

## ANALISI RETROSPETTIVA DELLA FASE PRECEDENTE IL TERREMOTO DI MD=5.1 DI BOVEC-KRN (2004)

G. Rossi, D. Zuliani, P. Fabris

*Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - OGS, Centro di Ricerche Sismologiche - Trieste/  
Udine, Italy*

**Introduzione.** Il lavoro presenta un'analisi retrospettiva di fenomeni che apparentemente hanno accompagnato e preceduto il terremoto del 12 luglio, di  $M_D=5.1$ , avvenuto nei pressi di Bovec-Krn (Slovenia), a breve distanza dal terremoto del 12 aprile 1998,  $M_D=5.6$ .

Rossi *et al.* (2016), hanno analizzato dati cGNSS nell'area, parte della rete FReDNet dell'OGS (Zuliani *et al.*, 2018), parte della rete Marussi della regione Friuli Venezia Giulia, nonché i dati della stazione GSR1 della rete EUREF. In particolare, gli autori hanno evidenziato il sorgere di un segnale che si è propagato attraverso l'Italia Nord-Orientale e la Slovenia Occidentale tra il 2006 ed il 2009. Il disturbo ha causato un movimento inizialmente verso l'alto e successivamente verso il basso. Solo il sito GSR1, nella parte più orientale dell'area in esame, ha mostrato un movimento opposto, prima verso il basso e poi verso l'alto. Le componenti orizzontali mostrano un comportamento simile, con una piccola oscillazione pressoché parallela ai principali lineamenti tettonici presenti nelle diverse aree.

Rossi *et al.* (2016) hanno interpretato il segnale come legato alla propagazione di fluidi in forma di un'onda di porosità. Le onde di porosità sono pacchetti di fratture interconnesse, sature in fluidi, che si propagano spontaneamente verso l'alto e nella direzione del minimo sforzo orizzontale, seguendo il gradiente di pressione e le variazioni di permeabilità. In questo modo è garantita la massima efficienza del trasporto (Wiggins and Spiegelman 1995; Connolly and Podladchikov 1998; 2013; Revil and Cathles 2002). Secondo Rossi *et al.* (2016), il transiente si è originato tre mesi e mezzo prima del main shock del 2004, a 6.5 km a NO dell'epicentro, ad una profondità di 9.2 km. Tale localizzazione lo porta ad essere, al di sotto del bacino di Bovec, sulla continuazione della Ravne fault, una struttura appartenente al sistema Dinarico,

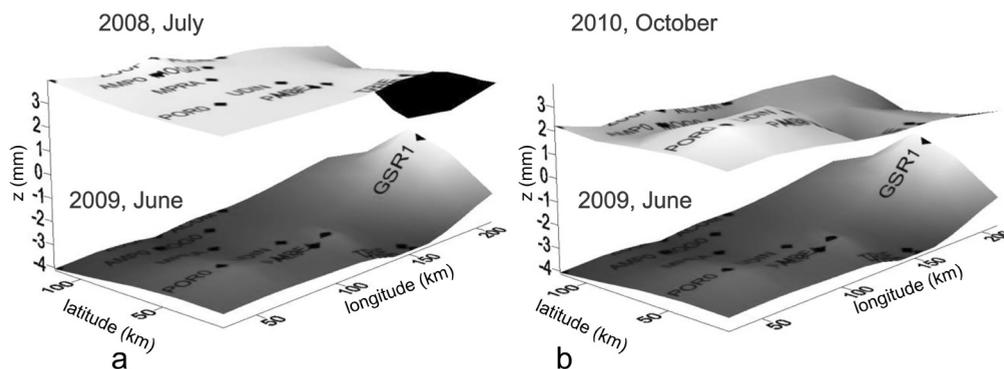


Fig. 1 - Superfici ottenute interpolando i dati dello spostamento osservato nelle varie stazioni di misura in diversi momenti: in a, 2008 July, il quadro della fase principale del transiente; 2008, June: inizio della seconda fase. b) estinzione del transiente (2010, October).

responsabile della sismicità dell'area. È da notare che il bacino di Bovec, secondo Kastelic *et al.* (2008) agirebbe come una barriera all'ulteriore prosecuzione verso NO della faglia di Ravne.

Rossi *et al.* (2016) ipotizzano all'origine della diffusione di fluidi un meccanismo a valvola da parte della faglia di Ravne (Sibson, 1992). Secondo il modello di Sibson, faglie che mettono a contatto zone con caratteristiche di pressione di poro molto diverse, possono comportarsi come valvole attivate dalla pressione stessa dei fluidi, e permettere la loro diffusione. A supporto della loro tesi, Rossi *et al.* (2016; 2017) portano i valori della diffusività idraulica, ottenuta dall'inversione dei tempi di arrivo del segnale transiente nelle diverse stazioni cGNSS. Tali valori sono consistenti con le litologie principali presenti nell'area.

Questo lavoro nasce dall'intento di validare ulteriormente l'ipotesi proposta da Rossi *et al.* (2016; 2017).

**Metodi e risultati.** Dettagliate analisi sulla possibile influenza sui segnali cGNSS di fenomeni idrologici legati a variazioni stagionali ed a fenomeni piovosi, hanno permesso di caratterizzare meglio il segnale transiente. Il moto delle componenti orizzontali e verticale nei diversi siti è in accordo a quello generato da una variazione di massa nel volume di origine del transiente (Wahr *et al.*, 2013), distribuitasi poi su un'area ellittica con un asse maggiore orientato NO-SE, coincidente quindi con l'orientamento della faglia di Ravne.

Le informazioni sulla diffusività idraulica ( $D_h$ ) sono ancora relativamente scarse, soprattutto per formazioni carbonatiche, per le quali, al contrario, si trovano informazioni sulla permeabilità ( $k$ ). Si sono quindi calcolati i valori di permeabilità attraverso la relazione, dove  $\phi$  è la porosità,  $\eta_f$  è la viscosità dinamica del fluido, mentre  $\beta_f$  è la compressibilità del fluido, e  $\beta_r$  è la compressibilità della roccia. (Talwani *et al.*, 1999). Il calcolo è stato fatto per le quattro formazioni più rappresentative della zona (Flysch Paleozoico - Hochwipfel; Dolomia Principale del Triassico; Calcarei Grigi del Giurassico, e Flysch Cenozoico). I valori ottenuti sono in accordo con i valori di permeabilità misurati in litotipi simili, e riportati in letteratura. I forti contrasti di permeabilità delle rocce coinvolte nel complesso sistema di sovrascorrimenti e di faglie trascorrenti dell'area possono quindi portare a locali sovrappressioni, quali quelle ipotizzate per il meccanismo a valvola (Figura 2 c).

Per avere lo stato di pressione nel volume di origine del transiente, e verificare l'ipotesi del meccanismo a valvola, si è calcolato il rapporto tra lo sforzo effettivo all'origine del transiente (Rossi *et al.* 2017) ed il carico litostatico. Per il calcolo di quest'ultimo sono stati considerati diversi profili verticali costruiti utilizzando i dati di Faccenda *et al.* (2007) e Bressan *et al.* (2012). Dal calcolo del rapporto si ricava uno stato di forte sovrappressione, con la pressione di poro pari a 0.9 volte la pressione litostatica nella fase che ha preceduto il terremoto del 2004 (Rossi *et al.*, 2018).

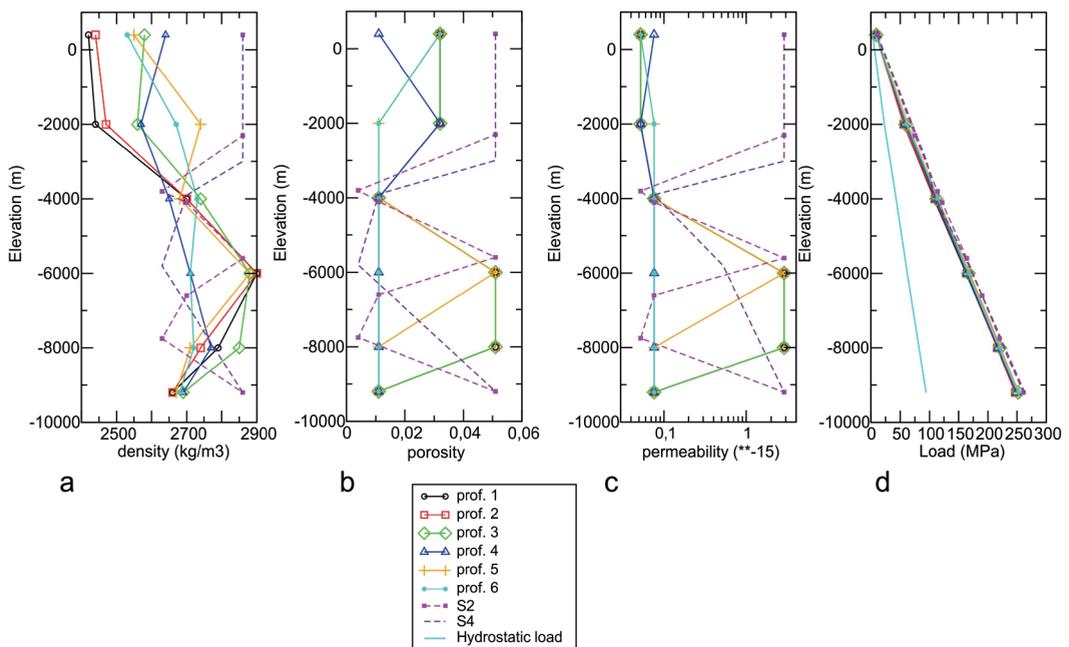


Fig. 2 - Profili verticali della densità (a), porosità (b), permeabilità (c) e carico litostatico (d). Le linee continue sono riferite ai profili tracciati attraverso i nodi intorno a Bovec del modello 3D di velocità e densità (Bressan *et al.*, 2012). Le linee tratteggiate sono relative ai profili S2 e S4 da Faccenda *et al.* (2007). La linea azzurra in d indica il carico idrostatico.

L'ultima analisi condotta a supporto della tesi è stata l'analisi dell'attività sismica nei mesi successivi il terremoto del 2004, per verificare se almeno parte di questa sia compatibile con un modello di diffusione (Shapiro *et al.*, 2002). Il risultato è positivo, anche se limitato a pochi eventi.

**Conclusioni.** I risultati del presente lavoro confermano l'ipotesi che nell'intorno spazio-temporale del terremoto di Bovec-Krn del 2004, un comportamento a valvola della faglia di Ravne ha rotto uno stato iniziale di sovrappressione, portando alla diffusione di fluidi nella regione, ed alla registrazione di un segnale piccolo ma riconoscibile nei dati cGNSS. Benché tali dati provengano da un'analisi a posteriori, possono portare ad una migliore comprensione della relazione tra faglie, fluidi e deformazioni ed alla previsione di comportamenti simili in questa ed in altre regioni.

## Bibliografia

- Bressan G., Gentile G.F., Tondi R., De Franco R. and Urban S.; 2012: *Sequential Integrated Inversion of tomographic images and gravity data: an application to the Friuli area (north-eastern Italy)*. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, **53**, 191-212, doi: 10.4430/bgta0059.
- Connolly J. A. D. and Podladchikov Y. Y.; 1998: *Compaction driven fluid flow in viscoelastic rock*. Geodinamica Acta, **11**, 55-84, doi:10.1016/S0985-3111(98)80006-5.
- Connolly J. A. D. and Podladchikov Y. Y.; 2013: *A Hydromechanical model for lower crustal fluid flow*. In: Harlov, D.E., and H. Austrheim (Eds), *Metasomatism and the chemical transformation of rock (599-658)*, Lecture Notes in Earth System Sciences, Springer, Berlin, Heidelberg, doi: 10.1007/978-3-642-28394-9\_14.
- Faccenda M., Bressan G. and Burlini L.; 2007: *Seismic properties of the upper crust in the central Friuli area (northeastern Italy) based on petrophysical data*. Tectonophysics, **445**(3-4), 210-226, doi: 10.1016/j.tecto.2007.08.004.
- Kastelic V., Vrabc M., Cunningham D. and Gosar A.; 2008: *Neo-Alpine structural evolution and present-day tectonic activity of the eastern Southern Alps: The case of the Ravne Fault, NW Slovenia*. Journal of Structural Geology, **30**, 963-975, doi:10.1016/j.jsg.2008.03.009.

- Revil A. and Cathles L.M. III; 2002: *Fluid transport by solitary waves along growing faults. A field example from the South Eugene Island basin, Gulf of Mexico*. Earth and Planetary Sciences Letters, **202**, 321-335, doi: 10.1016/S0012-821X(02)00784-7.
- Rossi G., Zuliani D. and Fabris P.; 2016: *Long-term GNSS measurements through Northern Adria microplate reveal fault-induced fluid mobilization*. Tectonophysics, **690**, 142-159, doi: 10.1016/j.tecto.2016.04.031.
- Rossi G., Zuliani D. & Fabris P.; 2017: *Corrigendum to: Long-term GNSS measurements through Northern Adria microplate reveal fault-induced fluid mobilization*. Tectonophysics, **694**, 486-487, doi: 10.1016/j.tecto.2016.10.035.
- Rossi G., Fabris P., Zuliani D.; 2018: *Overpressure and fluid diffusion causing non-hydrological transient GNSS displacements*. Pure and Applied Geophysics, **175**, 1869-1888, doi: 10.1007/s00024-017-1712-x.
- Shapiro S. A., Rothert E., Rath V. and Rindschwentner J.; 2002: *Characterization of fluid transport properties of reservoirs using induced microseismicity*. Geophysics, **67**, Special section—Seismic signatures of fluid transport, 212-220.
- Sibson R.H.; 1992: *Implications of fault-valve behaviour for rupture nucleation and recurrence*. Tectonophysics, **211**, 283-293, doi:10.1016/0040-1951(92)90065-E.
- Talwani P., Cobb J.S. and Schaeffer M.F.; 1999: *In situ measurements of hydraulic properties of a shear zone in northwestern South Carolina*. Journal of Geophysical Research, **104**, **B7**, 14,993-15,003, doi: 10.1029/1999JB900059.
- Wahr J., Khan S. A., van Dam T., Liu L., van Angelen J. H., van den Broeke M. R., and Meertens C. M.; 2013: *The use of GPS horizontals for loading studies, with applications to northern California and southeast Greenland*. Journal of Geophysical Research, Solid Earth, **118**, 1795-1806, doi:10.1002/jgrb.50104.
- Wiggins C. and Spiegelman M.; 1995: *Magma migration and magmatic solitary waves in 3-D*. Geophysical Research Letters, **22**, 1289-1292, doi: 10.1029/95GL00269.
- Zuliani D., Fabris P. and Rossi G.; 2018: *FReDNet: evolution of permanent GNSS receiver system*. in: Cefalo R., Zieliński J., Barbarella, M (Eds), *New Advanced GNSS and 3D Spatial Techniques Applications to Civil and Environmental Engineering, Geophysics, Architecture, Archeology and Cultural Heritage*, Lecture notes in Geoinformation and Cartography”, Springer, Switzerland, pp. 123-137, doi:10.1007/978-3-319-56218-6\_10.ti.