

CONTESTO SISMOTETTONICO E SORGENTI SISMOGENICHE DELLA SEQUENZA SISMICA DI AMATRICE-VISSO-NORCIA DEL 2016

**L. Bonini^{1,2*}, F.E. Maesano², R. Basili², P. Burrato², V. Cannelli², M.M.C. Carafa², U. Fracassi², V. Kastelic²,
D. Melini², G. Tarabusi², M.M. Tiberti², P. Vannoli², G. Valensise²**

¹ *Dipartimento di Matematica e Geoscienze, Università di Trieste*

² *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia*

Il 24 agosto 2016, il terremoto di M_w 6.0 localizzato nei pressi di Amatrice (RI) ha segnato l'inizio di un'intensa sequenza sismica che ha colpito l'Appennino centro-settentrionale. Tale evento, infatti, è stato seguito poche settimane più tardi prima da un terremoto di M_w 5.9 (26 ottobre 2016) localizzato nella zona di Visso (MC), e, successivamente, da un evento di M_w 6.5, il più energetico di tutta la sequenza, registrato il 30 ottobre 2016 con epicentro nei pressi di Norcia (PG).

Nel corso della sequenza sono stati acquisiti dati di straordinaria qualità, tra cui innumerevoli registrazioni velocimetriche e accelerometriche da reti locali e regionali e deformazioni co- e post-sismiche osservate tramite tecniche geodetiche (GPS, Dinsar), e sono stati mappati numerosissimi effetti di superficie cosismici (es. fagliazione).

Dal punto di vista geologico la prima fase della sequenza ha interessato un'area che si trova a cavallo del Thrust dei Sibillini, una delle strutture tettoniche più importanti dell'Appennino centro-settentrionale, che, insieme alle strutture estensionali pre- e post-*thrusting*, ha contribuito alla odierna strutturazione della catena. Successivamente la sequenza è evoluta spostandosi verso NNW, in direzione parallela alla porzione centrale del Thrust dei Sibillini.

Sia la distribuzione areale degli *aftershock* della sequenza, sia le deformazioni cosismiche osservate in superficie cadono a ridosso della parte meridionale del Thrust dei Sibillini; questa osservazione pone la necessità di comprendere quale ruolo possa aver avuto questa importante struttura tettonica, forse la più importante ed estesa di tutto l'Appennino centro-settentrionale. Per poter comprendere tale ruolo è necessario produrre un modello sismotettonico il più possibile dettagliato ed esteso all'intero strato sismogenico.

Abbiamo quindi costruito una serie di sezioni geologiche perpendicolari all'andamento delle principali strutture attive, sfruttando sia l'alta qualità dei dati geologici di superficie disponibili [carte geologiche, studi tettono-stratigrafici di dettaglio; es.: Pierantoni *et al.* (2013)] che i dati di sottosuolo derivanti da sismica a riflessione e stratigrafia di pozzi profondi. Con tali tecniche è però possibile ricostruire con buona approssimazione solo i primi 4/5 km della crosta fragile superiore. Per completare il quadro sismotettonico in profondità, e in particolare per inserire nel modello geologico le geometrie dei piani coinvolti nella sequenza a profondità sismogeniche, ci siamo avvalsi dell'analisi dei dati sismometrici (es. distribuzione degli *aftershock*, meccanismi focali) e dell'analisi delle deformazioni cosismiche derivate da osservazioni Dinsar.

Estrarre geometrie di faglia dall'analisi della distribuzione degli *aftershock* è operazione che può dar luogo ad ambiguità, innanzi tutto perché è sempre difficile separare la sismicità collegata con le rotture principali da quelle generate da strutture certamente secondarie. In secondo luogo, la qualità delle localizzazioni ipocentrali - e di conseguenza la pendenza apparente delle strutture che essi evidenziano - dipende fortemente sia dagli algoritmi usati per il calcolo ipocentrale, sia dai modelli di velocità selezionati, oltre che da altri fattori legati alla geometria della rete, ad eventuali temporanei malfunzionamenti ecc.

Per limitare le incertezze nella ricostruzione delle strutture tettoniche che hanno dato luogo alla sequenza basata sulla distribuzione degli *aftershocks* abbiamo scelto di dare un peso maggiore alle geometrie ottenute mediante inversione dei dati interferometrici. Il modello della sorgente sismica dell'evento principale (Mw6.5) è stato ricostruito con una inversione dei dati Sentinel-1 SAR, senza imporre alcun vincolo sui parametri principali (geometria, posizione ed estensione) e con una caratterizzazione bidimensionale, ovvero per sezioni perpendicolari alla struttura. Nel passo successivo abbiamo introdotto la terza dimensione, ponendo come vincolo alla modellazione il valore degli *strike* derivanti dai meccanismi focali degli eventi maggiori. Infine abbiamo imposto come informazione a priori nello schema del problema inverso che il fit dei dati utilizzi un numero di piani di faglia equivalente al numero degli eventi maggiori.

I risultati delle analisi suggeriscono che le rotture sismogeniche principali siano avvenute su piani a geometria piuttosto diversa. Se per l'evento del 24 agosto gli studi svolti in precedenza suggeriscono che l'inclinazione dei due piani possa essere di circa 45°-50° per la faglia meridionale e di 35°-40° per quella settentrionale (es. Bonini *et al.*, 2016), per gli eventi più energetici successivi, ed in particolare l'evento di M_w 6.5 di Norcia, le modellazioni suggeriscono che le rotture sismogeniche siano avvenute lungo superfici pendenti 35°-40° verso WSW. Confrontando questi risultati con lo schema geologico ricostruito indipendentemente per la scossa del 24 agosto si ottiene un quadro sismotettonico complessivo così riassumibile:

- il terremoto è stato generato da faglia ad inclinazione di 45°-50° localizzata nella zona compresa tra Amatrice e Arquata del Tronto;

- il punto di nucleazione della scossa, posto circa a metà della lunghezza della faglia, e l'evidenza di bilateralità della rottura (es. Tinti *et al.*, 2016) comporta che nel propagarsi verso nord la rottura stessa ha intersecato una porzione della rampa laterale del Thrust dei Sibillini, riattivandola parzialmente.

Per quanto riguarda le faglie responsabili del resto della sequenza, ed in particolare del terremoto di M_w 6.5 del 30 ottobre, il dip di 35° - 40° ottenuto da dati Dinsar pone un interrogativo fondamentale sulla natura della sorgente, perché questi valori sono i più bassi mai osservati per un terremoto appenninico estensionale, o tra i più bassi. Per rispondere a questo interrogativo, anche in considerazione della complessa storia tettonica dell'area, è necessario tenere in considerazione l'assetto geometrico delle diverse generazioni di strutture presenti e le loro relazioni reciproche.

1) **Faglie estensionali pre-thrusting.** Tali faglie derivano dalle fasi estensionali pre- o sin-compressive. Nonostante la loro continuità spaziale verticale possa essere limitata dalle troncature e traslazioni avvenute durante la fase di *thrusting*, non si può escludere che abbiamo una buona continuità nei volumi compresi tra due piani di *thrust*, o in aree in cui i *thrust* abbiano sufficiente lunghezza d'onda. Da ricordare che tali faglie affiorano in superficie, ma la loro continuità in profondità è necessariamente limitata dall'interferenza con le superfici di *thrust*.

2) **Faglie compressive.** Tali strutture sono coeve alla fase compressiva neogenica. Il loro andamento in profondità è da sempre un argomento di dibattito. Ciò nonostante, vari autori hanno già ipotizzato un radicamento intorno agli 8/10 km di profondità per il Thrust dei Sibillini (es. Boncio e Lavecchia, 2000; Di Domenica *et al.*, 2014; Pizzi *et al.*, 2017). Per quanto riguarda l'inclinazione della rampa laterale del *thrust*, è plausibile che ricada nell'intervallo 30° - 50° . Da notare che l'orientazione del *thrust* e delle pieghe associate è parallela alla orientazione dei piani nodali dei meccanismi focali della sequenza; questo si nota in special modo nella zona settentrionale, al passaggio fra la sua rampa laterale e quella frontale del *thrust*.

3) **Faglie estensionali quaternarie.** Nell'area che va dalle pendici del Monte Vettore fino in prossimità del Monte Bove sono state da tempo riconosciute e descritte faglie estensionali con attività quaternaria (es. Calamita e Pizzi, 1992). In affioramento tali faglie sono solitamente ad alto angolo, e in parte riutilizzano piani di faglia estensionali ereditati dalla fase distensiva pre-contrazionale. Dopo il terremoto di 30 ottobre 2016 lungo alcuni di questi segmenti sono stati osservati rigetti cosismici importanti (fino a 2 m). Per comprendere l'estensione di tali faglie in profondità diventa fondamentale lo studio delle loro relazioni con le strutture pre-quaternarie. In particolare le relazioni tra queste faglie e i piani di sovrascorrimento aiuterebbero a comprendere se esse proseguono in profondità dislocando i *thrust*, oppure terminano in corrispondenza di essi. Nel corso degli anni numerosi autori hanno analizzato tale rapporto, specialmente nella zona di Forca di Presta, al limite sud-orientale della Piana di Castelluccio. La maggior parte di essi osserva che le faglie estensionali non dislocano i *thrust* (es. Cooper e Burbi, 1986; Alberti *et al.*, 1996; Pizzi e Galadini, 2009; Di Domenica, 2013; Pierantoni *et al.*, 2013). Altri autori invece hanno suggerito che le faglie estensionali affioranti nell'area hanno dislocato anche i *thrust* (es. Lavecchia, 1985; Calamita e Pizzi, 1992; Pizzi *et al.*, 2017). Poiché le rotture cosismiche rilevate sono localizzate sempre a nord/ nord-ovest della rampa laterale del Thrust dei Sibillini (Emergeo Working Group, 2016), a nostro avviso non vi sono dati diretti che consentano di affermare che le faglie estensionali attive dislochino il *thrust*.

Sulla base di un approccio multidisciplinare, e tenendo conto sia delle evidenze geologiche di superficie che delle evidenze sismologiche e geodetiche, proponiamo quindi il seguente quadro sismotettonico d'insieme:

- il terremoto del 24 agosto è stato causato in parte da una faglia estensionale localizzata a letto del Thrust dei Sibillini, nella zona compresa tra Amatrice e Arquata del Tronto; il progredire della rottura cosismica verso nord ha riattivato in parte la rampa laterale del Thrust dei Sibillini (Bonini *et al.*, 2016);

- gli eventi dell'ottobre 2016 (Visso, M_w 5.9, e Norcia, M_w 6.5) sono stati plausibilmente generati dalla riattivazione estensionale della rampa sepolta del Thrust dei Sibillini;
- le dislocazioni cosismiche osservate in superficiali sono riconducibili sia al movimento lungo faglie quaternarie, sia a riattivazione di strutture ereditate dalle fasi deformative precedenti che accomodano la deformazione cosismica prodotta dalla struttura principale, sia a movimenti gravitativi cosismici, con rapporti reciproci tra le varie componenti ancora da esplorare nel dettaglio.

Bibliografia

- Alberti, M., Decandia, F.A., and Tavarnelli, E.; 1996: *Modes of propagation of the compressional deformation in the Umbria-Marche Apennines*. Memorie della Societa Geologica Italiana, v. 51, p. 71–82.
- Boncio, P. and Lavecchia, G.; 2000: *A structural model for active extension in Central Italy*. Journal of Geodynamics, 29, 233–244.
- Bonini, L., Maesano, F.M., Basili, R., Burrato, P., Carafa, M.M.C., Fracassi, U., Kastelic, V., Tarabusi, G., Tiberti, M.M., Vannoli, P., Valensise, G.; 2016: *Imaging the tectonic framework of the 24 August 2016, Amatrice (central Italy) earthquake sequence: new roles for old players?* Annals of Geophysics, 59, fast track 5; doi: 10.4401/ag-7229.
- Calamita, F. and A. Pizzi; 1992: *I "fasci" di faglie recenti ed attive di M. Vettore e di M. Castello-M. Cardoso (Appennino Umbro-Marchigiano)*. Studi Geologici Camerti, volume speciale 1, 81-95.
- Cooper, J.C., Burbi, L.; 1986: *The geology of the Central Sibillini Mountains*. Mem. Soc. Geol. It., 35, 323-347.
- Di Domenica, A.; 2013: *Investigating inversion tectonic processes through geological-structural data and numerical and analogue modeling: an application to the Central-Northern Apennine curved belt*. PHD Thesis.
- Di Domenica, A., L. Bonini, F. Calamita, G. Toscani, C. Galuppo and S. Seno; 2014: *Analogue modeling of positive inversion tectonics along differently oriented pre-thrusting normal faults: An application to the Central-Northern Apennines of Italy*. Geological Society of America Bulletin, 126, 7-8, 943-955, doi:10.1130/B31001.1.
- Lavecchia, G.; 1985: *Il sovrascorrimento dei Monti Sibillini: analisi cinematica e strutturale*. Boll. Soc. Geol. It. 104, 161-194.
- Pierantoni, P., G. Deiana and S. Galdenzi; 2013: *Stratigraphic and structural features of the Sibillini Mountains (Umbria- Marche Apennines, Italy)*. Italian Journal of Geosciences, 132(3), 497-520, doi:10.3301/IJG.2013.08.
- Pizzi, A. Di Domenica, A., Gallovič, F., Luzi, L., Puglia, R.; 2017: *Fault segmentation as constraint to the occurrence of the main shocks of the 2016 Central Italy seismic sequence*. Tectonics, doi: 10.1002/2017TC004652.
- Tinti, E., L. Scognamiglio, A. Michelini, Cocco, M.; 2016: *Slip heterogeneity and directivity of the ML 6.0, 2016, Amatrice earthquake estimated with rapid finite-fault inversion*. Geophysical Research Letters, doi: 10.1002/2016GL071263.