Osservatorio Ambientale "Val d'Agri" – Convegno Scientifico "Sismicità Indotta" Marsico Nuovo, 15 Marzo 2013

ANALISI DELLA SISMICITA' NATURALE ED INDOTTA DELLA VAL D'AGRI REGISTRATA DA UNA RETE SISMICA TEMPORANEA AD ALTA DENSITA'

Luigi Improta & Luisa Valoroso Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma

Con il contributo dei colleghi: Claudio Chiarabba, Pasquale De Gori, Aladino Govoni, Lauro Chiaraluce, Raffaele Di Stefano



La Campagna di Sismica Passiva del 2005-2006

Studiare la sismicità della Val d'Agri con una rete sismica temporanea densa:

Perchè la Val d'Agri?

- Elevato potenziale sismogenetico (Magnitudo ~ 7).
- Ipotesi contrastanti sull'evoluzione tettonica recente (Pleistocene Superiore Olocene).
- Quadro sismotettonico ambiguo. Quali sono le principali faglie attive e quale il potenziale sismogenetico?
- Sismicità strumentale registrata dalla Rete Nazionale di bassa energia e sparsa.

Quali Obiettivi Previsti?

- Registrare e localizzare in modo accurato la $_{\rm 40^{\circ}\,18^{\circ}}$ sismicità anche di bassissima energia.

- Migliorare il quadro sismotettonico dell'area.
- Identificare e caratterizzare faglie attive ^{40° 1} (posizione, geometria, cinematica).

Ricerca di base (PhD di Luisa Valoroso)



Caratteristiche della Rete Sismica

Area di Studio:

M.ti della Maddalena – Bacino della Val d'Agri – Dorsale del Volturino – M.te Alpi

40° 30'

15° 30'

Rete Sismica Temporanea:

- 19 stazioni sismiche dell'INGV.

- 4 stazioni temporanee dell'Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale (OGS – Trieste).





16° 00'

16° 12'

16° 06'

16° 18'

15° 48'

15° 42'

Sismicità - Localizzazioni Ipocentrali 1-D Preliminari

- Estrazione dei possibili eventi sismici dalle registrazioni in continuo della Rete Temporanea (Algoritmo STA/LTA).

- Lettura dei tempi di arrivo fasi P ed S ed attribuzione dei pesi (Algoritmo di Lettura Automatica MPX; Di Stefano et al., GJI, 2006).

40° 30'

40° 24' 1994 terremoti localizzati in un modello di velocità 1-D 40° 18' Criteri di Selezione dei terremoti: - almeno 4 stazioni sismiche 40° 12' - RMS < 0.3 secondi - Gap Azimutale < 270° errore di localizzazione < 900 m 40° 06' 10 km 40° 00' · 15° 36' 15° 42' 15° 48' 15° 54' 16° 00' 15° 30'

Geometria della Rete Sismica ed Epicentri (cerchi rossi) dei 1994 terremoti selezionati.

EAFS

▲ INGV Agri network ▲ ENI seismic network ■ INGV national network

16° 12'

16° 18'

Oil wells

16° 06'

Sismicità – Magniduto Eventi (1994 terremoti)

- Sismicità intensa, ma di bassa magnitudo (-0.2 < M_L < 2.7)
- La magnitudo di completezza del nostro catalogo strumentale è Mc=0.4



Sismicità - Localizzazioni Ipocentrali 1-D (1994 terremoti)



Sismicità - Localizzazioni Ipocentrali 1-D (1994 terremoti)

201.

Nuovo, 15 Marzo

"Sismicità Indotta" Marsico

Conv



Esempio di Registrazione Sismica

- Attività prevalente di tipo sciame sismico.
- Terremoti multipli di energia simile concentrati in pochi minuti.



Distribuzione Spazio-Temporale della Sismicità

- Il tasso di sismicità è molto variabile nel tempo e nello spazio.

- Almeno 5 fasi temporali con diverso tasso di sismicità evidenziate da cambi di pendenza della curva cumulativa del numero di terremoti.



Distribuzione Spazio-Temporale della Sismicità

Fase 1: Maggio-Luglio 2005 (tasso moderato in diminuzione, sismicità diffusa)

Fase 2: Agosto-Dicembre 2005 (tasso debole, sismicità diffusa)

Fase 3: Gennaio-Febbraio 2006 (tasso moderato in aumento, settore sud-est)

Fase 4: Marzo-Maggio 2006 (tasso elevato + sciami, settore sud-est)

Fase Conclusiva: Maggio-Giugno 2006 (tasso in forte diminuzione, ma picco isolato di sismicitàsettore nord-est)Distribuzione spazio-temporale della sismicità



Tomografia Sismica con Terremoti Locali e Localizzazioni Tridimensionali

744 Terremoti Selezionati

```
Criteri di Selezione: almeno 10 fasi P ed 8 fasi S, RMS < 0.3 s,
Gap Azimutale < 180°, Errori localizzazione ipocentrale 1-D < 500 m.
```

Dati: 10134 tempi di arrivo fase P, 9424 tempi di arrivo fase S.

Tecnica Tomografica: inversione linearizzata, iterativa, perturbativa (Eberhart-Phillips et al., 1997).

Modello 3-D di velocità delle onde P (Vp) e delle onde S (Vs) definito su griglia regolare di 3 km di lato.

Errore medio (formale) delle localizzazioni ipocentrali 3-D finali: 100 m (errore orizzontale) e 140 m (errore verticale).

Tomografia Sismica con Terremoti Locali e Localizzazioni 3-D

Risultati:

- Modello 3-D: importanti variazioni laterali di velocità delle onde P (Vp).
- Corpi ad alta Vp: culminazioni della Piattaforma Carbonatica Apula.
- Calcari e dolomie Apuli: Vp = 6.0-6.5 km/s.
- Calcari Apuli fratturati e saturi di fluidi in sovra-pressione: alta Vp ed elevato valore del rapporto Vp/Vs (Vp/Vs=1.95-2.10).



Tomografia Sismica con Terremoti Locali e Localizzazioni 3-D

La sismicità si concentra nella parte superiore della Piattaforma Carbonatica Apula (2 - 6 km di profondità) in regioni con alta Vp e con elevato valore del rapporto Vp/Vs.

M.Maddalena

Eastern Agri



Sismicità lungo il bordo nord-est della dorsale dei M.ti della Maddalena

70 epicentri si allineano per 10-12 km lungo il margine nord-est della dorsale dei Monti della Maddalena.

In sezione, gli ipocentri delineano tra 1.0-6.5 km di profondità (dalla superficie) una struttura (faglia) con:

- direzione NW-SE
- pendenza verso NE (50°)
- cinematica normale (faglia distensiva)



Sismicità lungo il bordo nord-est della dorsale dei Mti della Maddalena

La prosecuzione in superficie della faglia e la cinematica sono coerenti con la **Faglia di Monte Aquila** (MAF) identificata a sud di Tramutola in base a: geologia di superficie, trincee paleosismologiche, carotaggi, prospezioni sismiche e

geoelettriche superficiali.

La Faglia di Monte Aquila è una faglia attiva con evidenze di fagliazione superficiale cosismica nell'Olocene (trincee paleosismologiche).

In base ad i dati geologici, geofisici e di sismicità, il potenziale sismogenetico della Faglia di Monte Aquila è stimato a M_w = 6.0-6.3 (*Improta et al., JGR, 2010*).



Microsismicità a sud-est del Bacino della Val d'Agri

La sismicità localizzata a sud-est del bacino ha le seguenti caratteristiche:

- sismicità diffusa di tipo sciame
- alto tasso (fino a 30 eventi/giorno)
- piccola magnitudo (M_L<2.0)
- bassa profondità (< 5 6 km)

Queste caratteristiche sono tipiche della sismicità indotta dalla variazione del volume di invasi artificiali (*Gupta*, *Tectonophysics*, 1985).



Sismicità a sud-est della Val d'Agri – Relazione con l'invaso del Pertusillo

Confronto della distribuzione temporale dei terremoti con le curve di carico-scarico dell'invaso del Pertusillo.



Sismicità a sud-est della Val d'Agri – Relazione con l'invaso del Pertusillo

Intervallo A-B (fase 2): scarico dell'invaso, bassa sismicità. Intervallo B-C (fase 3): rapida ricarica dell'invaso, incremento tasso sismicità



Sismicità a sud-est della Val d'Agri – Relazione con l'invaso del Pertusillo

Intervallo C-D (fase 4): fase finale della ricarica, sismicità molto elevata con frequenti sciami.

Dopo il punto D (Maggio): inizio scarico, drastica riduzione della sismicità.



Sismicità a sudest della Val d'Agri Tomografia Sismica nel Tempo (4-D)

Il processo determina variazioni spazio-temporali delle proprietà elastiche del mezzo? (i.e., variazioni nella velocità delle onde P ed onde S)

Tomografia Sismica 4-D:

1 - Determinazione di due modelli di velocità tomografici 3-D (Vp e Vp/Vs) utilizzando dati registrati durante la fase 3 e la fase 4.

2 - Differenza tra i valori di velocità del modello tomografico della fase 4 e della fase 3.





Tomografia Sismica 4-D

La differenza tra i modelli tomografici della fase 4 e della fase 3 mostra una 🗿 riduzione del 7-8% della Vp nella regione 🖥 6 interessata dalla sismicità.

Interpretazione:

Volume crostale di interesse: calcari Apuli fratturati saturi di fluidi (H₂O) in sovrappressione

La ricarica dell'invaso produce un incremento della pressione verticale totale nel volume crostale sottostante con conseguente aumento istantaneo della pressione di poro (i.e. risposta non drenata)

L'aumento della pressione di poro produce apertura delle fratture preesistenti e formazione di nuove fratture => Vp diminuisce



Tomografia Sismica 4-D

Perché si generà sismicità?

L'aumento della pressione di poro diminuisce la resistenza a rottura delle rocce con conseguente genesi di microsismicità quasi-instantanea (i.e. sismicità indotta di tipo primario; Talwani, Pageoph, 1997).

La dislocazione è favorita su faglie orientate favorevolmente rispetto al campo di stress estensionale di direzione SW-NE (i.e. faglie normali di direzione NW-SE).

NB: non osserviamo una chiara migrazione spaziale della sismicità indicativa di migrazione dei fluidi e diffusione della pressione di poro.



Sismicità nell'area dell'invaso del Pertusillo (pre- e post-esperimento)

I cataloghi strumentali (anni 1998-2010) mostrano che l'area intorno all'invaso del Pertusillo è stata interessata da microsismicità (magnitudo massima 2.9).

La sismicità si concentra nei mesi di Marzo, Aprile e Maggio.





Distribuzione mensile della sismicità per il periodo 1998-2010.

Sismicità nell'area dell'invaso del Pertusillo

Nel periodo 2003-2010 la distribuzione annuale della sismicità nell'area dell'invaso del Pertusillo è irregolare.

In generale, il tasso di sismicità è maggiore nel periodo Marzo-Aprile, durante la fase finale di ricarica dell'invaso del Pertusillo.

Nel 2003, 2004, 2009 e 2010 il tasso di sismicità si riduce rapidamente una volta completata la ricarica dell'invaso (Maggio).

N.B. La riduzione della sismicità è evidenziata in figura dalle bande gialle sovrapposte alla curva del numero cumulato di terremoti (curva grigia).



Sismicità nell'area dell'invaso del Pertusillo

Variazione volume Invaso Pertusillo **Rete Temporanea** 21/02/2010 24/05/2 14/05/2007 07/05/2009 137.333.000 INGV 125.080.000 141.657 135 250 000 Nel 2007, la riduzione del tasso di 2.5 < M₁ < 2.9 sismicità avviene invece nella fase 140 di scarico dell'invaso. 120 (banda rossa sovrapposta alla curva del numero cumulato di E 100 (banda rossa sovrapposta alla *terremoti*) 80 09/10/2010 84.222.000 La sismicità è scarsa nel 2008 60 quando la ricarica dell'invaso è 40 stata parziale. 20 1/2007 07/11/2004 18/11/2005 16/12/2006 22/11/2008 16.327.000 32,257,000 57,136.000 53 440 000 78.167.000 0 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2007 2005 2006 2008 2009 2010 2011 si chiara osserva una Sismicità area Invaso Pertusillo 45 500 correlazione tra la magnitudo 40 massima dei terremoti e le fasi di 35 400 Number of events in 15 days dell'invaso scarico e 30 300 25 (terremoti con $2.5 < M_1 < 2.9$). 5 20 200 15 nulative 10 100 2005 2007 2001 2002 2003 2004 2006 2008 1998 1999 2000 2009 2010 2011 Time (Year)

carico

Cluster di Sismicità a nord-est del Bacino della Val d'Agri

- 40 terremoti ben localizzati nel periodo 2-11 Giugno 2006 (fine esperimento).

Errori di localizzazione ipocentrale (formale):
<100 m orizzontale, < 200 m verticale.

- Terremoti di magnitudo molto bassa (0.3<M_L<1.7), la maggior parte con M_L<1.
- Cluster con sviluppo verticale tra 3.2 e 5.3 km di profondità, in regione ad alta Vp ed alto Vp/Vs.



Istogramma degli errori di localizzazione per i 40 terremoti e distribuzione della magnitudo





Cluster di Sismicità a nord-est della Val d'Agri

Il cluster di microterremoti è molto vicino al pozzo Costamolina 2:

- distanza minima orizzontale epicentro-pozzo: 250 m
- distanza massima orizzontale epicentro-pozzo: 1200 m



Cluster di Sismicità a nord-est della Val d'Agri

Pozzo Costamolina 2:

- Calcari Apuli attraversati da 2855 a 3090 m di profondità (fondo pozzo).

- Pozzo di re-iniezione di acqua petrolifera di produzione.

Terremoti localizzati in un alto strutturale della Piattaforma Apula (alta Vp ed alto Vp/Vs = calcari saturi di H_2O in sovrapressione).

La distanza minima ipocentri-fondo pozzo è 800 m.

In base alla distribuzione spazio-temporale dei terremoti, ed alla geologia, il cluster può essere interpretato come micro-sismicità indotta dalla re-iniezione nel pozzo Costamolina 2.



Conclusioni

1. La densa rete sismica temporanea operante in Val d'Agri tra il 2005 e 2006 ha registrato una intensa microsismicità concentrata nel settore meridionale della regione.

Questa attività è indotta dalle oscillazioni stagionali dell'invaso del Pertusillo. Questa interpretazione è coerente con la distribuzione temporale della sismicità registrata nel 2003-2010.

2. La microsismicità registrata sul fianco orientale dei Monti della Maddalena supporta l'interpretazione della Faglia di Monte Aquila in termini di struttura attiva con elevato potenziale sismogenetico (M_w =6.0-6.3).

3. Il cluster localizzato a nord-est della Val d'Agri può essere correlato con l'attività di reiniezione del pozzo Costamolina 2.

Per dare una risposta definitiva sulla natura del cluster sono necessari:

- dati sui tempi e modalità (i.e. profondità, volumi, pressioni) della re-iniezione nel pozzo durante l'esperimento sismico.

- serie temporali più lunghe (nuovi dati sismici nell'area).

Conclusioni

4. Reti sismiche dense, unite a procedure automatiche di analisi di registrazioni sismiche in tempo quasi-reale (Valoroso et al., JGR, 2013), sono i presupposti necessari per lo studio ed il monitoraggio di dettaglio della sismicità di fondo di origine naturale e/o indotta da attività antropica.



Il materiale presentato è estratto dai seguenti articoli scientifici pubblicati su riviste internazionali peer-review:

L. Valoroso, L. Improta, L. Chiaraluce, R. Di Stefano, L. Ferranti, A. Govoni, C. Chiarabba (2009) – *Active faults and induced seismicity in the Val d'Agri area (Southern Apennines, Italy),* Geophysical Journal International, 178, 488-502, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04166.x.

L. Improta, L. Ferranti, P. M. De Martini, S. Piscitelli, P. P. Bruno, P. Burrato, R. Civico, A. Giocoli, M. Iorio, G. D'Addezio, L. Maschio (2010) - *Detecting young, slow-slipping active faults by geologic and multidisciplinary high-resolution geophysical investigations: a case study from the Apennine seismic belt, Italy*, J. Geophys. Res., VOL. 115, B11307, doi:10.1029/2010JB000871, 2010.

L. Valoroso, L. Improta, P. De Gori, and C. Chiarabba (2011) - *Upper crustal structure, seismicity and pore pressure variations in an extensional seismic belt through 3D and 4D Vp and Vp/Vs models: the example of the Val d'Agri area (Southern Italy), J. Geophys. Res., 116, B07303, doi:10.1029/2010JB007661.*

GRAZIE PER L'ATTENZIONE