SISMICITÀ NATURALE E INDOTTA A "THE GEYSERS", CALIFORNIA: PROPRIETÀ DELLA FRATTURAZIONE E PERICOLOSITÀ SISMICA

Aldo Zollo (1), Nitin Sharma(1), Vincenzo Convertito(2) , Antonio Emolo(1)

(1) Dipartimento di Fisica, Università di Napoli Federico II

(2) Osservatorio Vesuviano, INGV

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II

Sommario

- Introduzione sulla Sismicità Indotta
- L'Area Geotermica «The Geysers» in California, USA
- Localizzazione dei Terremoti e Tomografia 3-D
- Variazioni Spaziali delle Proprietà del Mezzo e della Sorgente
- Analisi e Monitoraggio della Pericolosità Sismica in Funzione del Tempo
- Conclusioni

Iniezione/Estrazione di fluidi: Meccanismi di generazione della sismicità indotta

- Le operazioni di iniezione ed estrazione di fluidi dal sottosuolo perturbano i naturali campi di sforzo nella crosta terrestre e provocano fratture nelle rocce che possono evolversi in terremoti.
- I meccanismi responsabili della sismicità indotta sono dunque due:

Iniezione di Fluidi

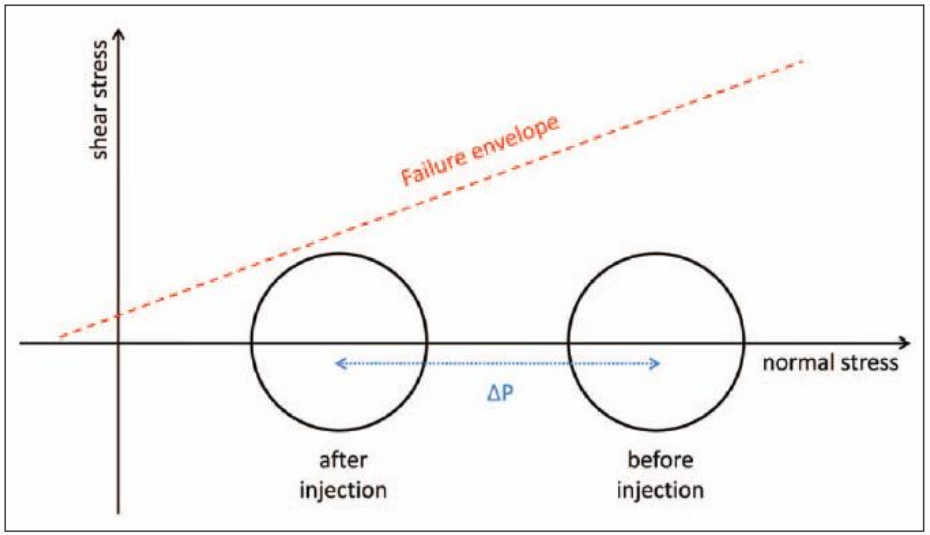
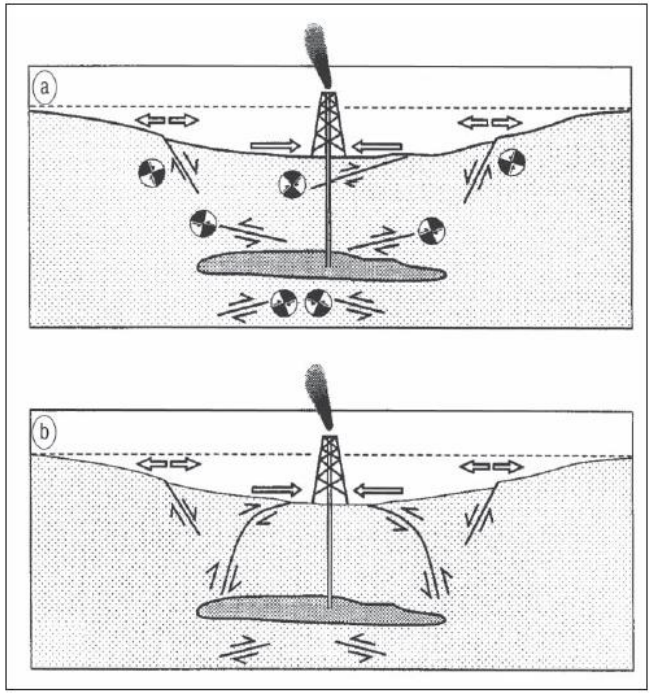
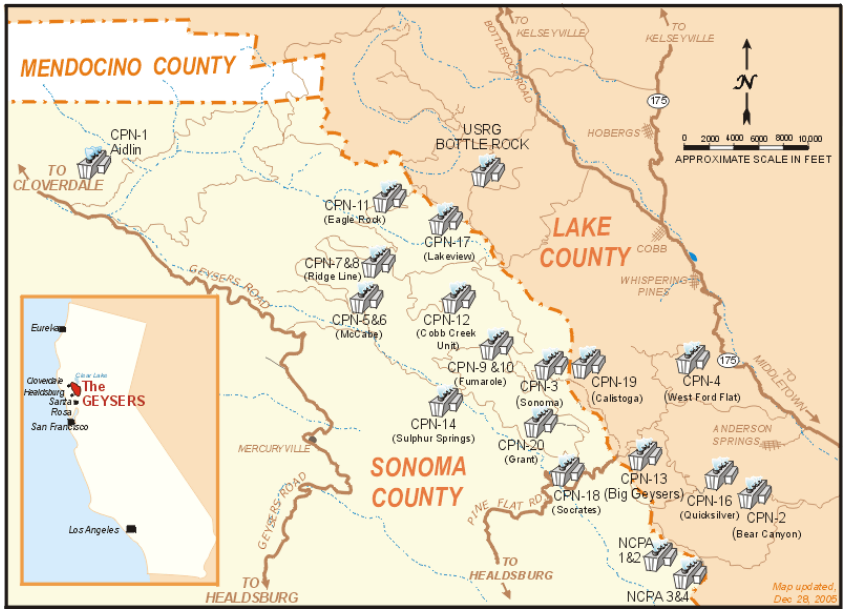


Figure 3. Mohr-Coulomb diagram illustrating how fluid injection lowers the normal stress and thereby brings rock closer to failure.

Estrazione di Fluidi



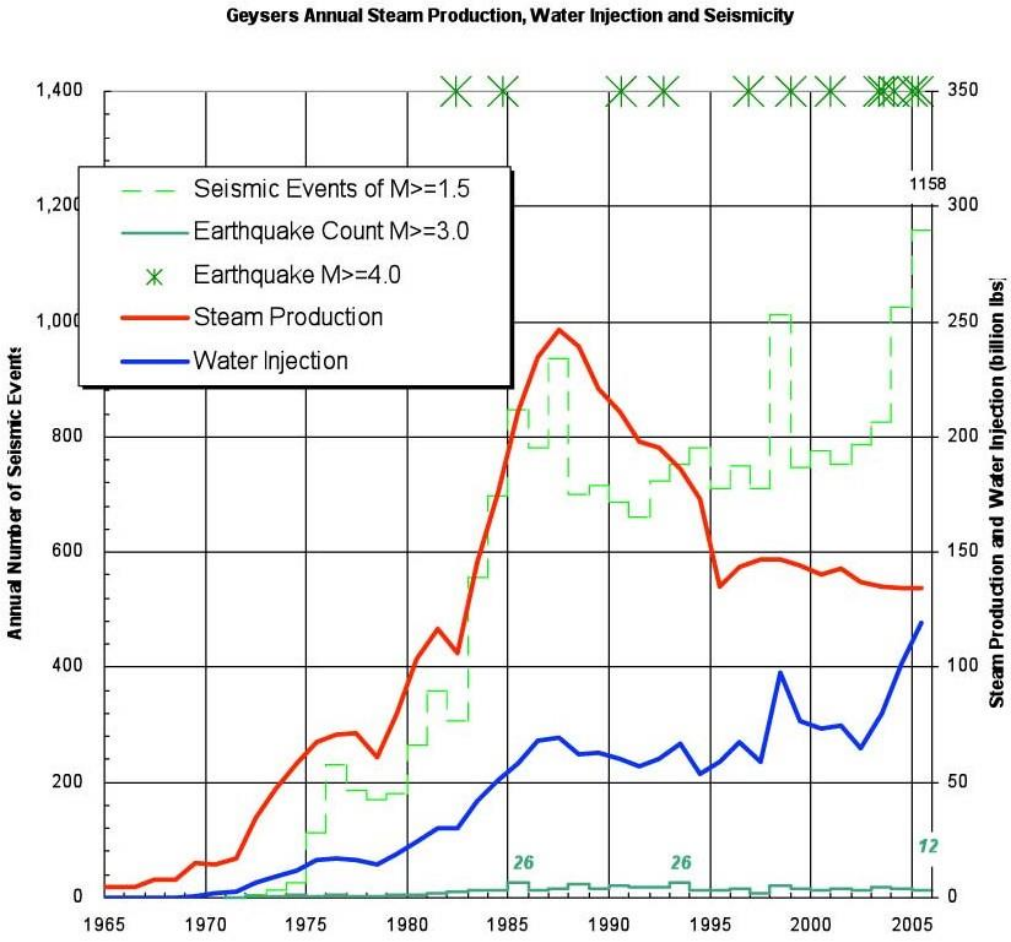
L' Area Geotermica «The Geysers»



- The Geysers è la più grande e produttiva area geotermica nel mondo e la sismicità viene monitorata fin dagli anni '60.
- La potenza elettrica prodotta è di 1.58GW, equivalente ad una centrale nucleare di media grandezza.

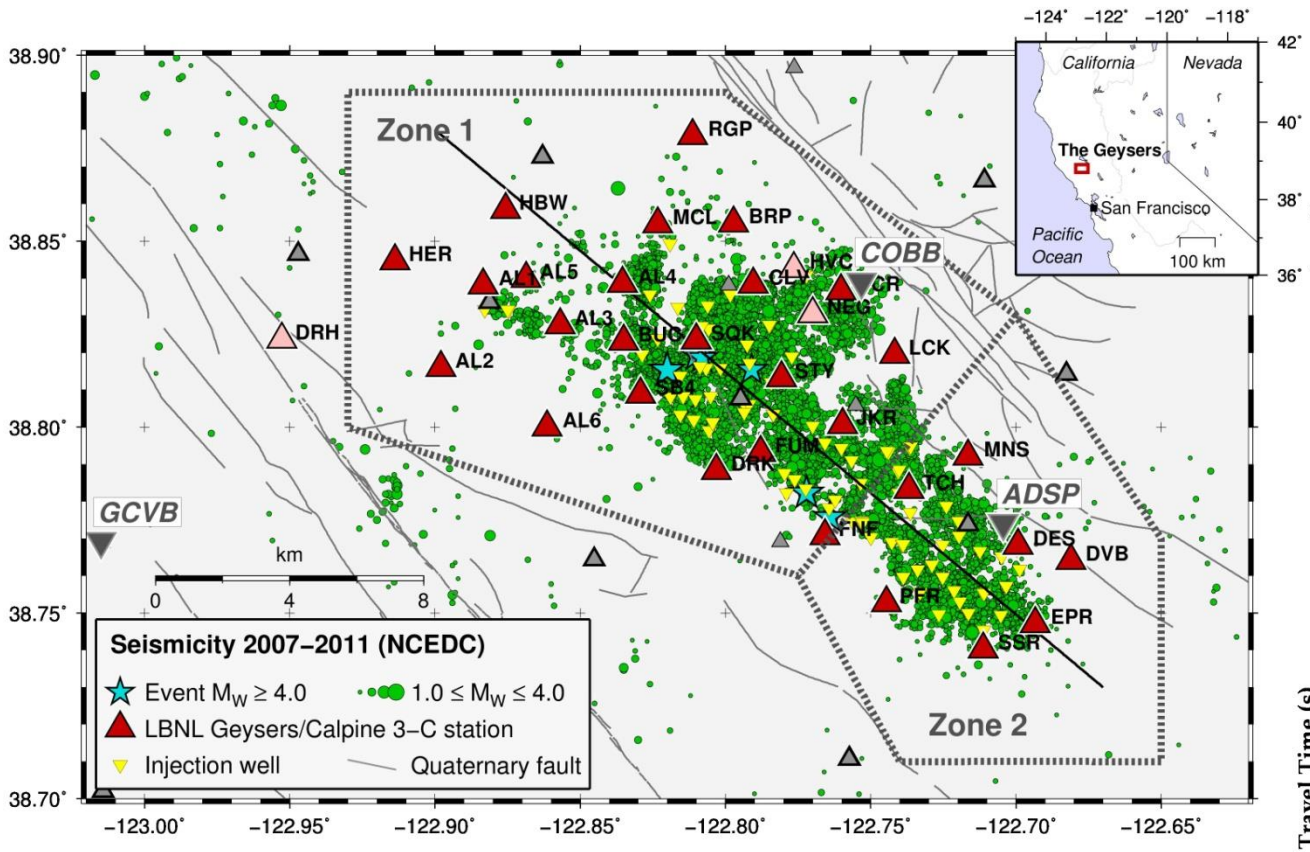
- Pochi studi disponibili in letteratura su quest'area.
- Qualsiasi studio fatto in quest'area può essere applicato a qualsiasi altra area geotermica nel mondo, le quasi acquistano ora popolarità per la promessa di energia pulita.

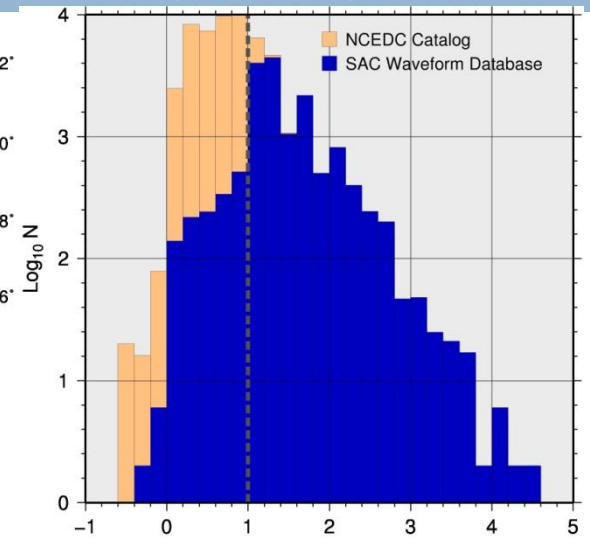
Attività industriale e micro-sismicità nell' area The Geysers

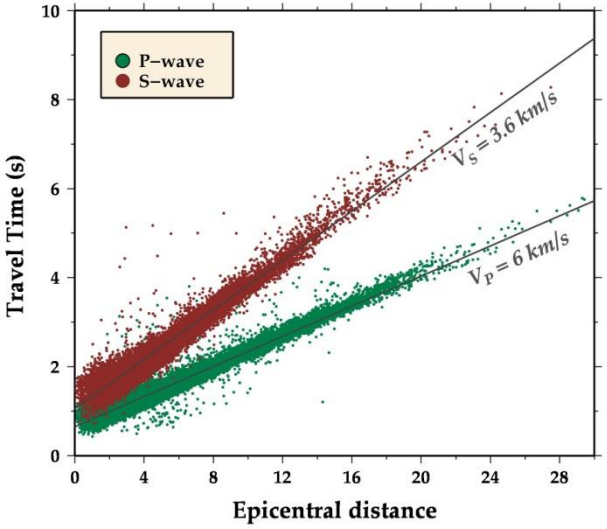


Majer et al., 2007

Mappa della Sismicità







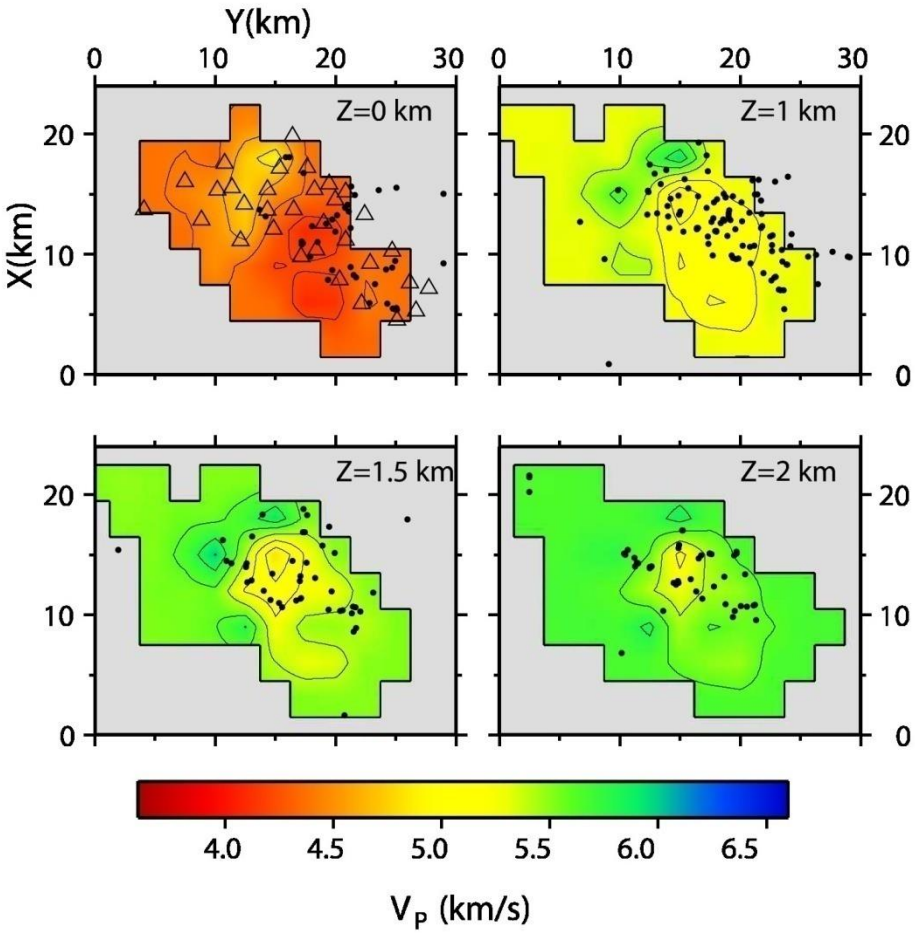
15476 eventi registrati alle stazioni BG, di cui 7 eventi con Mw ≥ 4.0 in 5 anni.

Tomografia 3-D e Localizzazione dei Terremoti

Modello di Velocità 3D P ed S

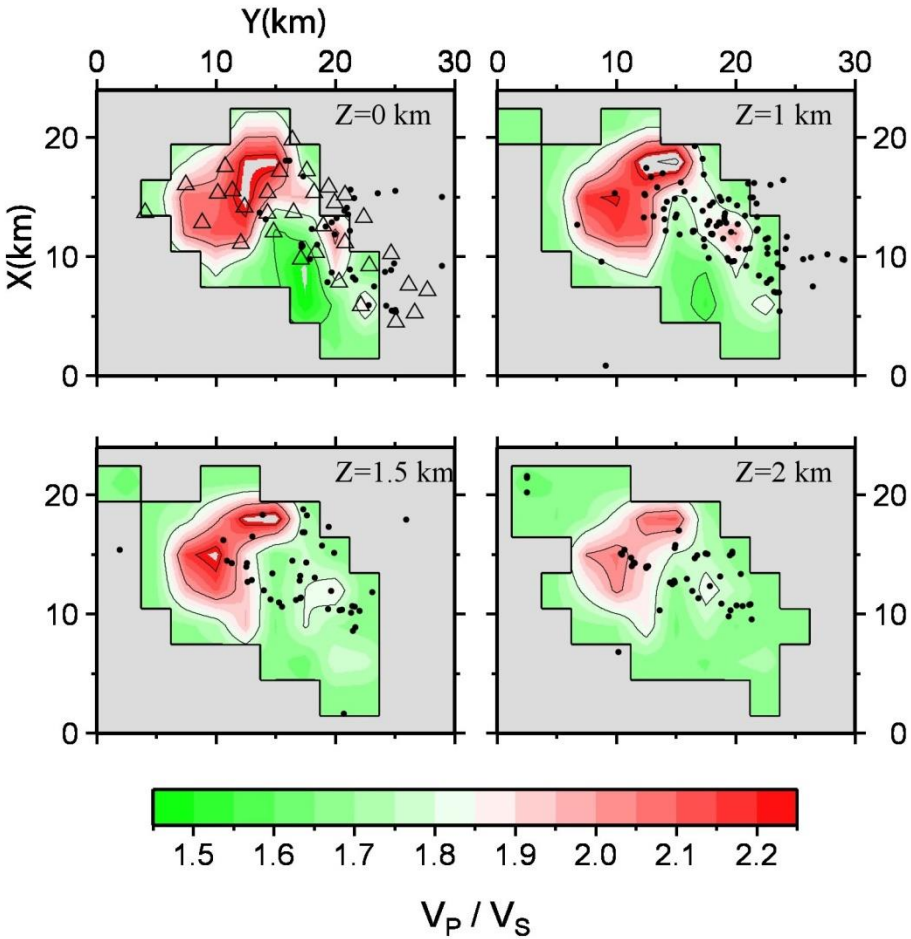
- Il miglior modello 1D (VELEST) e il Vp/Vs (Wadati) sono serviti come modello iniziale per la tomografia sismica 3D.
- E' stata usata la tecnica delle differenze finite per il calcolo dei tempi, fronti e raggi e l'inversione congiunta dei tempi P ed S.
- Il modello è parametrizzato da una rappresentazione nodale, descritta da una griglia tridimensionale con spaziatura di $3 \times 3 \times 1$ km^3 .

Modello di Velocità P 3D



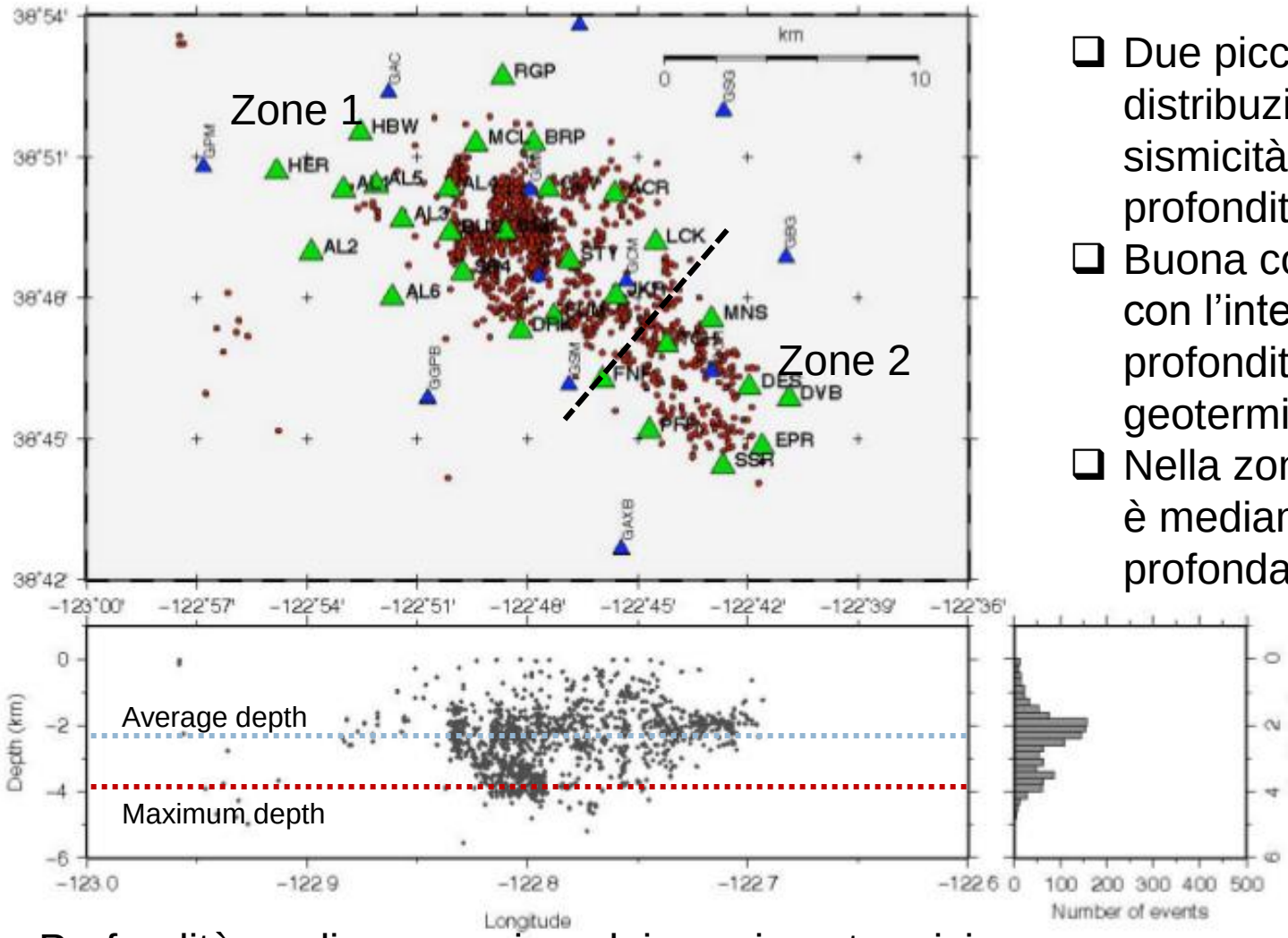
- Modello di velocità P per sezioni orizzontali corrispondenti a differenti profondità (0, 1.0, 1.5, 2.0 km).
- Si nota una forte variazione laterale lungo la direzione NW-SE, con valori di velocità P mediamente più alti nel settore nord-occidentale (Zone1)
- Questa variazione laterale potrebbe indicare una maggiore presenza di acqua rispetto a vapore nello stesso settore (Stark, 2003)

Variazioni di Vp/Vs



- Mappa del rapporto Vp/Vs per le stesse profondità mostrate per il modello di velocità P.
- un'anomalia rilevante di alto Vp/Vs nell'area NO (Zona 1) che si estende verso il basso per 3-4 km di profondità ed è caratterizzata da valori maggiori di 2.
- L'anomalia osservata può essere associata con un volume di roccia densamente fratturato e fortemente saturo in fluidi allo stato liquido.

Ri-Localizzazione dei Terremoti



- Due picchi nella distribuzione della sismicità con la profondità
- Buona corrispondenza con l'intervallo di profondità dei pozzi geotermici
- Nella zona 1 la sismicità è mediamente più profonda

Profondità media e massima dei pozzi geotermici

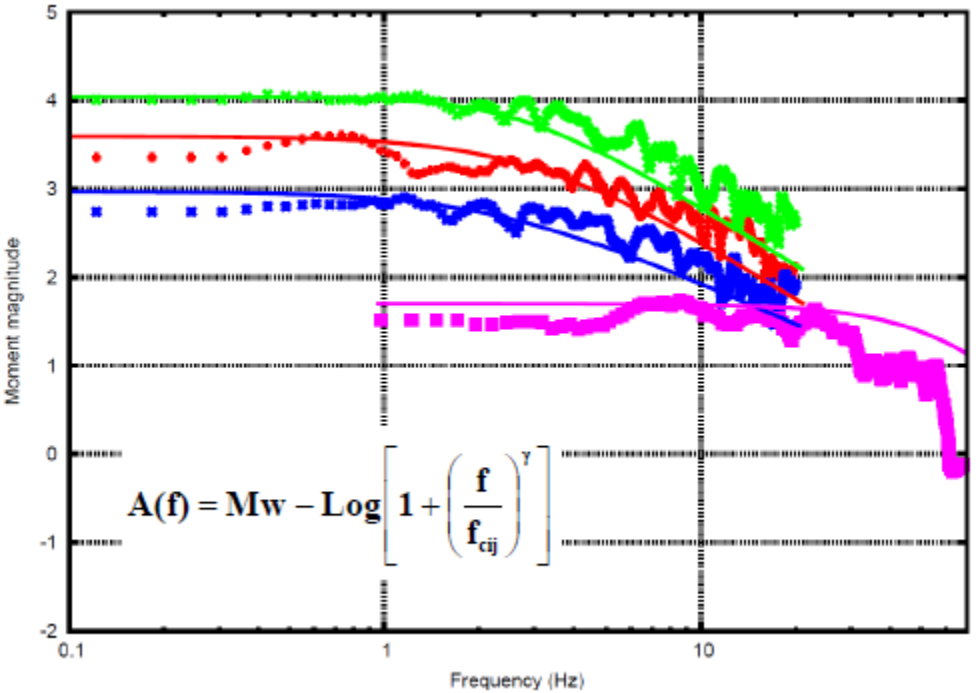
Proprietà delle sorgenti sismiche

Analisi Spettrale e Attenuazione Anelastica

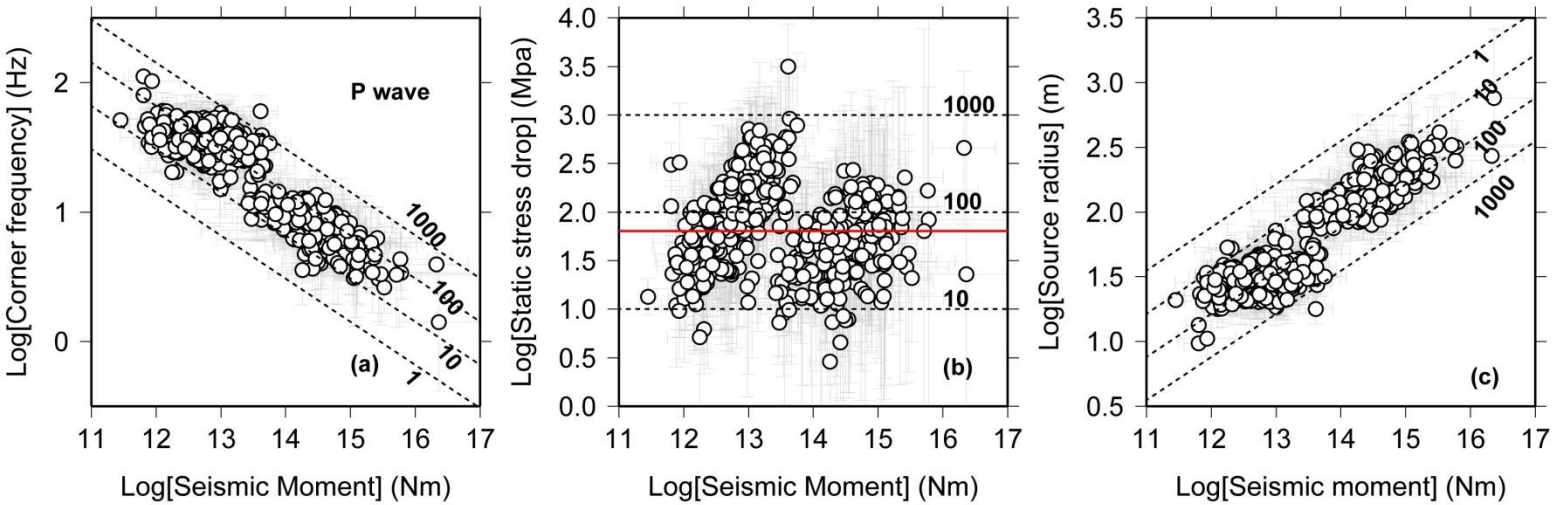
- Modello spettrale 4-parametri (Boatwright,1980)

$$U(\omega) = C_S \frac{\Omega_o}{1 + (\frac{\omega}{\omega_c})^{\gamma}} e^{-\frac{\omega t^*}{2}}$$

- Inversione non-lineare degli spettri in spostamento delle onde P, con una tecnica iterativa, multi-step .
- Il <t*> stimato è (0.029s ± 0.012s).

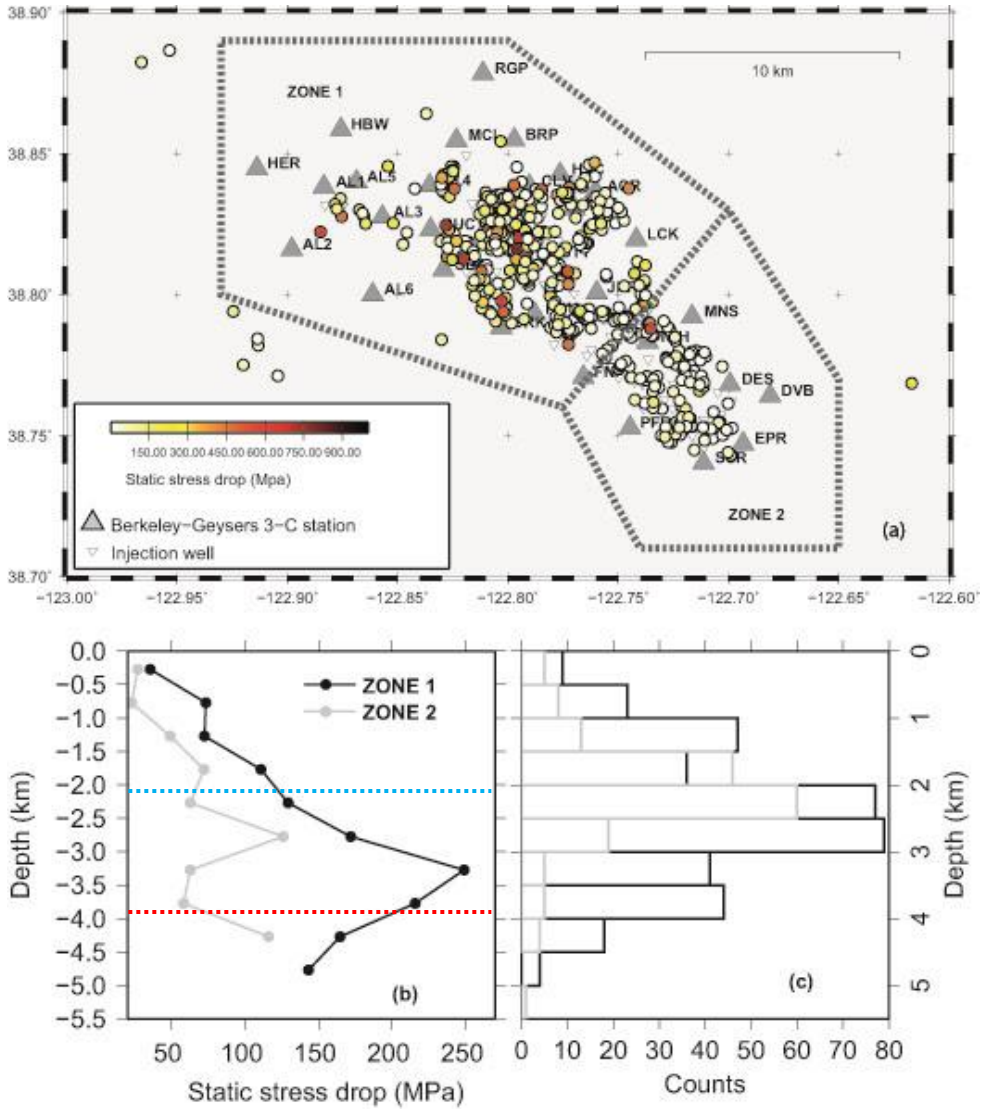


Legge di scala dei parametri di sorgente



- 2400 eventi con magnitudo compresa tra 0.7 e 4.5 (Mo da 2.8×10^{11} Nm a 2.3×10^{13} Nm).
- Il raggio sorgente è stato stimato dalla frequenza d'angolo assumendo il modello di Madariaga(1976).
- Legge di scala auto-similare con stress drop costante su 4 ordini di grandezza.
- Valori di stress-drop 3-4 volte maggiori dei valori comunemente misurati

Stress drop a The Geysers



Osservazioni

- In ZONE 1 i valori più alti di stress drop (media 10 Mpa).
- Lo stress drop cresce con la profondità in entrambe le zone, con un picco nella zona alla base dei pozzi geotermici.

Possibili interpretazioni

- Iniezione di fluidi induce la fratturazione di rocce intatte (alto stress iniziale)
- La presenza di fluidi ed alte temperature accelera la cicatrizzazione delle fratture mediante processi di alterazione geochimica delle rocce (alto stress iniziale)
- I fluidi lubrificano fratture pre-esistenti (basso livello di attrito)

Analisi della Pericolosità Sismica al Variare del Tempo

Pericolosità Sismica in funzione del Tempo

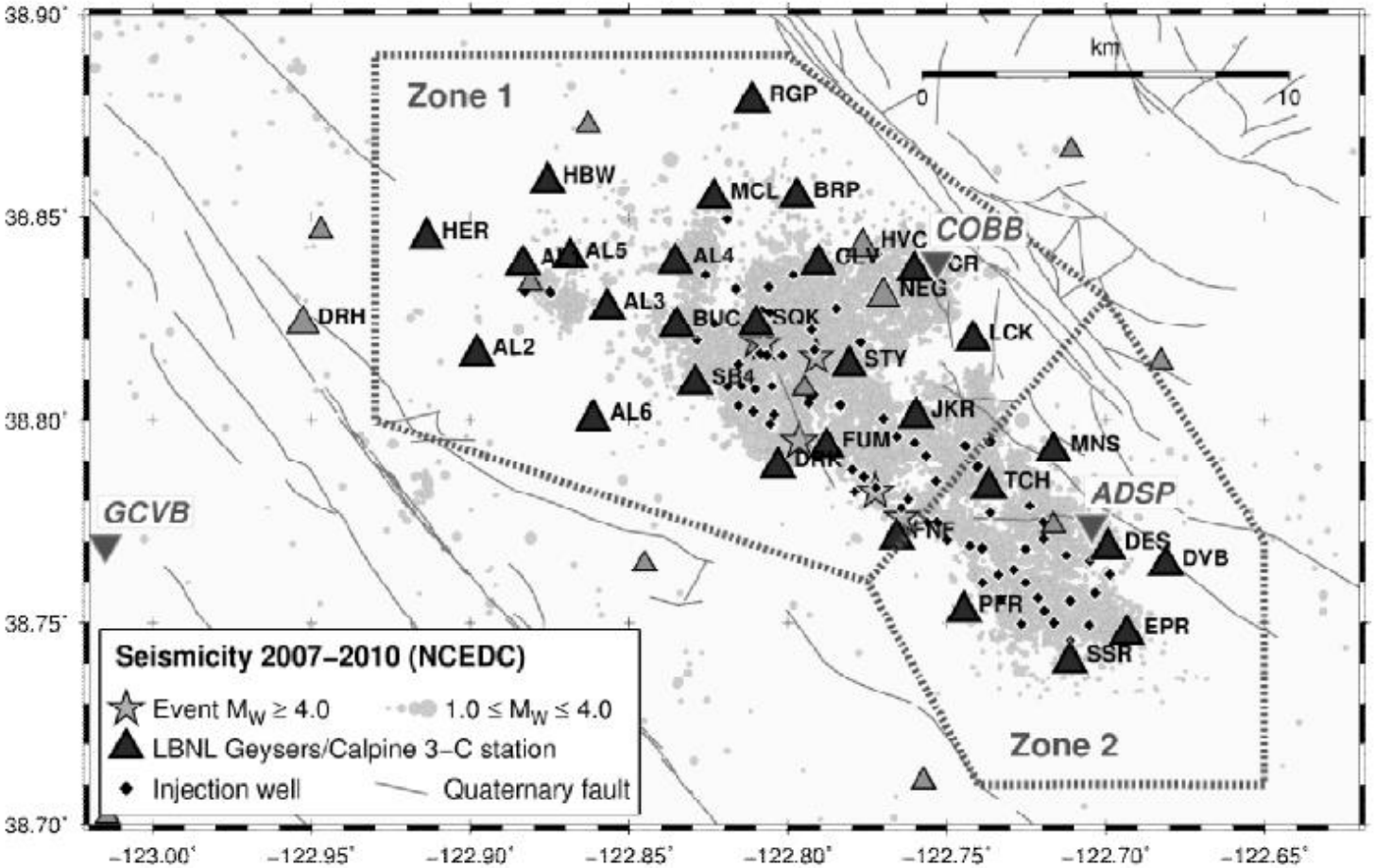
- Probabilità di superamento di un livello di PGA (accelerazione di picco) in un futuro intervallo di tempo di tempo t (integrale di hazard).

Dipende da:
- Tasso di sismicità
- Localizzazione dei terremoti
- Distribuzione in magnitudo degli eventi (legge di Gutenberg-Richter)
- Legge di attenuazione

L'attività di iniezione/estrazione di fluidi modifica le caratteristiche del mezzo e le proprietà di occorrenza dei terremoti → stima della pericolosità in funzione del tempo come strumento di monitoraggio e controllo

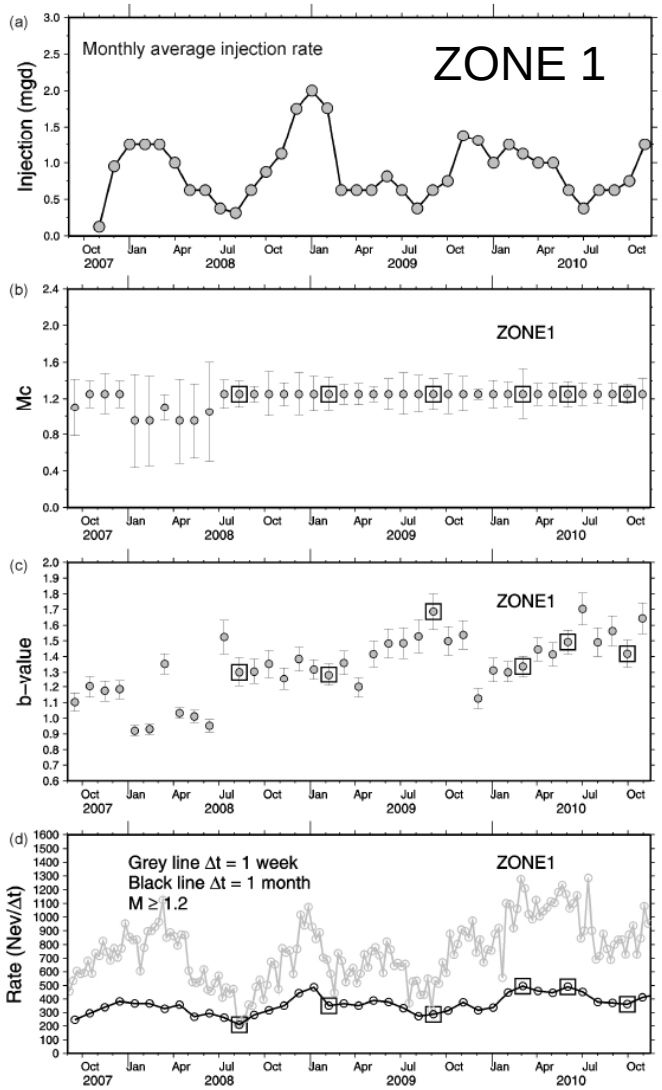
From Induced Seismicity to Direct Time-Dependent Seismic Hazard
V.Convertito, N.Sharma, N.Maercklin and A. Zollo
Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 102, issue 6, pp. 2563-2573

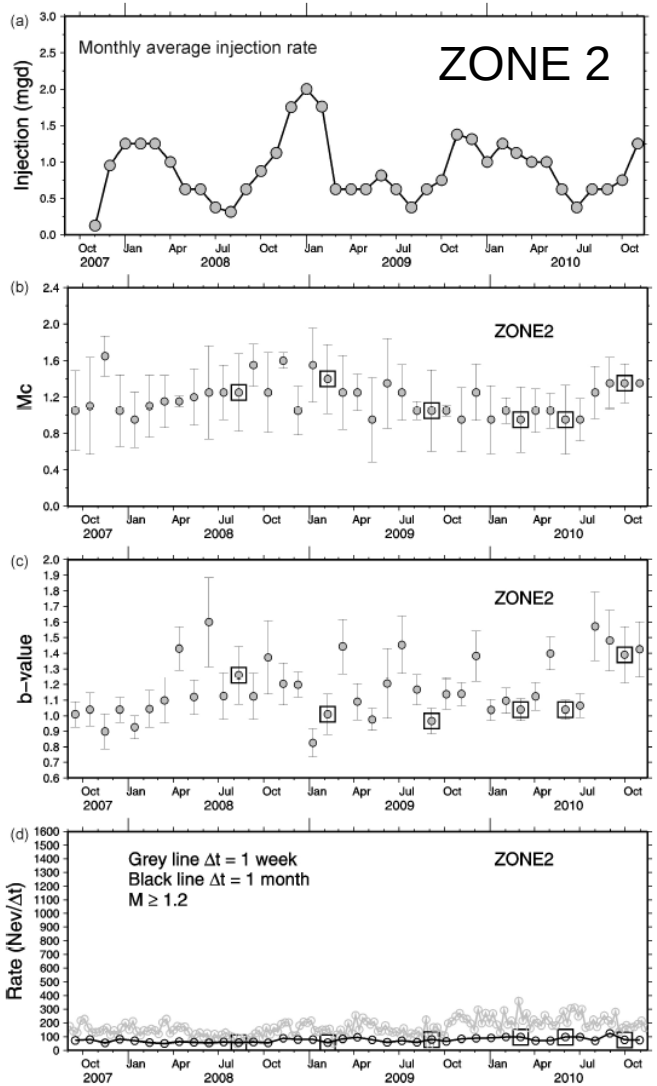
Analisi della Pericolosità Sismica al Variare del Tempo nell' area The Geysers



Mappa della sismicità dell'area

Tassi di iniezione e sismicità nel tempo

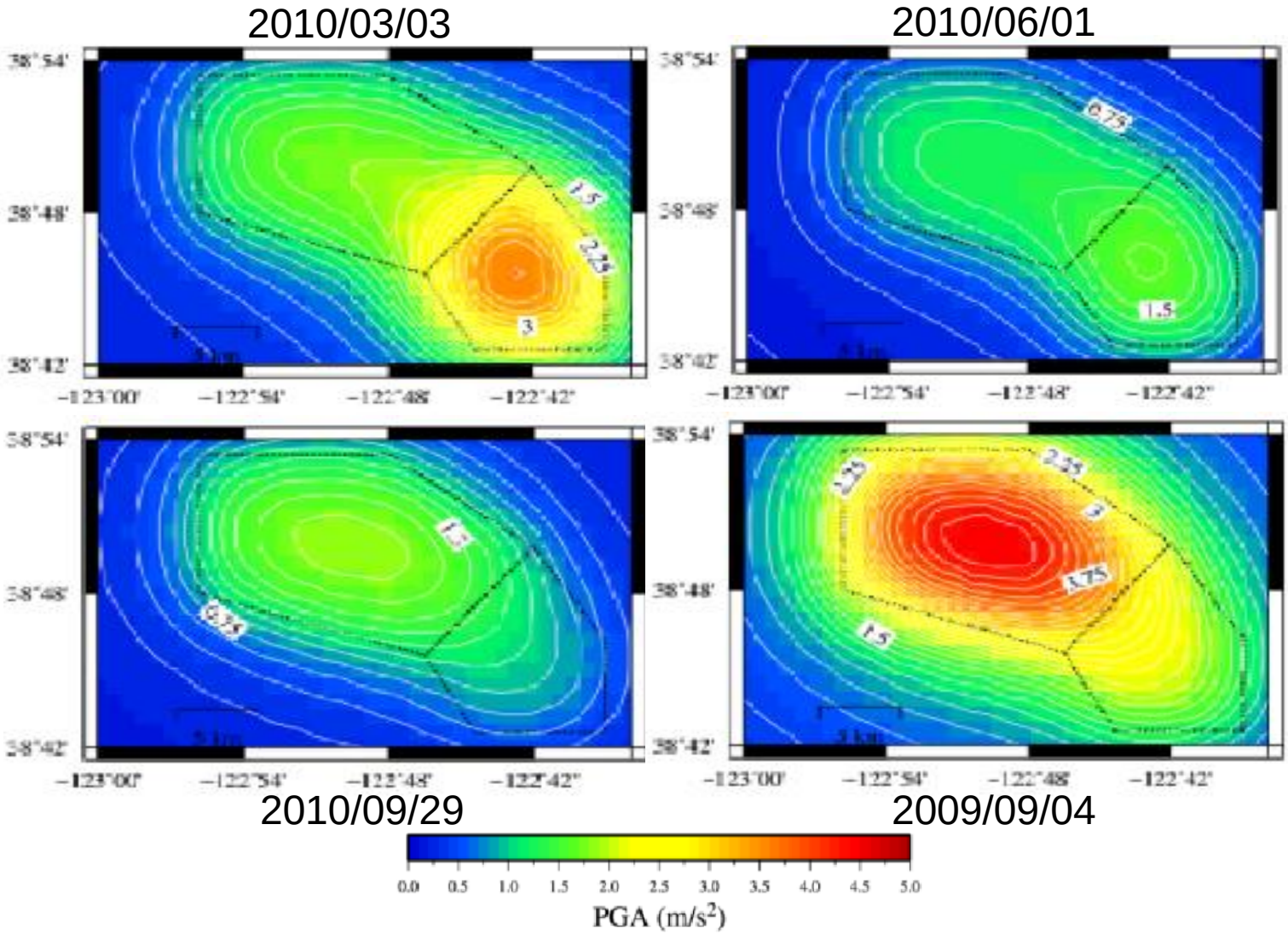




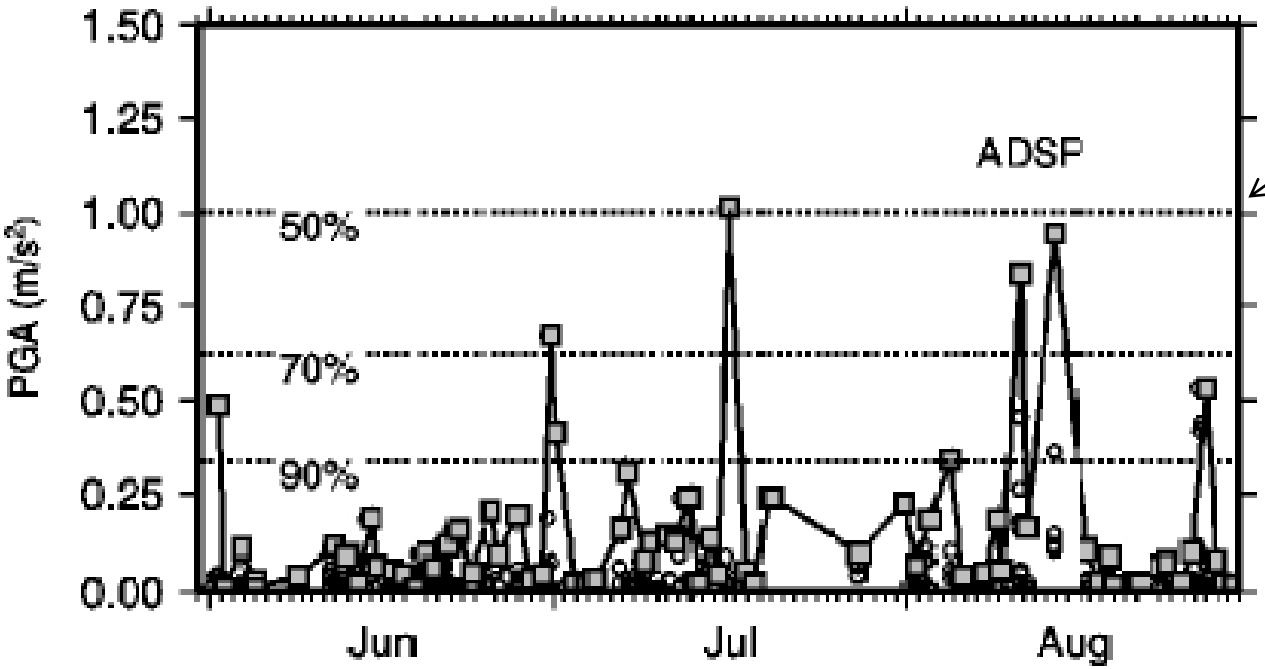
Mappe di Pericolosità: Variazioni Spazio-Tempo

Accelerazione di picco con probabilità del 30% di essere superata nei due mesi successivi.

Si osservano significative variazioni nel tempo del livello di accerelazione massima attesa



Analisi e Monitoraggio della Pericolosità ad un Sito Specifico



Probabilità (50%)
che PGA < 1m/s^2
nei prossimi 2 mesi

2009

Analisi di pericolosità in funzione del tempo:
confronto della PGA osservata con i livelli di accelerazione attesa con una determinata probabilità per un periodo di due mesi

Conclusioni

- Suddivisione dell'area geotermica Geysers in due distinte zone con le due aree che mostrano un comportamento meccanico e sismico differenziato → effetto dell'iniezione/estrazione dei fluidi
- Le proprietà elastiche/anelastiche del mezzo e la distribuzione della sismicità sono controllate e modificate dall'iniezione/estrazione dei fluidi. L'elevato stress drop è un indicatore della maggiore presenza di acqua nella zona 1.
- La pericolosità sismica non è costante nel tempo e nello spazio e la sua stima evolutiva può essere utilizzata per monitorare e controllare le operazioni di estrazione/iniezione nell'area geotermica.

Fine