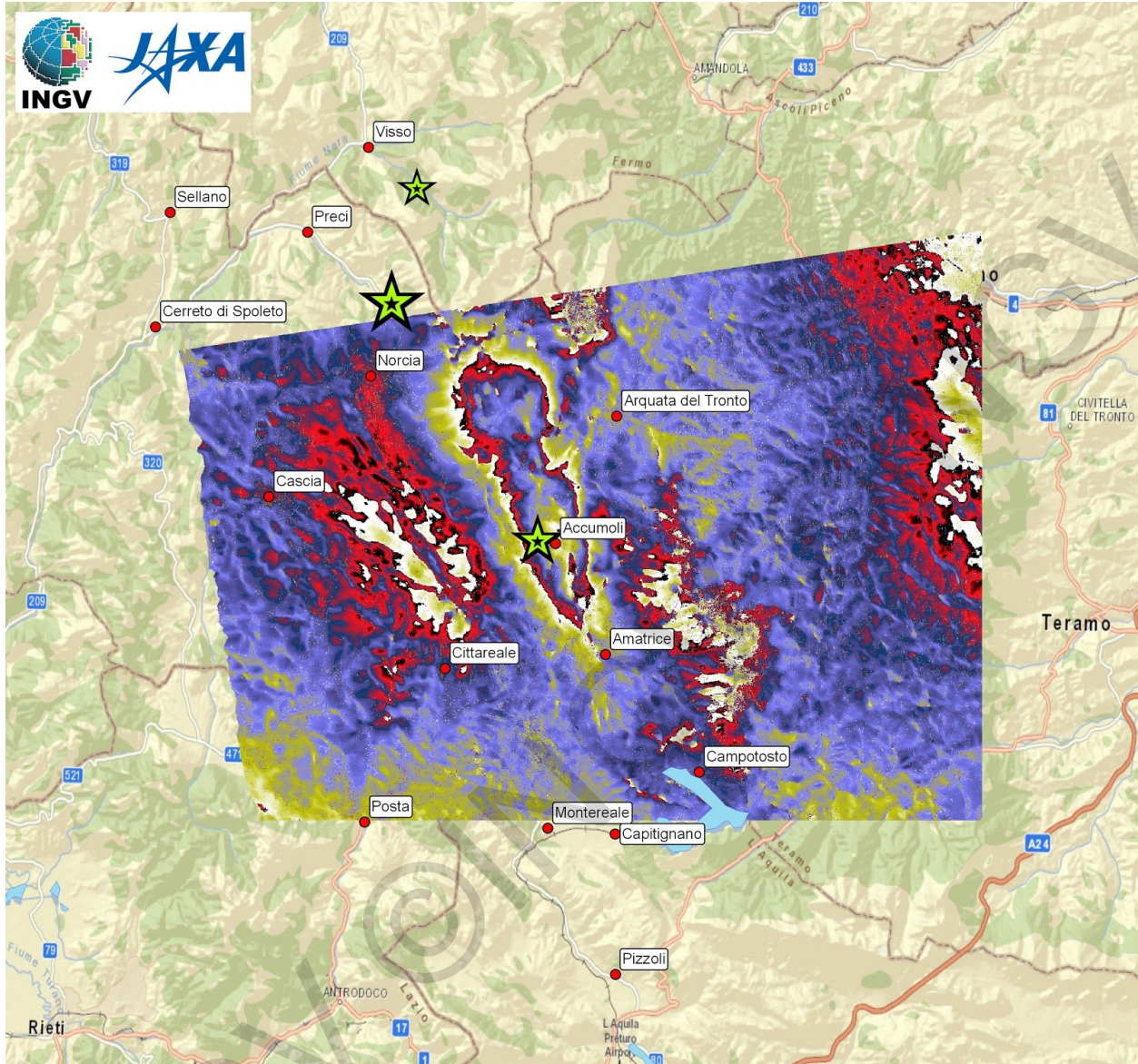


Figura 29. Interferogramma ascendente ALOS-2 del terremoto di Amatrice del 24/8/2016. Contiene tutta la deformazione del suolo verificatasi tra il 27/1/2016 e il 24/8/2016. È visibile un pattern di abbassamento del suolo allungato NNW a partire da Amatrice con un massimo di circa -19 cm in linea di vista. Non si nota deformazione del suolo a sud di Amatrice, fino ad oltre il lago di Campotosto. Le stelle verdi sono gli eventi principali della sequenza di Amatrice-Norcia.

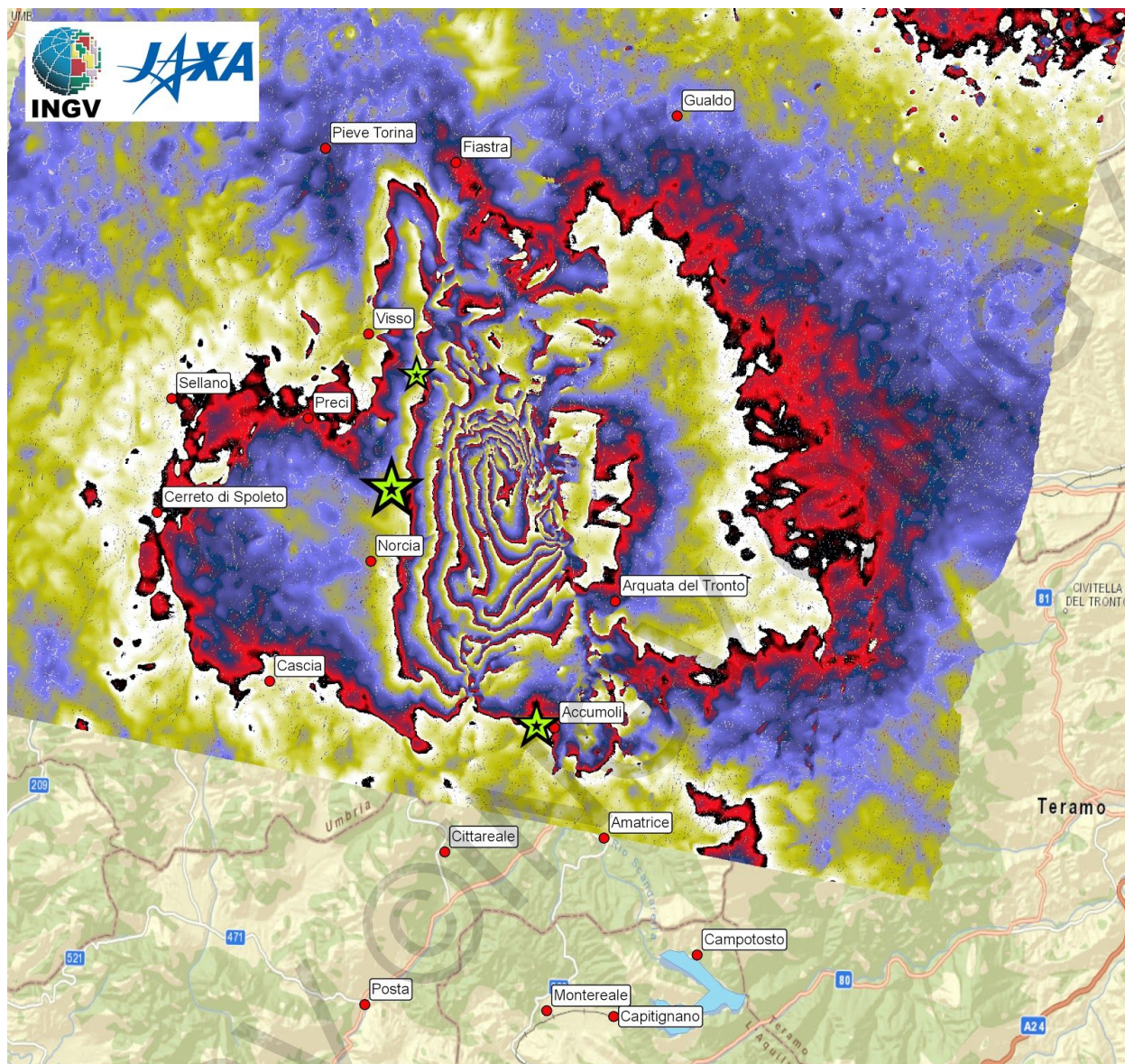


Figura 30. Interferogramma discendente ALOS-2 che include la deformazione del suolo degli eventi di Visso e Norcia del 26/10/2016 e 30/10/2016. Contiene tutta la deformazione del suolo verificatasi tra il 31/8/2016 e il 9/11/2016. È visibile un ampio pattern di abbassamento del suolo allungato NS a partire da Accumoli con un massimo di oltre -90 cm in linea di vista. Le stelle verdi sono gli eventi principali della sequenza di Amatrice-Norcia.

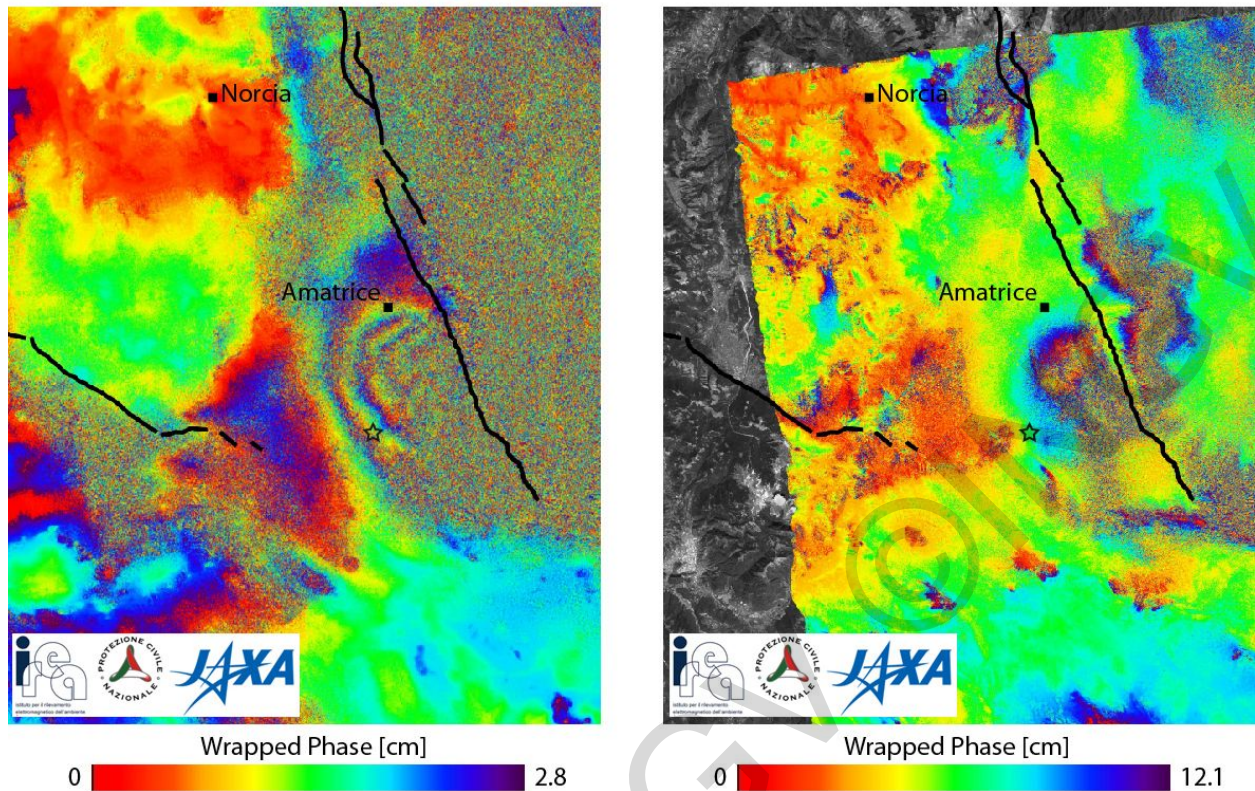


Figura 31. A sinistra l'interferogramma Sentinel-1 relativo alla coppia 12/01/2017-24/01/2017 ascendente (Track 117). A destra l'interferogramma ALOS-2 relativo alla coppia 02/11/2016-25/01/2017 ascendente (Track 197). È visibile un pattern semicircolare di abbassamento del suolo tra Amatrice e Campotosto con un massimo di deformazione di oltre -10 cm in linea di vista.

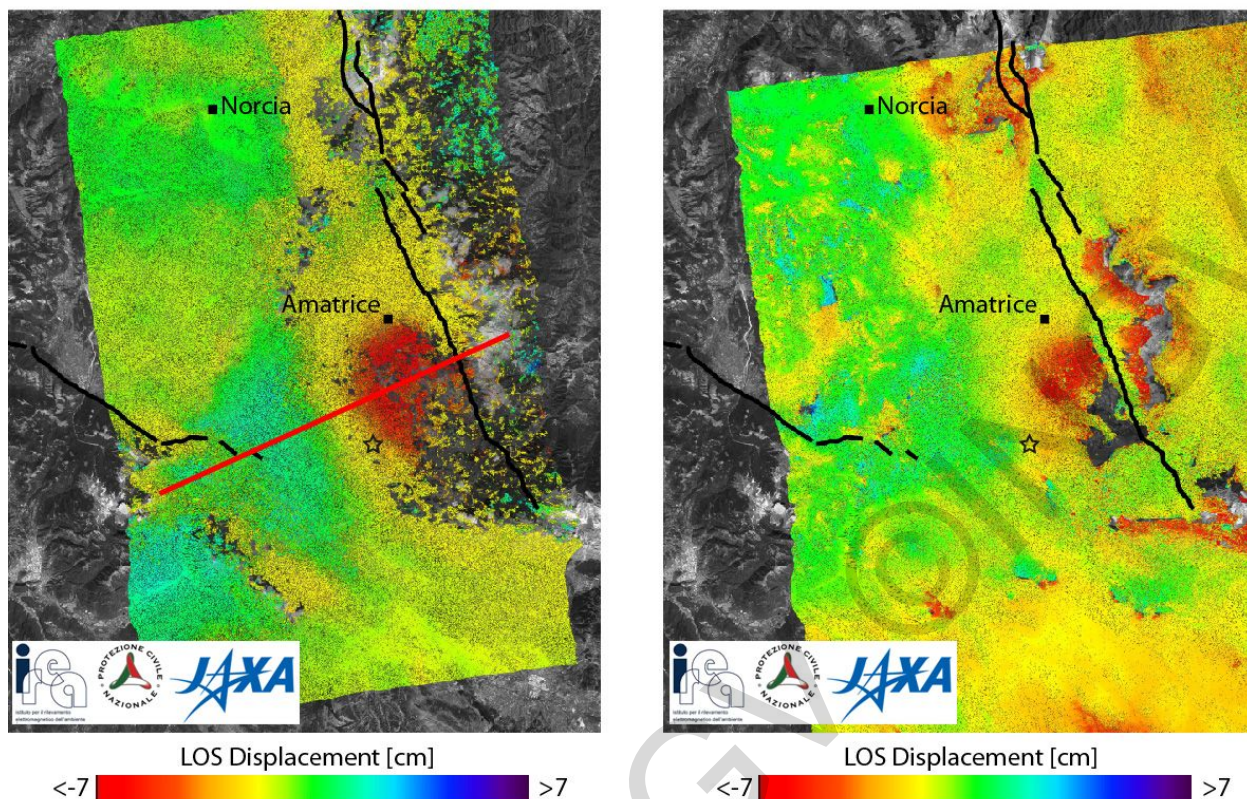


Figura 32. A sinistra la mappa dello spostamento del suolo in linea di vista (LOS) relativa all'interferogramma Sentinel-1 mostrato in Figura 31. A destra la mappa dello spostamento del suolo in linea di vista (LOS) relativa all'interferogramma ALOS-2 mostrato in Figura 31. La stella nera indica la posizione dell'epicentro Mw 5.5 del 18/1/17. Le principali strutture nella regione sono indicate in nero. I dati Sentinel-1 sono copyright di Copernicus (2017). I dati ALOS-2 sono copyright di JAXA (2016-2017).

È indicata la traccia del profilo di spostamento del suolo mostrato nella figura successiva.

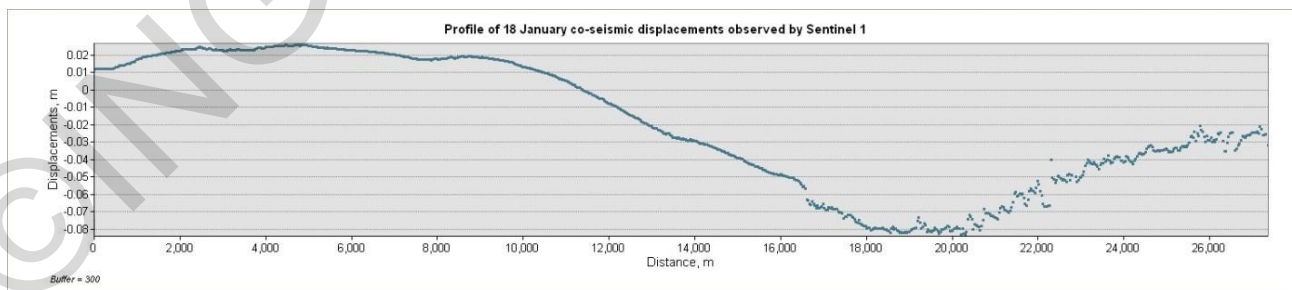


Figura 33. Profilo di spostamento del suolo co-sismico osservato nell'interferogramma Sentinel-1 della figura precedente.

Modelli di sorgente

I dati InSAR e GPS (vedi sezione seguente) di tutti gli eventi principali verificatisi nell'area dal 6 aprile 2009 al 18 gennaio 2017 sono stati utilizzati per ricavare modelli di sorgente con vari metodi.

Le due figure seguenti mostrano una visione sinottica dei modelli elaborati fino ad ora. Per la sorgente dei terremoti del 18/1/17 vengono dati maggiori dettagli, per gli altri modelli si rimanda a precedenti relazioni o a pubblicazioni.

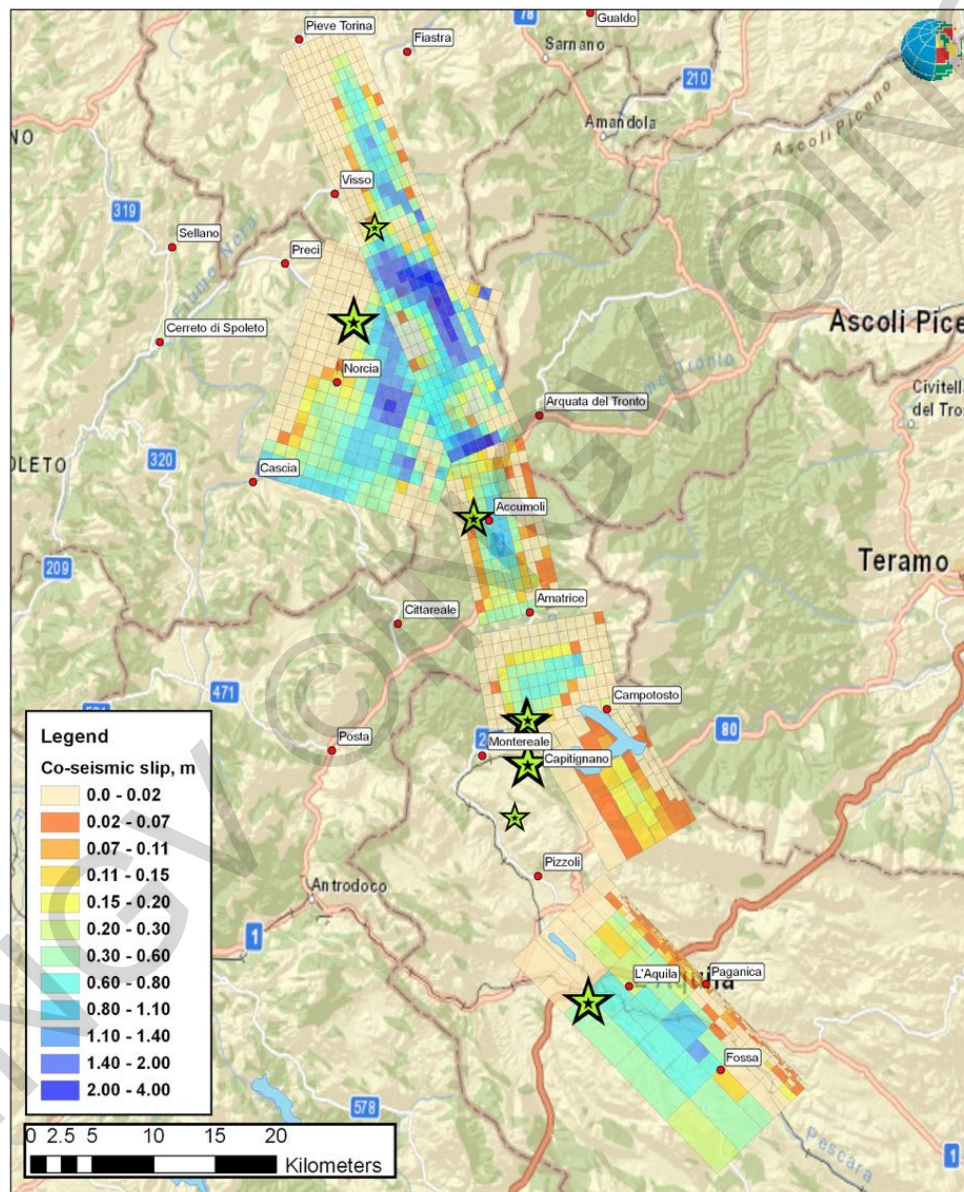


Figura 34. Visione sinottica dei modelli dei principali eventi nell'area dal 6 aprile 2009. Il modello del mainshock de L'Aquila è stato rielaborato a partire da Atzori et al., 2009; il modello della sorgente in corrispondenza del Lago di Campotosto è ricavato dal lavoro di Cheloni et al., 2014. Gli altri modelli sono quelli ricavati da INGV per la sequenza attuale e potrebbero essere raffinati ulteriormente nei prossimi mesi.

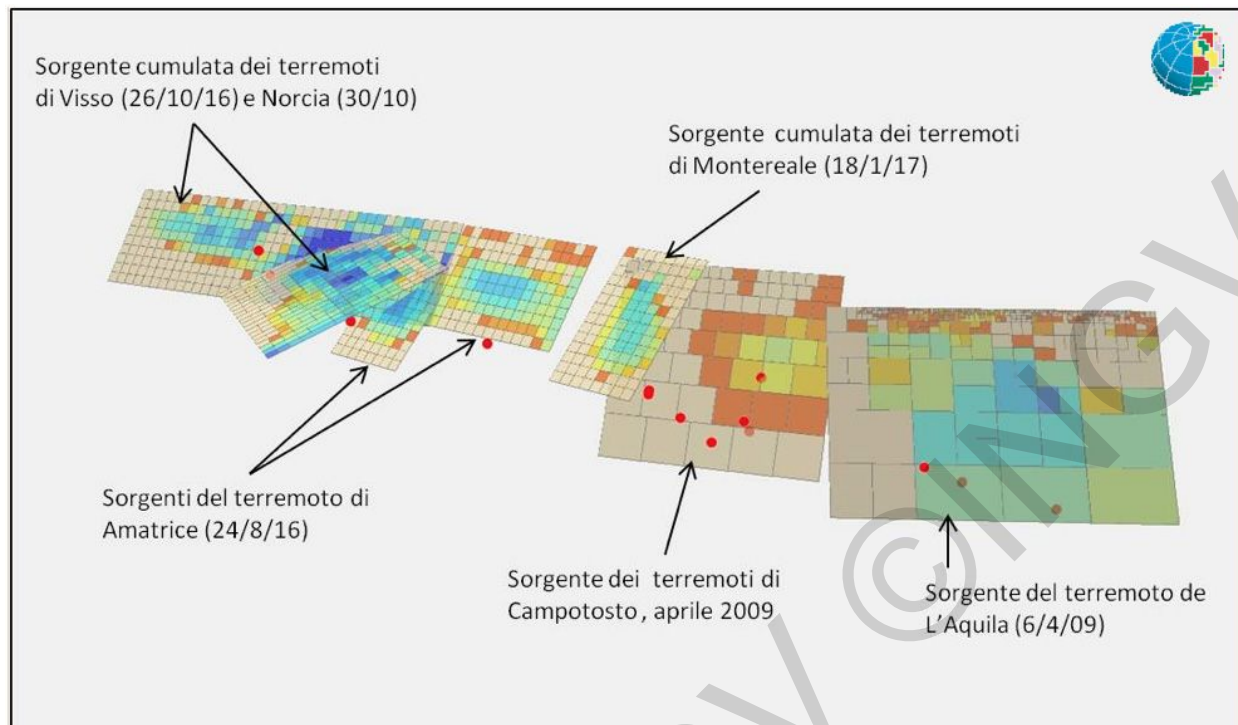


Figura 35. Visione prospettica da ovest dei modelli di sorgente da inversione geodetica dei principali eventi nell'area dal 6 aprile 2009. Si veda la figura 34 per i riferimenti geografici.

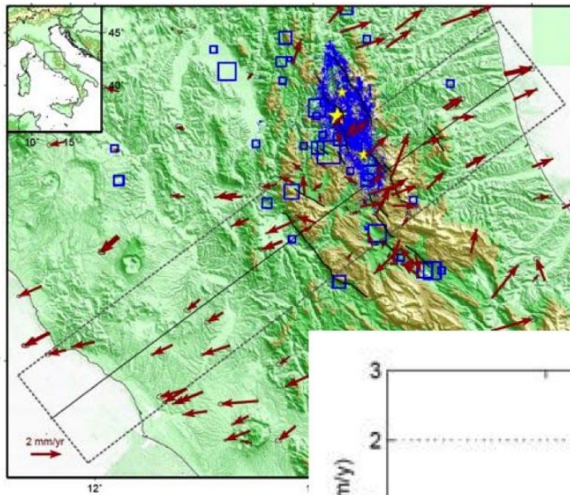
Nelle figure 34 e 35 è mostrato anche il modello preliminare di sorgente (cumulato) dei 4 eventi di $M \geq 5$ del 18/1 (interferogrammi delle figure 31 e 32). Per migliorare la soluzione, poiché i dati disponibili per l'inversione hanno la stessa linea di vista e una parte degli interferogrammi è decorrelata, il modello è stato vincolato con il dip (39°) e il rake (-90°) del meccanismo focale medio dell'evento maggiore. Tutti gli altri parametri sono liberi. Lo slip massimo sul piano è circa 90 cm e la profondità a cui lo slip diventa trascurabile è di circa 2 km. Il momento geodetico totale è di $7.08E+017$ N*m, corrispondente a un evento di magnitudo cumulata M_w 5.8. Risultato analogo (M_w 5.7) si ha cumulando i momenti dei 4 eventi sismici del 18/1. Lo strike individuato nell'inversione è molto simile a quello del meccanismo focale medio.

Nonostante le profondità degli ipocentri si collocano intorno a 8-10 km, i valori maggiori di slip si verificano più vicino alla superficie, intorno ai 3-4 km di profondità.

Questo modello è preliminare e verrà migliorato nei prossimi giorni utilizzando ulteriori osservazioni InSAR e vincoli esterni.

Infine, dalle figure 34 e 35 appare evidente come esistano ancora tratti della faglia del Monte Gorzano in cui non si è verificato slip lungo tutta la larghezza della faglia (tra la superficie e la sua parte più profonda) o comunque laddove si sia verificato non è di entità confrontabile con quello delle aree a nord e a sud.

Profilo di velocità dell'Appennino misurata dal GPS



Profilo di velocità intersismica (determinata con il GPS) lungo un transetto con direzione SO-NE in corrispondenza dell'area di Campotosto.

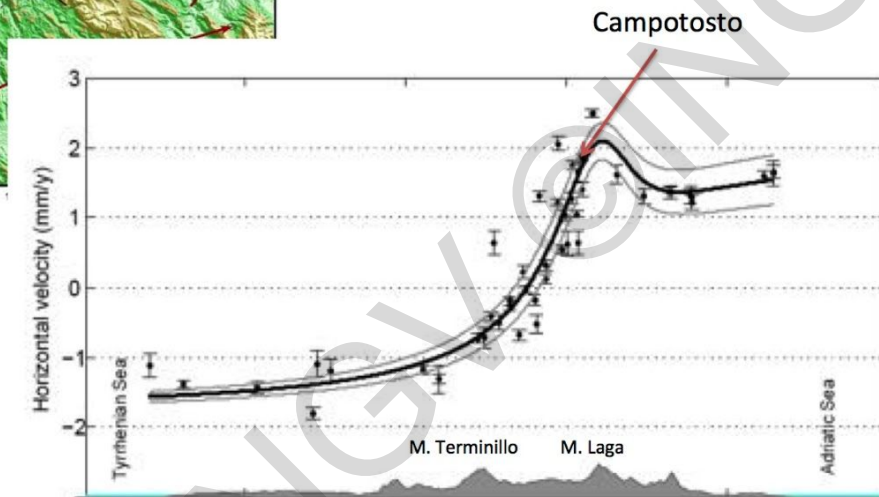


Figura 36. Dati GPS nel transetto illustrato nella mappa in alto a sinistra che documentano un'estensione di circa 4 mm/anno attraverso l'Appennino centrale.

Modelli di sorgente da dati GPS

L'area indicata come caratterizzata da deficit di slip e sismicità rispetto alle zone adiacenti (rettangolo nelle figure 1 e 15) ricade in un settore in cui si osservano le massime velocità di spostamento del suolo nel periodo intersismico (Figura 36).

A seguito del terremoto di magnitudo M_w 6.0 del 24 agosto 2016, l'INGV, in collaborazione con l'Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico del Dipartimento Protezione Civile (DPC) e l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), ha iniziato un più dettagliato monitoraggio delle deformazioni del suolo nell'area epicentrale attraverso la tecnica Global Positioning System (GPS) [INGV Working group "GPS Geodesy", <https://doi.org/10.5281/zenodo.61355>] con l'istallazione di alcune nuove stazioni (Figura 37).

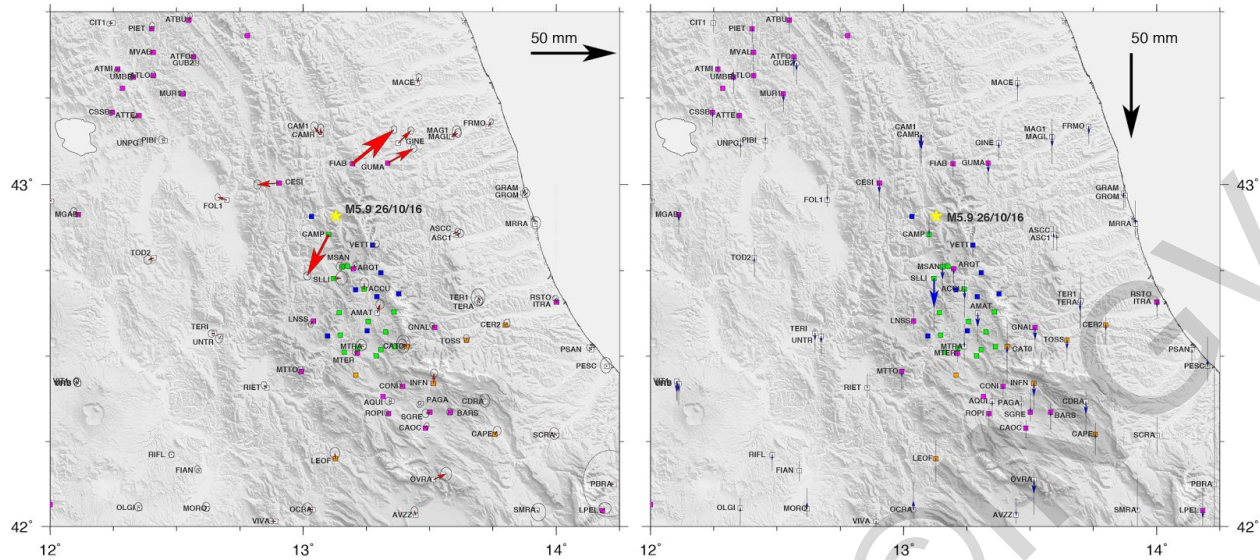


Figura 37. *Mappa degli spostamenti co-sismici GPS orizzontali (freccie rosse) e verticali (freccie blu) ottenuti dalla combinazione di tre soluzioni geodetiche indipendenti per l'evento del 26 ottobre 2016. I quadrati bianchi mostrano la posizione delle stazioni GPS permanenti, e quelli magenta delle stazioni RING-INGV (doi:10.13127/RING). I quadrati arancione mostrano le stazioni GPS permanenti gestite da DPC e ISPRA. I quadrati verdi e blu mostrano le stazioni della rete CaGeoNet e della rete IGM, rispettivamente, ri-occupati dopo il 24 agosto.*

Gli spostamenti co-sismici legati agli eventi del 26 e del 30 ottobre sono stati quindi registrati da un gran numero di stazioni. Le elaborazioni dei dati raccolti sono state effettuate utilizzando tre differenti software scientifici (GAMIT/GLOBK, GIPSY e BERNESE), e successivamente combinati in un'unica soluzione di consenso, realizzata con lo scopo di minimizzare errori sistematici eventualmente presenti nelle singole soluzioni indipendenti [es., Devoti, 2012; Serpelloni et al., 2012]. La Figura 37 mostra gli spostamenti co-sismici osservati per l'evento del 26 ottobre e la distribuzione delle diverse reti GPS operative nell'area a partire dal 24 agosto. La Figura 38 mostra invece gli spostamenti co-sismici osservati per l'evento del 30 ottobre (si noti la diversa scala dei vettori nelle due figure). Per l'evento del 26 ottobre, gli spostamenti co-sismici orizzontali massimi sono stati misurati alle stazioni FIAB (3.1 cm verso nord-est) e CAMP (2.7 cm verso sud-ovest), mentre la stazione SLLI ha mostrato il movimento verticale massimo, con un abbassamento di ~1.7 cm. Per quanto riguarda l'evento del 30 ottobre, gli spostamenti co-sismici orizzontali massimi sono stati osservati alle stazioni VETT (Monte Vettore) e MSAN, con uno spostamento di 38.3 cm verso nord-est e di 26 cm verso sud-ovest, rispettivamente, mentre gli spostamenti verticali massimi sono stati osservati per le stazioni ARQT, RIFP e MSAN, con un abbassamento di 44.6, 26.1 e 17.1 cm. La stazione sul Monte Vettore (VETT), invece, ha registrato un sollevamento di 5.5 cm.

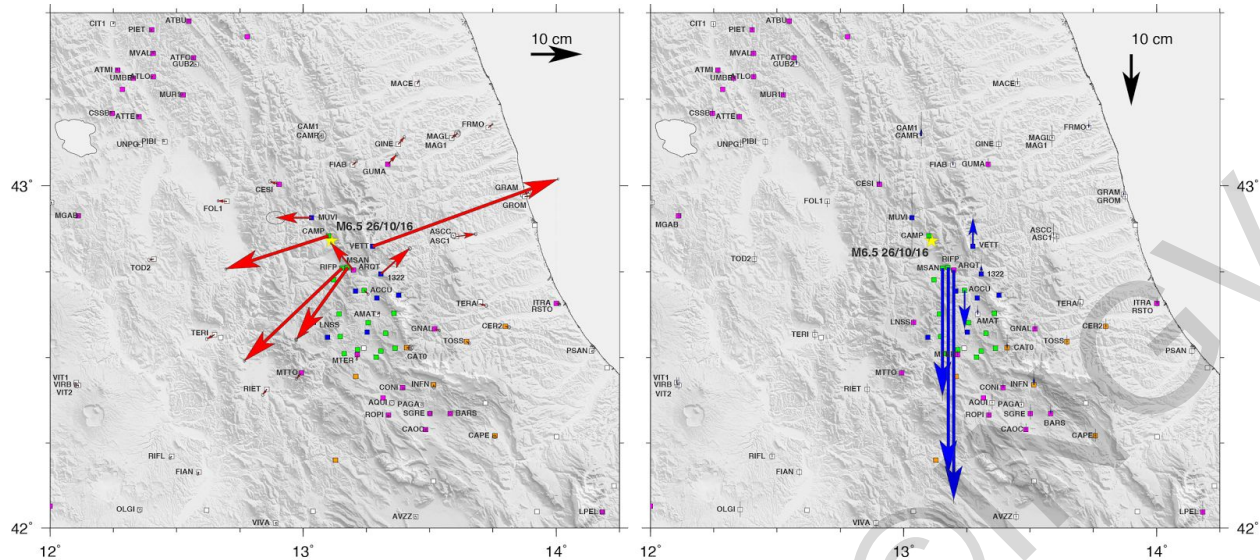


Figura 38. Mappa degli spostamenti co-sismici GPS orizzontali (frecce rosse) e verticali (frecce blu) ottenuti dalla combinazione di tre soluzioni geodetiche indipendenti per l'evento del 30 ottobre 2016. I quadrati bianchi mostrano la posizione delle stazioni GPS permanenti, e quelli magenta delle stazioni RING-INGV (doi:10.13127/RING). I quadrati arancione mostrano le stazioni GPS permanenti gestite da DPC e ISPRA. I quadrati verdi e blu mostrano le stazioni della rete CaGeoNet e della rete IGM, rispettivamente, ri-occupati dopo il 24 agosto.

La Figura 39 mostra il risultato di un modello preliminare di slip per l'evento del 30 ottobre, ottenuto dalla inversione degli spostamenti GPS mostrati in Figura 37. L'inversione è stata fatta utilizzando un modello di dislocazione a semispazio elastico, considerando una correzione per la topografia. In Figura 39 sono mostrate in magenta le box co-sismiche ottenute dall'inversione a slip-uniforme per gli eventi del 24 agosto (due box) e del 26 ottobre. Nell'inversione dello slip co-sismico, il piano di faglia per l'evento del 30 ottobre è fissato (length = 40 km, width = 18 km, dip= 45° e strike = 160°) ed è stata invece invertita la distribuzione di slip su patch a dimensione variabile (1x1 km fino a 3.5 km di profondità e 3.5x3.5 km per profondità maggiori) utilizzando l'approccio descritto in Cheloni et al. [2010]. Il modello, che è da considerarsi assolutamente preliminare, mostra una concentrazione di slip (con un valore massimo di 2.5 m) abbastanza superficiale, corrispondente ad una $M_w = 6.5$.

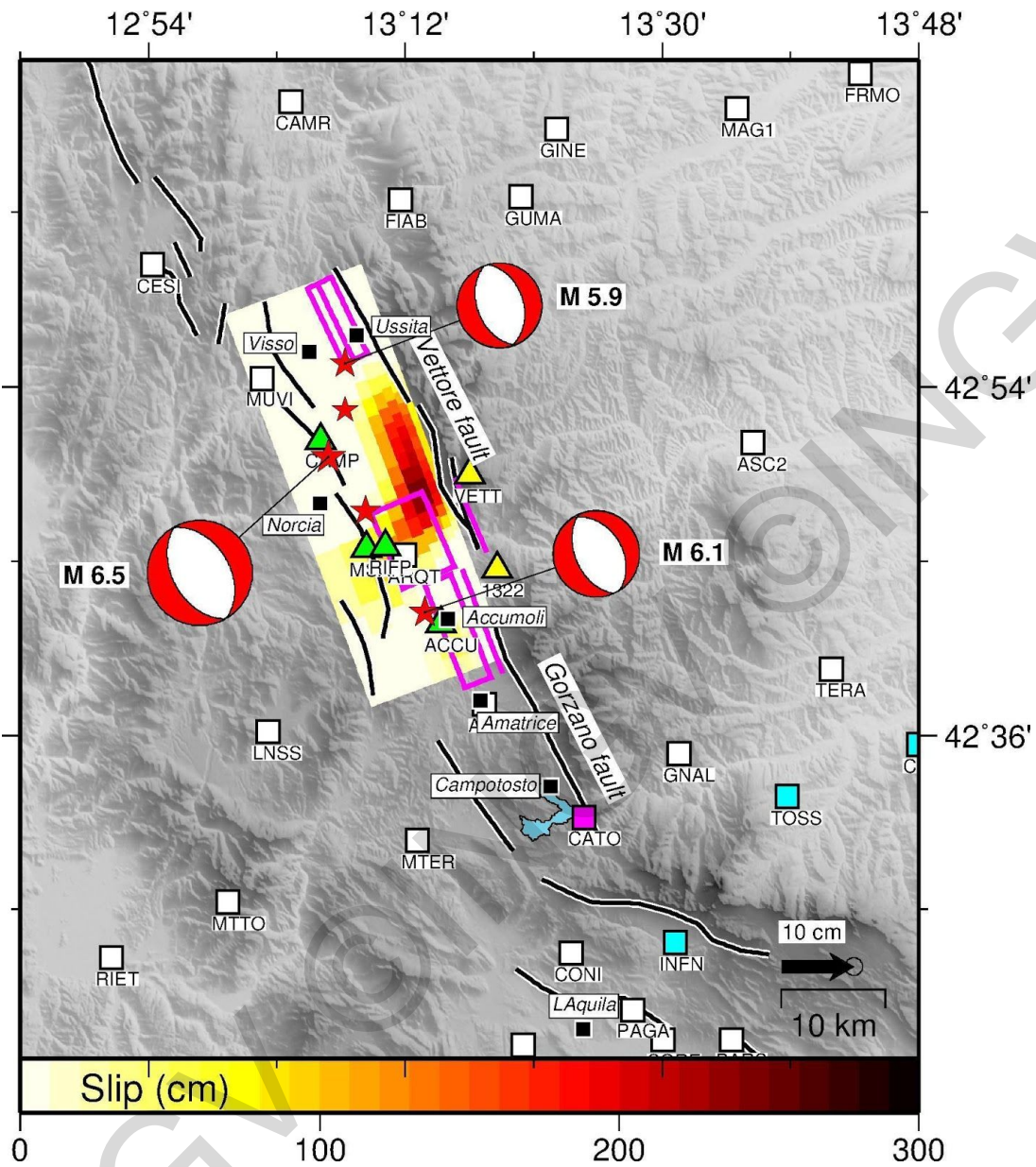
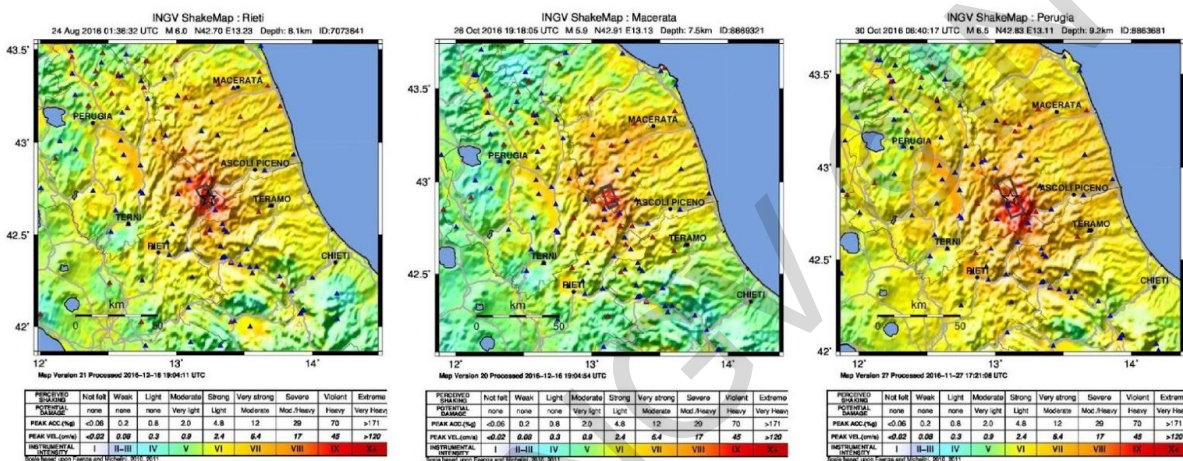


Figura 39. Modello di slip co-sismico per il M_w 6.5 del 30 ottobre ottenuto dall'inversione degli spostamenti GPS di Figura 38. I rettangoli box magenta mostrano le faglie ottenute dalla inversione non-lineare degli spostamenti GPS per gli eventi del 24 agosto e del 26 ottobre.

Shakemaps

Le mappe di scuotimento (shakemap) relative ai terremoti più forti del 24 agosto, 26 ottobre e 30 ottobre 2016 sono mostrate nelle figure in intensità MCS. (<http://shakemap.rm.ingv.it/shake/8863681/products.html>).

<http://shakemap.rm.ingv.it/shake/>



Le mappe di scuotimento in intensità macrosismica vengono calcolate utilizzando le relazioni di conversione determinate da Faenza e Michellini (2010, 2011), tra i parametri di scuotimento (PGA, PGV) e la scala delle intensità MCS

Lo scuotimento associato agli eventi del 24/08 e del 26/10 è maggiore in direzione N-NNE

Figura 40. Mappe di scuotimento in intensità MCS dei terremoti Mw 6.0 del 24/8/2016 Mw 5.9 del 26/10/2016 e del Mw 6.5 del 30/10/2016. È evidente che lo scuotimento fino al VI grado per il terremoto di magnitudo maggiore ha interessato un'area della penisola che all'incirca va da Campobasso a SE fino ad Arezzo a NW lungo l'asse appenninico. I triangoli rossi indicano stazioni della Rete Sismica Nazionale dell'INGV, mentre quelli blu fanno parte della Rete Accelerometrica Nazionale del Dipartimento per la Protezione Civile.

Riportiamo le mappe di scuotimento per gli eventi del 18 gennaio 2017, di magnitudo compresa tra M_w 5.5 e 5.0.

<http://shakemap.rm.ingv.it/shake/>

18/01/2017

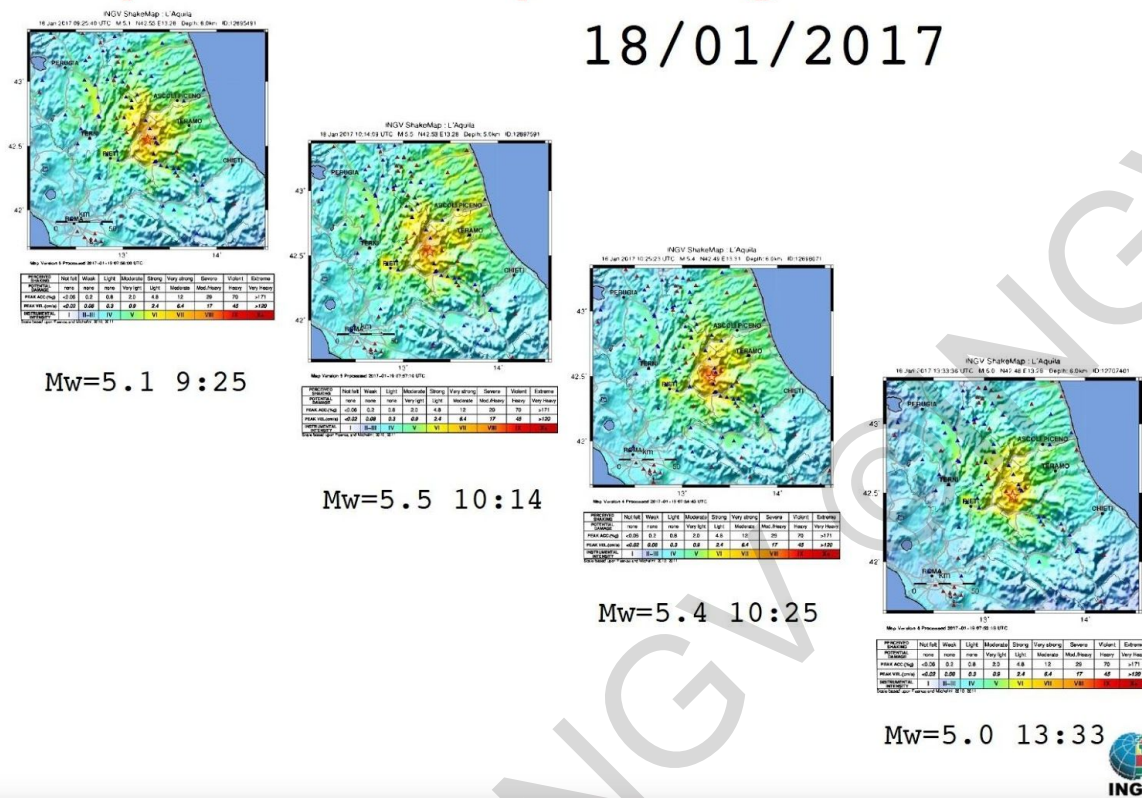


Figura 41. Mappe di scuotimento in intensità MCS dei terremoti del 18/1/ 2017. È evidente che lo scuotimento fino al VI grado ha interessato un’area piuttosto ristretta. I triangoli rossi indicano stazioni della Rete Sismica Nazionale dell’INGV, mentre quelli blu fanno parte della Rete Accelerometrica Nazionale del Dipartimento per la Protezione Civile.

Forecast dei terremoti (OEF)

Nella maggior parte del territorio italiano un forte terremoto è sempre possibile, in qualsiasi momento. Durante una sequenza sismica come quella iniziata il 24 agosto 2016 tale possibilità aumenta nel breve termine. In ambito scientifico, una “possibilità” si misura quantitativamente con una “probabilità”.

Dal 2014 il centro di pericolosità sismica (CPS) fornisce al Dipartimento della Protezione Civile (DPC) in via sperimentale forecast dei terremoti in tempo reale per finestre temporali di una settimana su tutto il territorio nazionale. Un forecast, o previsione probabilistica, è una stima della probabilità di accadimento di terremoti in una specifica area e per uno specifico intervallo di tempo (per esempio, una settimana).

Il modello utilizzato dal CPS è descritto in una pubblicazione su rivista internazionale [Marzocchi et al., 2014]. Modelli analoghi sono utilizzati in Nuova Zelanda per fornire informazioni al pubblico e ai decisori (<https://www.gns.cri.nz/Home/Our-Science/Natural-Hazards/Earthquakes/Earthquake-hazard-modelling/M7.8-Kaikoura-Earthquake-2016>) e in via di sviluppo presso lo United States Geological Survey [USGS; Page et al., 2016]. Tutti i modelli utilizzati sono in fase di continua verifica sperimentale in diverse aree geografiche come la California, la Nuova Zelanda, il Giappone e l'Italia. Tali esperimenti sono condotti nell'ambito dell'iniziativa internazionale Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability (CSEP).

Risultati per la sequenza di Amatrice-Norcia (24 agosto 2016 - 25 gennaio 2017)

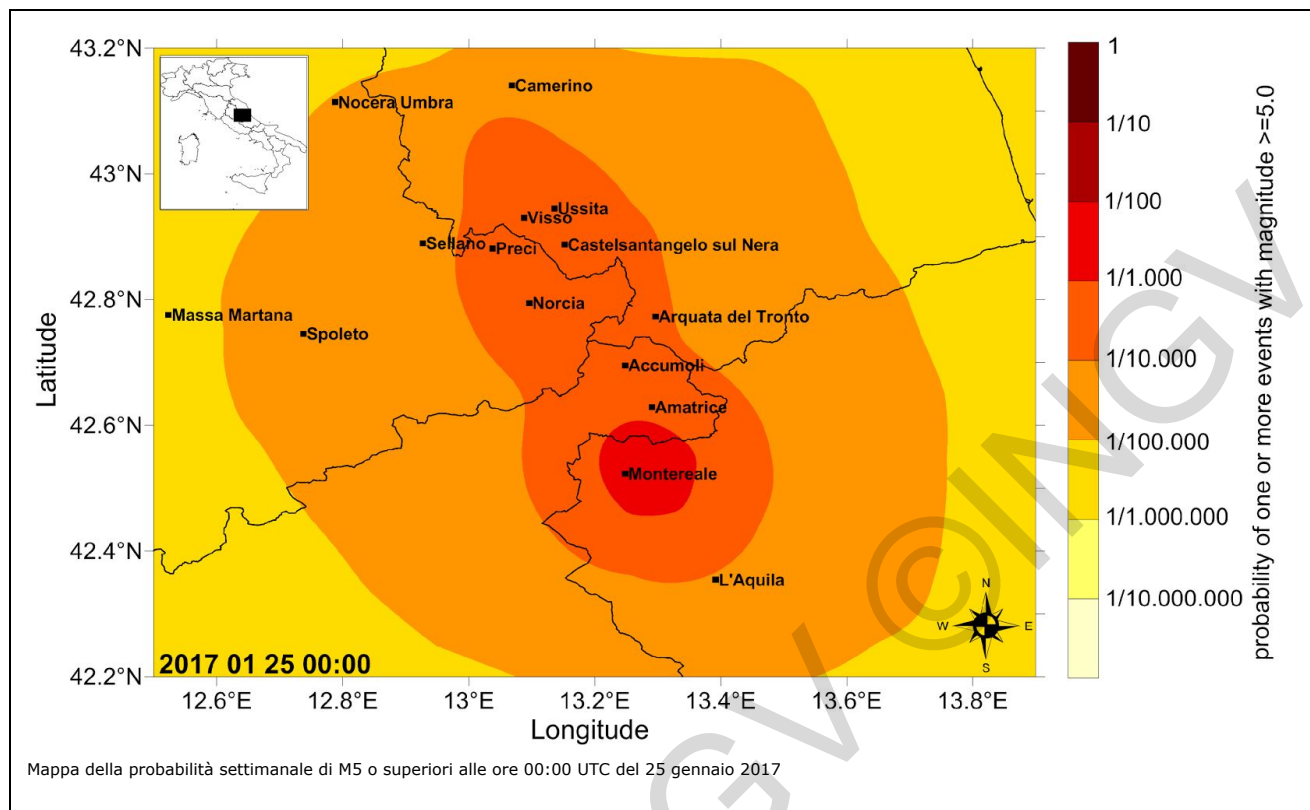
A seguito del terremoto M6 di Amatrice del 24 agosto 2016, il CPS ha fornito in fase sperimentale forecast settimanali per un'area di 50 km di raggio intorno all'epicentro (lat. 42.71, lon. 13.22). Dal 26 ottobre il raggio è stato aumentato a 70 km, e dal 30 ottobre si è usata un'area compresa tra le coordinate 42.4N-43.4N, 12.5E- 13.9E. Poiché l'area interessata dalla sequenza si è ulteriormente allargata, dal 18 gennaio l'area è diventata 42.2N- 43.2N, 12.5E- 13.9E.

Per questa sequenza, i forecast consistono in una stima della probabilità settimanale di osservare terremoti di magnitudo 4 o superiori, di magnitudo 5 o superiori, e di magnitudo 6 o superiori, nell'area interessata dalla sequenza. I forecast sono aggiornati settimanalmente, oppure dopo un terremoto di magnitudo 4.5 o superiore.

I risultati ottenuti finora dal modello utilizzato mostrano che la probabilità settimanale per terremoti di magnitudo 5 o superiore è variata da circa 1/670 (0.15%) prima del terremoto del 24 agosto ad un massimo di circa 1/4 (26%). Prima del terremoto del 30 ottobre (M 6.5), tale probabilità settimanale è stata circa 1/8 (12%). Nello stesso periodo, le probabilità settimanali di magnitudo 6 o superiori sono variate da circa 1/6700 (0.015%) ad un massimo di 1/33 (3%). È importante rimarcare che durante sequenze sismiche, in qualsiasi parte del mondo, le probabilità settimanali per i terremoti più grandi della sequenza stessa raramente superano pochi percento. Questo è tuttora un limite imposto dalle nostre parziali conoscenze del processo che genera i terremoti.

Il modello è in grado di fornire stime probabilistiche per diversi intervalli di tempo e con diversi formati a seconda delle necessità dell'utente.

Di seguito si riporta l'ultimo forecast settimanale rilasciato il 25 gennaio 2017 (Figura 42).



Forecast settimanale

(00:00 UTC 25/01/2017 - 00:00 UTC 01/02/2017)

- Prob. di terremoti con $M \geq 4$: **37%** (circa 1/3)
- Prob. di terremoti con $M \geq 5$: **5%** (circa 1/20)
- Prob. di terremoti con $M \geq 6$: **0.5%** (circa 1/200)

Figura 42. La mappa riporta le aree con maggiore probabilità. La legenda riporta la probabilità di uno o più terremoti di magnitudo 5 o superiori per un'area di 100 km² nella settimana che inizia il 25 gennaio 2017. Le probabilità (forecast settimanali) riportate sotto la figura si riferiscono a tutta l'area della figura per la stessa settimana.

Bibliografia

- AA. VV., (2016). *The Amatrice seismic sequence: preliminary data and results*. Annals of Geophysics, Vol. 59, Fast Track 59.
- Atzori, S., Hunstad, I., Chini, M., Salvi, S., Tolomei, C., Bignami, C., Stramondo, S., Trasatti, E., Antonioli, A. and Boschi, E., (2009). *Finite fault inversion of DInSAR coseismic displacement of the 2009 L'Aquila earthquake (central Italy)*. Geophysical Research Letters, 36(15).
- Cheloni, D., Giuliani, R., D'Anastasio, E., Atzori, S., Walters, R.J., Bonci, L., D'Agostino, N., Mattone, M., Calcaterra, S., Gambino, P. and Deninno, F., (2014). *Coseismic and post-seismic slip of the 2009 L'Aquila (central Italy) Mw 6.3 earthquake and implications for seismic potential along the Campotosto Fault from joint inversion of high-precision levelling, InSAR and GPS data*. Tectonophysics, 622, pp.168-185.
- Chiaraluce, L., Ellsworth, W.L., Chiarabba, C. and Cocco, M., (2003). *Imaging the complexity of an active normal fault system: the 1997 Colfiorito (Central Italy) case study*. Journal of Geophysical Research, Vol. 108, No. B6, 2294, doi: 10.1029/2002JB002166.
- Chiaraluce L. et al. *The 2016 Central Italy reverse seismic sequence*. Submitted to SRL.
- Cultrera, G., D'Alema, E., Amoroso, S., Angioni, B., Bordoni, P., Cantore, L., Cara, F., Caserta, A., Cogliano, R., D'Amico, M., Di Giulio, G., Di Naccio, D., Famiani, D., Felicetta, C., Fodarella, A., Lovati, S., Luzi, L., Massa, M., Mercuri, A., Milana, G., Pacor, F., Pischiutta, M., Pucillo, S., Puglia, R., Riccio, G., Tarabusi, G., Vassallo, M., & Mascandola, C., (2016). *Site effect studies following the 2016 Mw 6.0 Amatrice earthquake (Italy): the Emersito Task Force activities*. Annals of Geophysics, 59; doi:10.4401/ag-7189.
- EMERSITO working group, (2016). *Rapporto preliminare sulle attività svolte dal gruppo operativo EMERSITO a seguito del terremoto di Amatrice Mw 6.0 (24 agosto 2016, Italia centrale)*; doi: 10.5281/zenodo.151655.
- Galadini F. and Galli P. (2003). Paleoseismology of silent faults in the Central Apennines (Italy): the Mt. Vettore and Laga Mts. faults. ANNALS OF GEOPHYSICS, VOL. 46, N. 5, October 2003.
- ISIDe working group, (2016). Version 1.0; doi: 10.13127/ISIDe.
- Marchetti, A. et al., (2016). *The Italian Seismic Bulletin: strategies, revised pickings and locations of the Amatrice seismic sequence*, Annals of Geophysics, Vol. 59, Fast Track 59; doi: 10.4401/ag-7169.
- Marzocchi, W., Lombardi, A.M., Casarotti, E., (2014). *The establishment of an operational earthquake forecasting system in Italy*. Seismol. Res. Lett., 85(5), 961-969.
- Moretti, M., et al., (2012). *Rapid-response to the earthquake emergency of May 2012 in the Po Plain, Northern Italy*. Annals of Geophysics, "The Emilia (northern Italy) seismic sequence of May-June, 2012: preliminary data and results" edited by Marco Anzidei, Alessandra Maramai and Paola Montone, Vol. 55, n. 4. 583 – 590; doi: 10.4401/ag-6152.
- Moretti, M. et al., (2016). *SISMIKO: emergency network deployment and data sharing for the 2016 central Italy seismic sequence*. Annals of Geophysics, 59(5), 2016; doi: 10.4401/ag-7212.
- Page, M.T., van der Elst, N., Hardebeck, J., Felzer, K., Michael, A.J., (2016). *Three Ingredients for Improved Global Aftershock Forecasts: Tectonic Region, Time-Dependent Catalog Incompleteness, and Intersequence Variability*. Bull. Seismol. Soc Am. 106(5), 2290-2301.

- SISMIKO working group, (2016a). *Rapporto preliminare sulle attività svolte dal gruppo operativo SISMIKO a seguito del terremoto di Amatrice Mw 6.0 (24 agosto 2016, Italia centrale)*; doi: 10.5281/zenodo.157546.
- SISMIKO working group, (2016b). *Emergenza sismica nel centro Italia 2016-2017. Secondo rapporto del gruppo operativo SISMIKO. Sviluppo e mantenimento della rete sismica mobile a seguito del terremoto di Amatrice Mw 6.0 (24 agosto 2016, Italia centrale)*; doi: 10.5281/zenodo.260351.
- Time domain moment Tensor: <http://cnt.rm.ingv.it/tdmt>
- Tinti, E., L. Scognamiglio, A. Michelini, and M. Cocco, (2016). *Slip heterogeneity and directivity of the ML 6.0, 2016, Amatrice earthquake estimated with rapid finite-fault inversion*, Geophys. Res. Lett., 43, 10,745–10,752, doi:10.1002/2016GL071263.
- Valoroso L., Chiaraluce, L., Di Stefano, R., Piccinini, D., Waldhauser, F. and Schaff, D., (2013). *Radiography of a normal fault system by 64,000 high-precision earthquake locations: the 2009 L'Aquila (central Italy) case study*. Journal of Geophysical Research, 118, 1–21, doi:10.1002/jgrb.50130.

Esclusione di responsabilità e limiti di uso delle informazioni

L'INGV, in ottemperanza a quanto disposto dall'Art.2 del D.L. 381/1999, svolge funzioni di sorveglianza sismica e vulcanica del territorio nazionale, provvedendo all'organizzazione della rete sismica nazionale integrata e al coordinamento delle reti sismiche regionali e locali in regime di convenzione con il Dipartimento della Protezione Civile.

L'INGV concorre, nei limiti delle proprie competenze inerenti la valutazione della Pericolosità sismica e vulcanica nel territorio nazionale e secondo le modalità concordate dall'Accordo di programma decennale stipulato tra lo stesso INGV e il DPC in data 2 febbraio 2012 (Prot. INGV 2052 del 27/2/2012), alle attività previste nell'ambito del Sistema Nazionale di Protezione Civile.

In particolare, questo documento^[1] ha finalità informative circa le osservazioni e i dati acquisiti dalle Reti di monitoraggio e osservative gestite dall'INGV.

L'INGV fornisce informazioni scientifiche utilizzando le migliori conoscenze scientifiche disponibili al momento della stesura dei documenti prodotti; tuttavia, in conseguenza della complessità dei fenomeni naturali in oggetto, nulla può essere imputato all'INGV circa l'eventuale incompletezza ed incertezza dei dati riportati.

L'INGV non è responsabile dell'utilizzo, anche parziale, dei contenuti di questo documento da parte di terzi e di eventuali danni arrecati a terzi derivanti dal suo utilizzo.

La proprietà dei dati contenuti in questo documento è dell'INGV.



Quest'opera è distribuita con Licenza
[Creative Commons Attribuzione - Non opere derivate 4.0 Internazionale](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

[1] Questo documento rientra nella categoria di livello 3 come definita nei "Principi della politica dei dati dell'INGV (D.P. n. 200 del 26.04.2016)".