



# *Site effect and seismic microzonation: the experience of INGV in the framework of FIRB-Abruzzo Project*

*Giuliano Milana*

INGV, Sezione Sismologia e Tettonofisica  
Via di Vigna Murata 605,  
00144 Roma  
Email: [giuliano.milana@ingv.it](mailto:giuliano.milana@ingv.it)



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia  
**PROGETTO ABRUZZO**  
SISMOTETTONICA PERICOLOSITÀ RISCHIO SISMICO



# Microzonazione sismica Regione Abruzzo

Documento tecnico per l'elaborazione  
di indagini e studi di microzonazione sismica  
di cui alla O.P.C.M. n 3907 del 13 novembre 2010

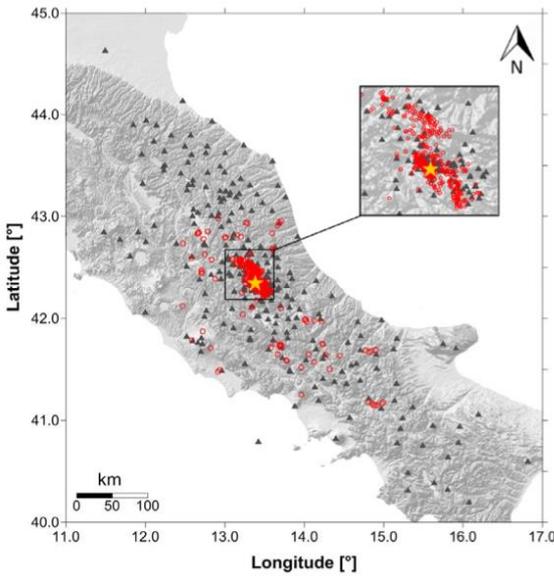
“Inoltre al fine di garantire uniformità e confrontabilità ai risultati prodotti dagli studi di MZS e, allo stesso tempo, fornire ai “Soggetti realizzatori” un adeguato supporto tecnico-scientifico cui poter fare riferimento, soprattutto in situazioni e valutazioni complesse, la Regione Abruzzo potrà costituire un *Tavolo tecnico regionale di monitoraggio degli studi di microzonazione sismica*, composto da rappresentanti regionali esperti in materia e soggetti esterni appartenenti a Istituti Universitari, Centri di ricerca e all'Ordine dei geologi.”

## Partecipazione al Tavolo tecnico regionale per la microzonazione sismica

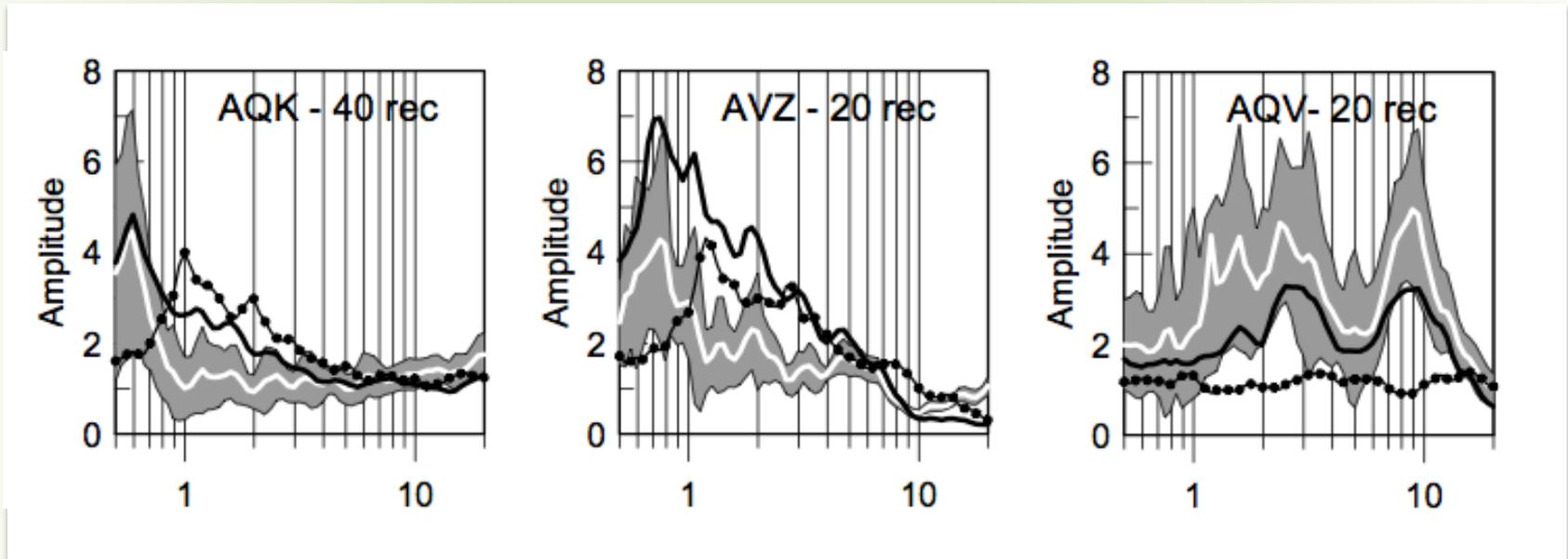
- Verifica della cartografia geologica;
- Verifica e validazione delle indagini di rumore ambientale;
- Verifica delle indagini geofisiche disponibili;
- Verifica della presenza di faglie attive e capaci nelle aree investigate;
- Identificazione di situazioni complesse che richiederebbero approfondimenti (es. Trasacco, Magliano dei Marsi, San Benedetto in Perillis, Fossa, Capestrano).

- Valutazione dei fattori di amplificazione da tecniche di inversione generalizzata; 
- Caratterizzazione Bacini profondi; 
- Amplificazione sismica su siti in Roccia; 
- Studio Faglie attive e capaci; 
- Studio delle Cavità; 
- Analisi di Liquefazione; 
- Instabilità di pendio 

# Inversione Generalizzata (GIT)

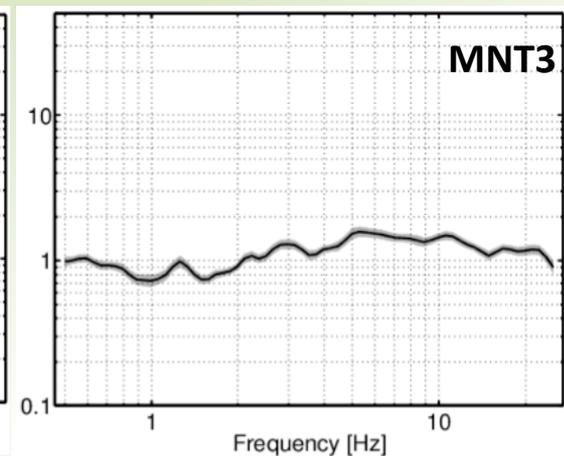
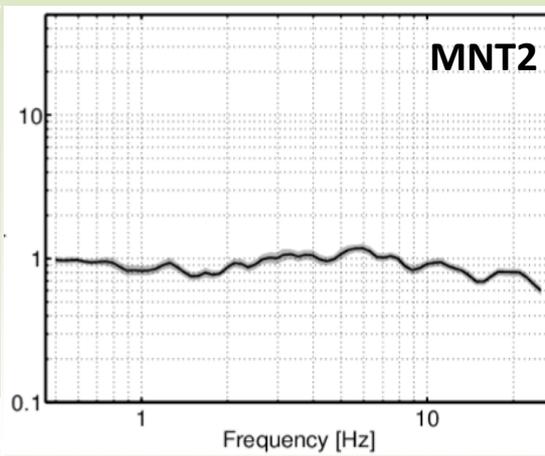
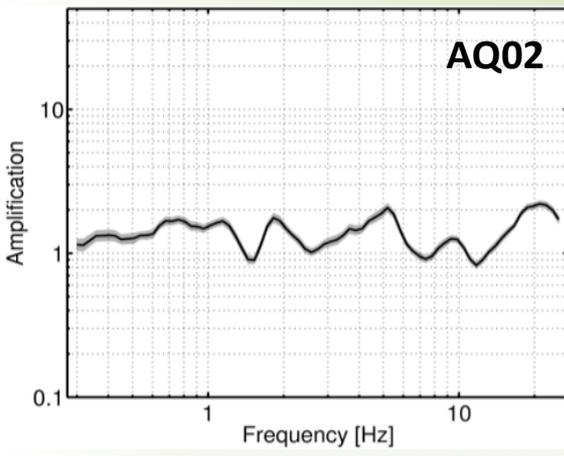
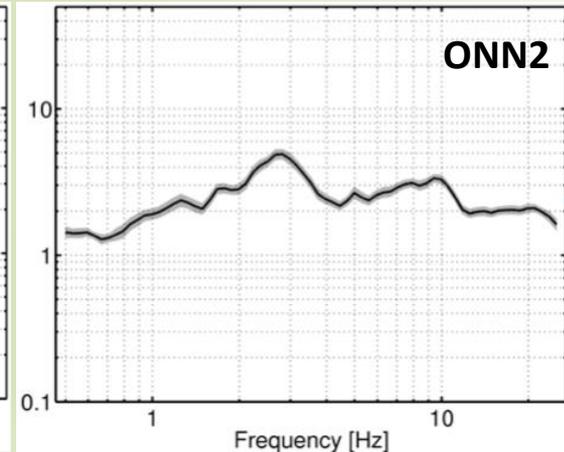
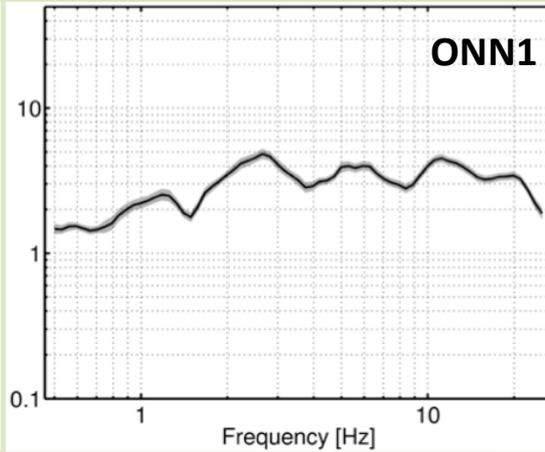
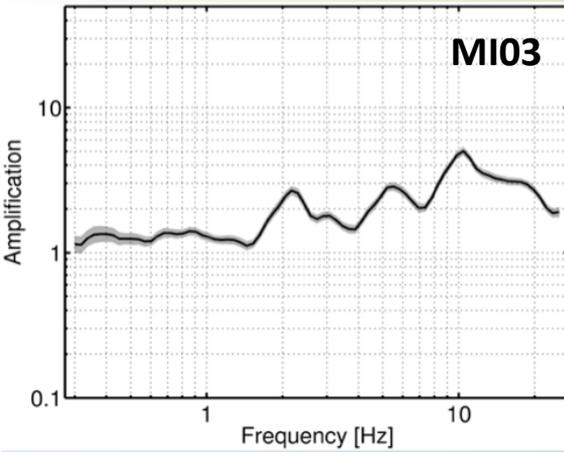
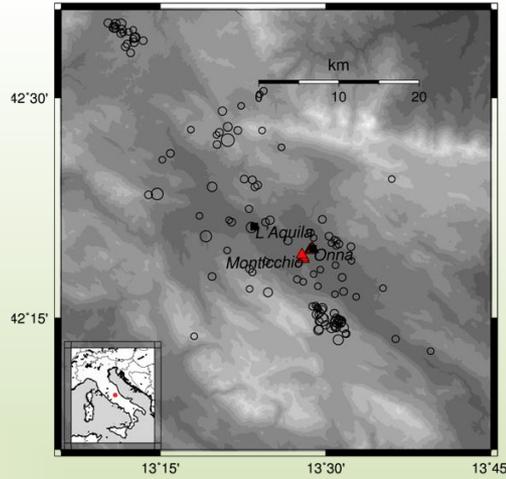
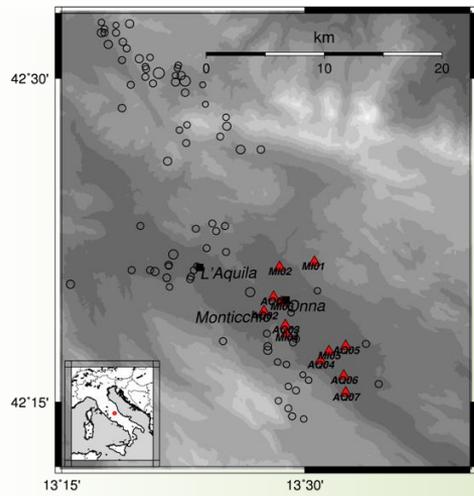


La grande mole di dati sismologici raccolta anche durante la sequenza aquilana ha consentito di applicare tecniche di inversione generalizzata a scala regionale per determinare i parametri di sorgente degli eventi, stimare il fattore di attenuazione, e valutare gli effetti di amplificazione alle singole stazioni.

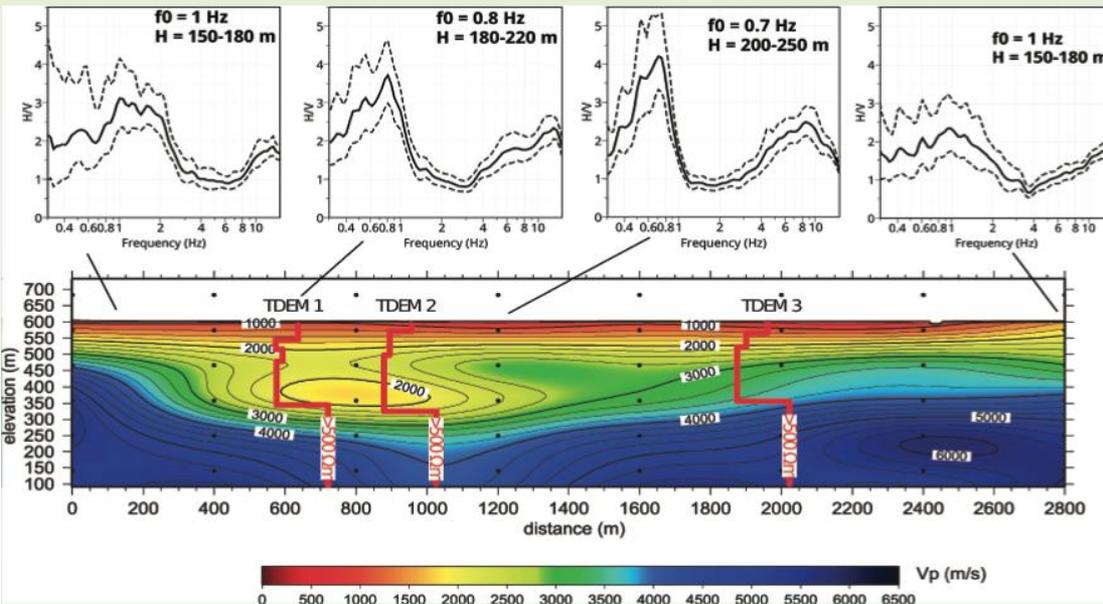
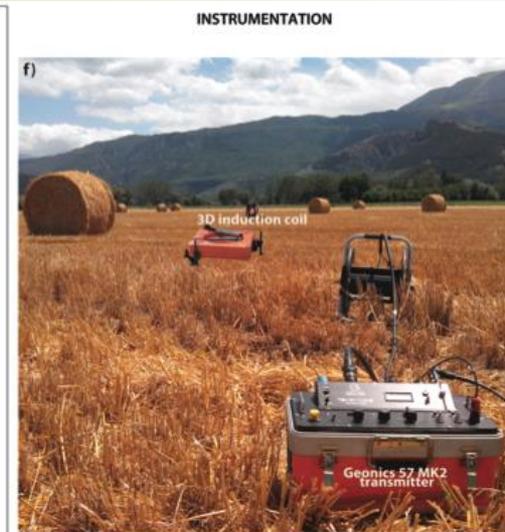
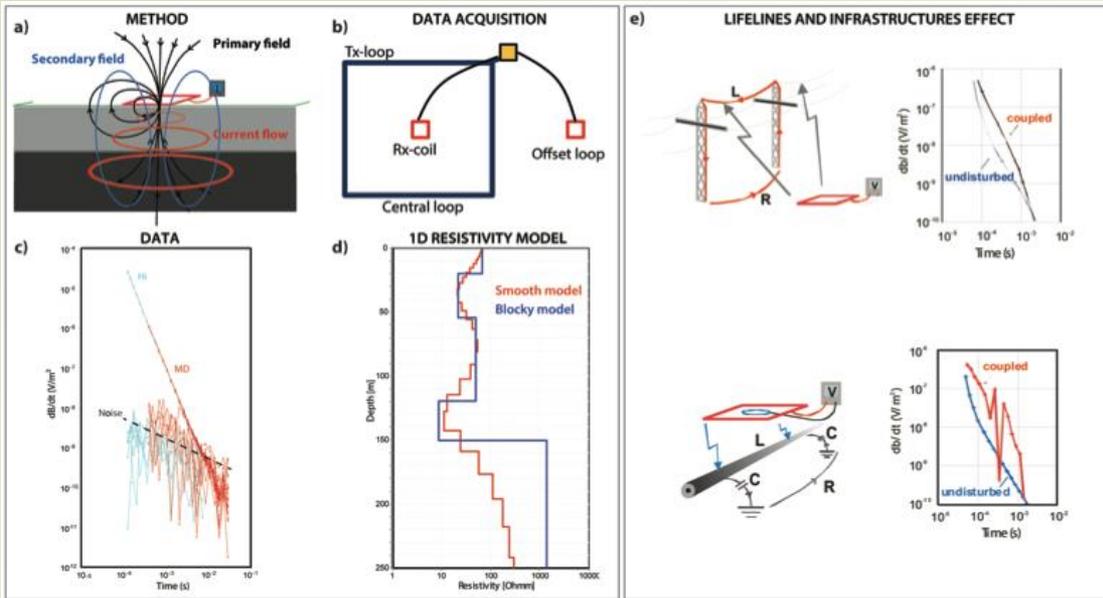


Confronto tra i fattori di amplificazione ricavati dal GIT (curve nere) ed i rapporti spettrali H/V calcolati sugli eventi sismici

L'utilizzo di stazioni mobili installate per la valutazione degli effetti locali ha anche consentito di applicare la tecnica GIT a data set relativi a situazioni particolari, come nel caso del confronto Onna – Monticchio.

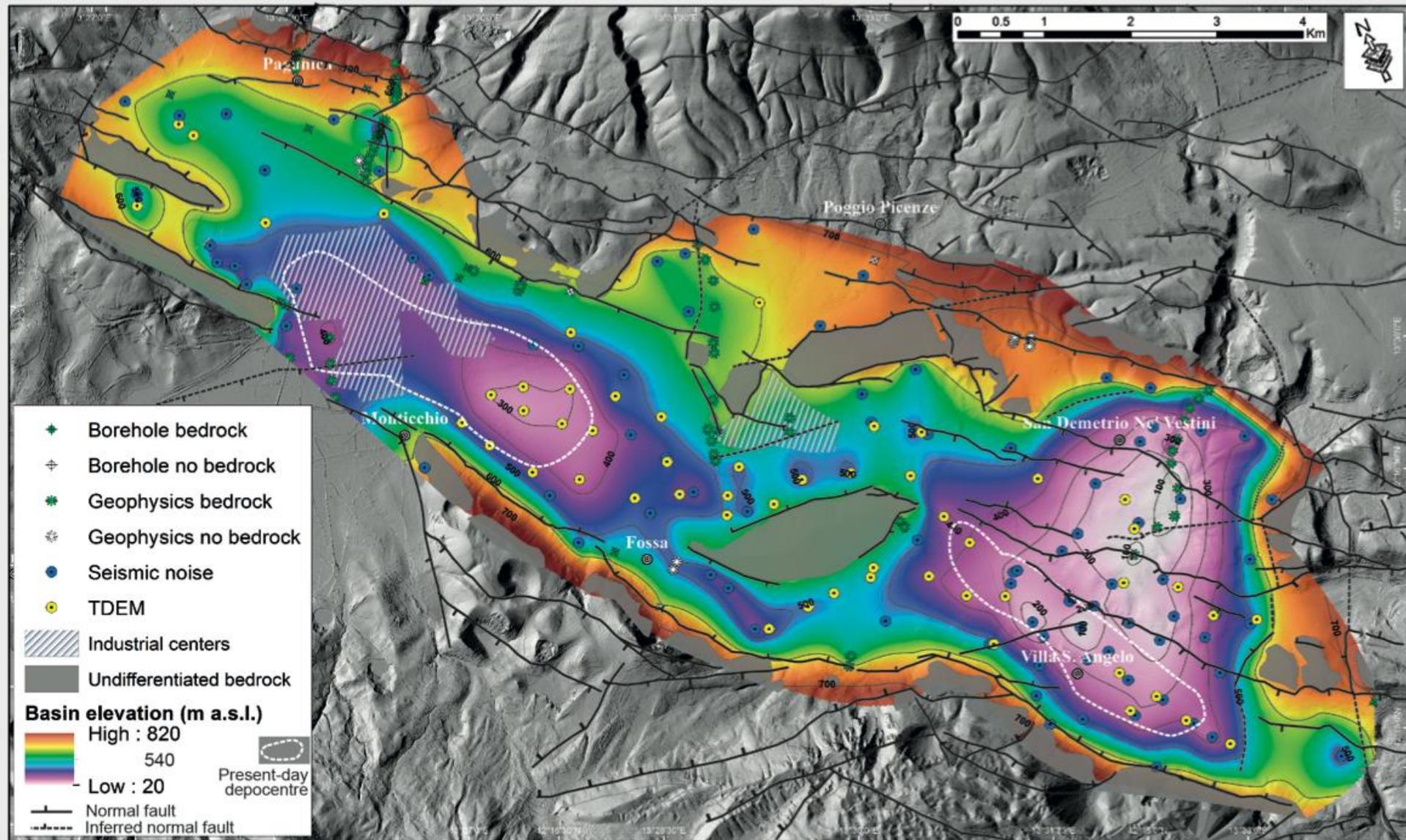


# Caratterizzazione di Bacini Profondi, l'esempio della Valle dell'Aterno



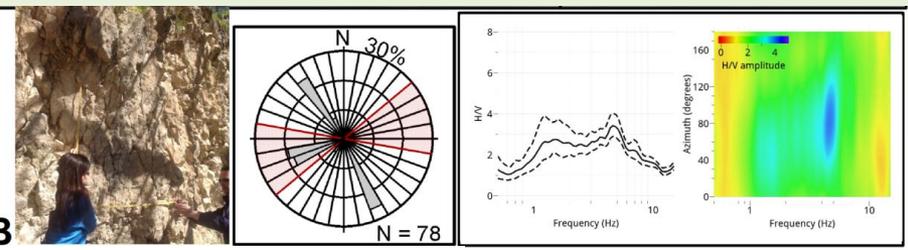
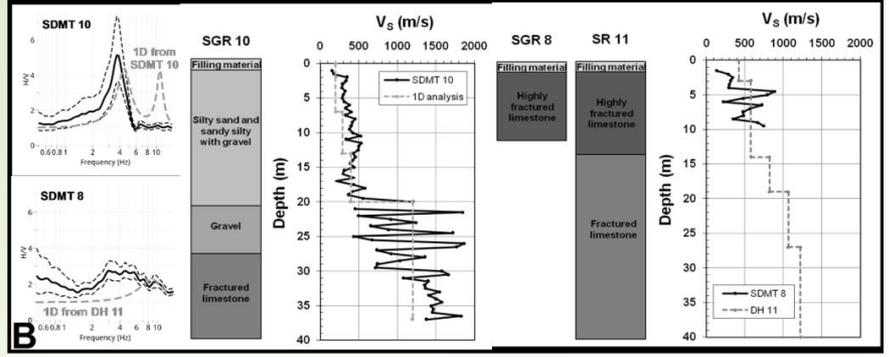
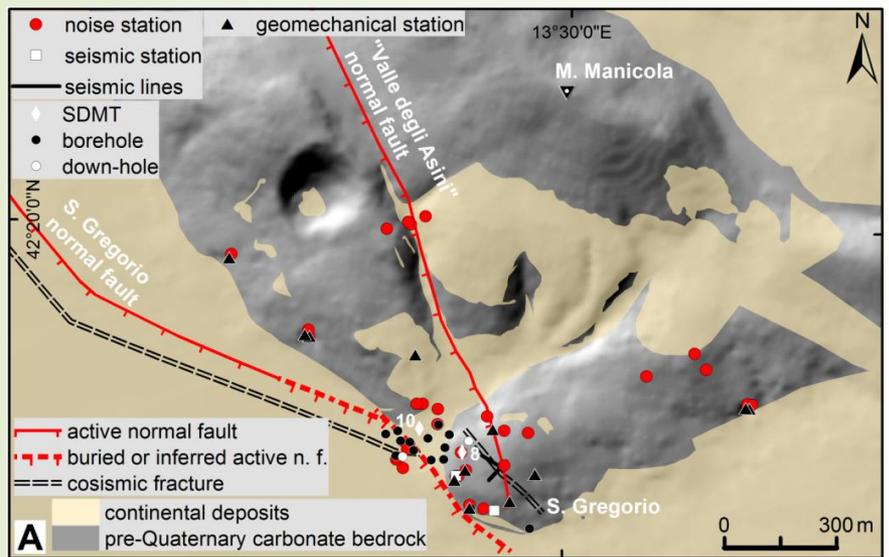
L'uso congiunto di tecniche TDEM e rapporti spetrali HVNSR ha permesso di ricostruire l'assetto profondo della Valle dell'Aterno a Sud dell'Aquila.

Si è utilizzato un profilo sismico disponibile nella zona di Paganica – Bazzano per verificare l'affidabilità delle tecniche di indagine.



Ricostruzione dell'assetto profondo della Valle dell'Aterno tra Paganica e San Demetrio

# Analisi di Amplificazione su Roccia, l'esempio di San Gregorio (AQ)

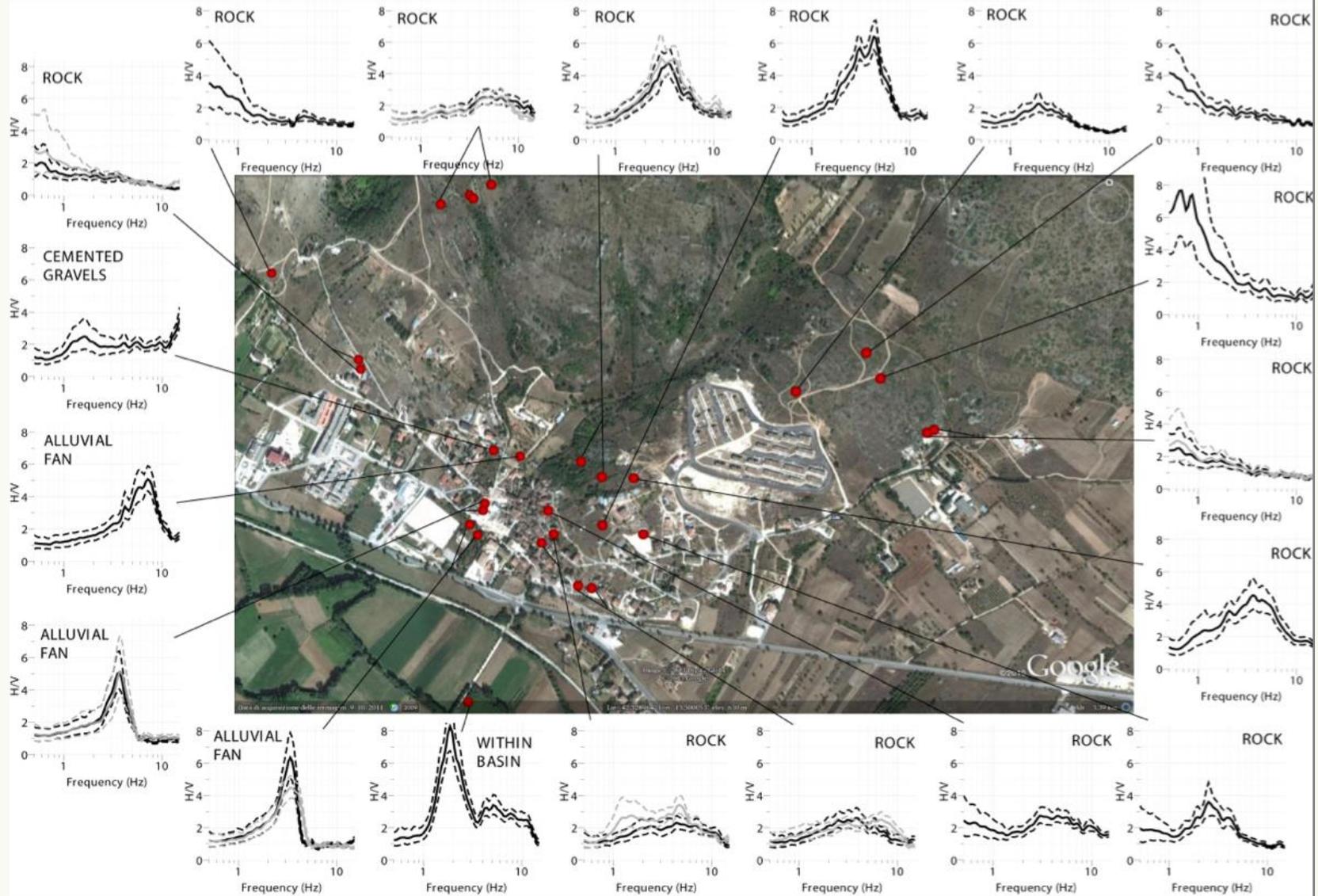


## Rilevo Geomeccanico

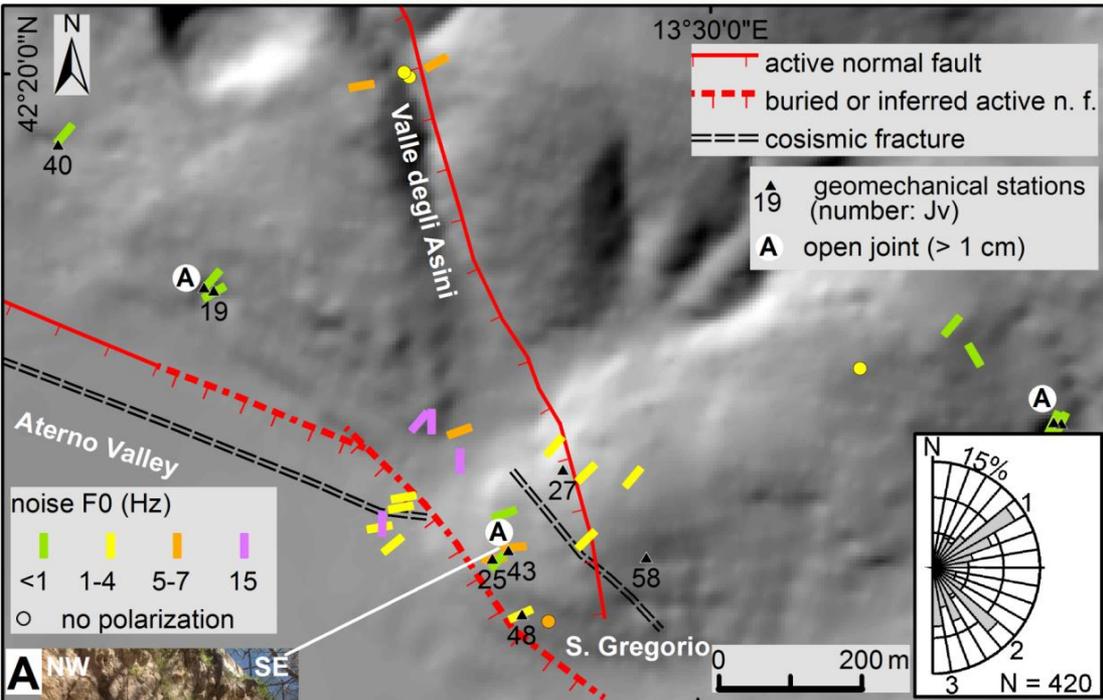
- Caratteristiche delle fratture; tipologia, geometria
- Proprietà dell'insieme di fratture: sets, gerarchia, persistenza, spaziatura..
- Proprietà geomeccaniche quantitative: Jv

- Analisi dei nuovi dati geotecnici, geofisici e geologici raccolti a supporto della ricostruzione
- Analisi strutturale sul bedrock carbonatico per evidenziare possibili correlazioni tra stato di fratturazione e amplificazione del moto.

## H/V noise ratios



Le misure di rumore evidenziano possibili amplificazioni anche su siti rocciosi



## Misure HVSR:

Esistenza di picchi polarizzati nell'intervallo 3-7 Hz con direzione prevalente  $\sim N60^\circ$ .

I picchi H/V sono presenti sia su siti alluvionali che su roccia.

La parte sud del centro storico presenta bande di amplificazione tra 1 e 5 Hz.

La parte nord mostra picchi più marcati e stretti tra 3 e 4 Hz.

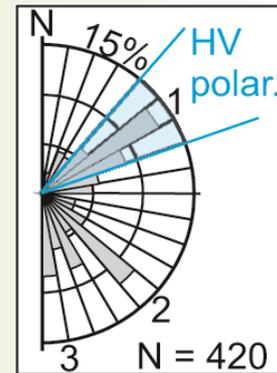
## Analisi strutturale:

3 Sets di fratture:

Set 1: strikes  $N40^\circ-70^\circ$

Set 2: strikes  $N120^\circ-140^\circ$

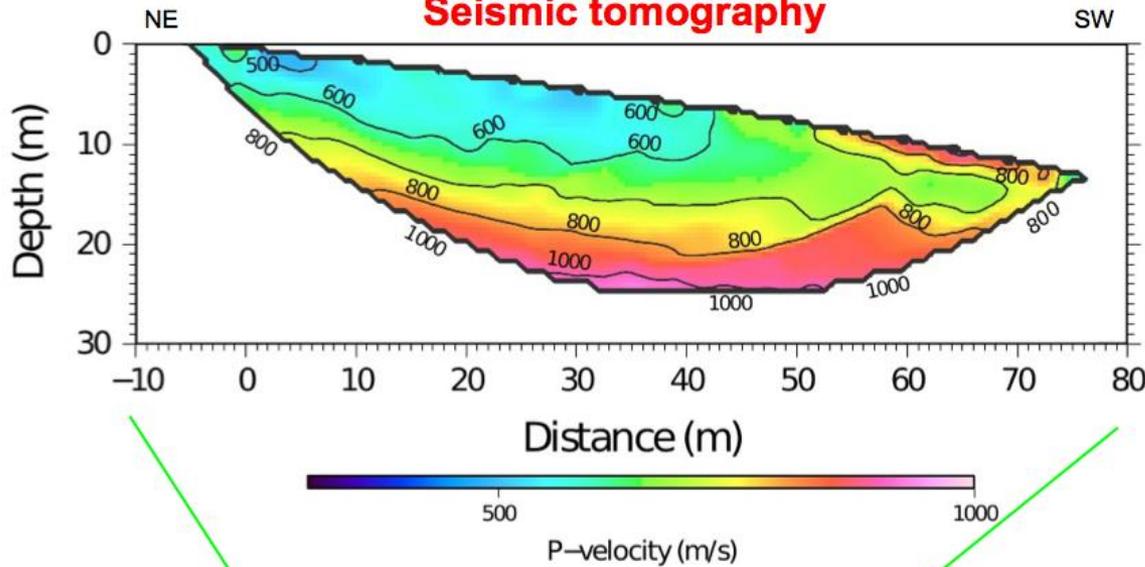
Set 3: strikes  $N150^\circ-180^\circ$



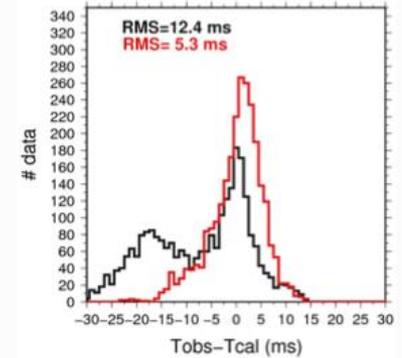
## Considerazioni di sintesi:

- La direzione di polarizzazione del rumore ambientale è :
  - $\sim$  parallela alle fratture del Set 1;
  - $\sim$  perpendicolare alle fratture del set 2, allo "strike" delle faglie principali e all'elongazione del Monte Manicola
- Sembra esistere una correlazione tra l'apertura delle fratture e la presenza di picchi H/V
- Non c'è una chiara correlazione tra la densità delle fratture (che rimane comunque alta) e rapporti H/V

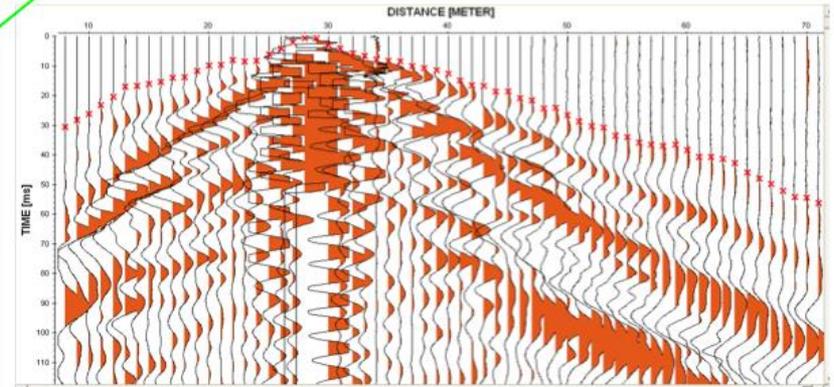
# Seismic tomography



72 vertical geophones (4.5 Hz)  
several shot offsets

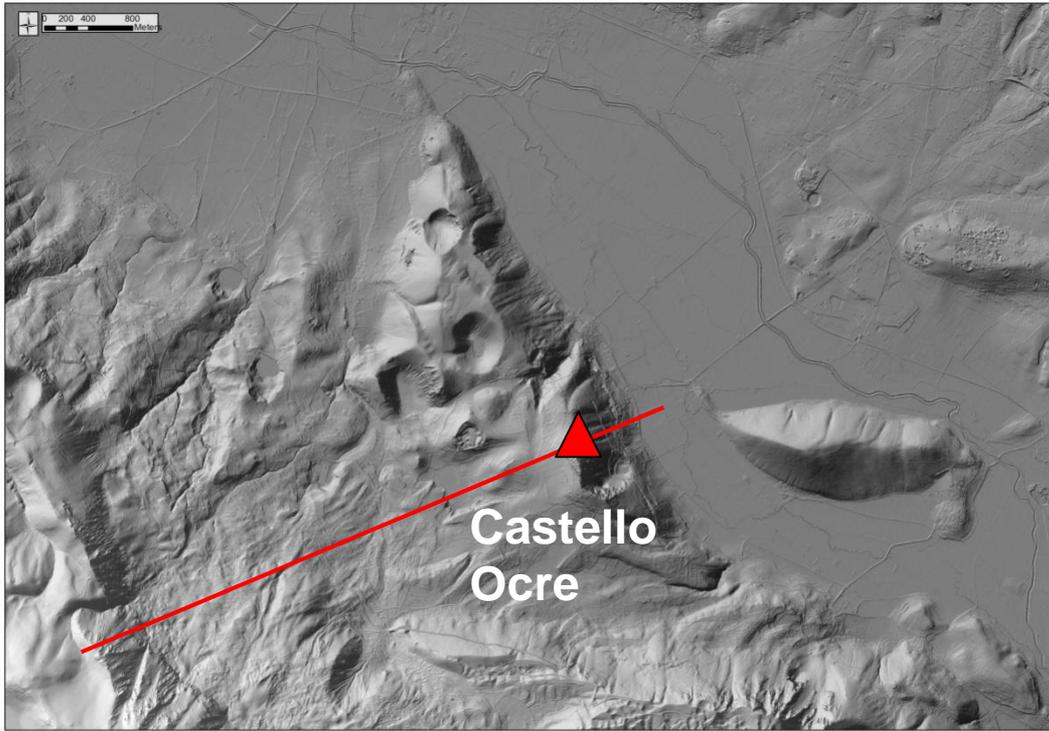


Collapsed RC building



La tomografia sismica in onde P evidenzia una chiara diminuzione delle velocità nella zona nord dell'abitato dove sono più marcati i picchi nei rapporti H/V

# Effetto di amplificazione su roccia al Castello di Ocre



Dati Analizzati:

Registrazione del mainshock aquilano tramite una stazione gps ad high rate\*

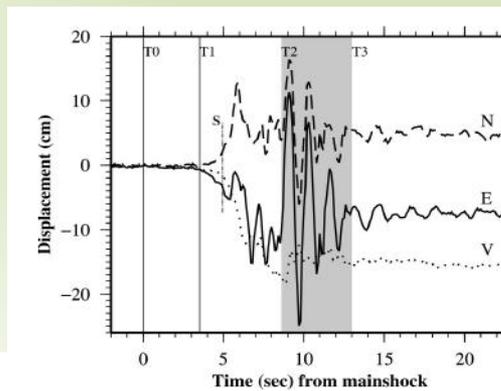
Registrazione di diversi aftershocks della sequenza aquilana tramite una stazione sismica co-locata

misure di vibrazione ambientale in diversi punti nell'intorno

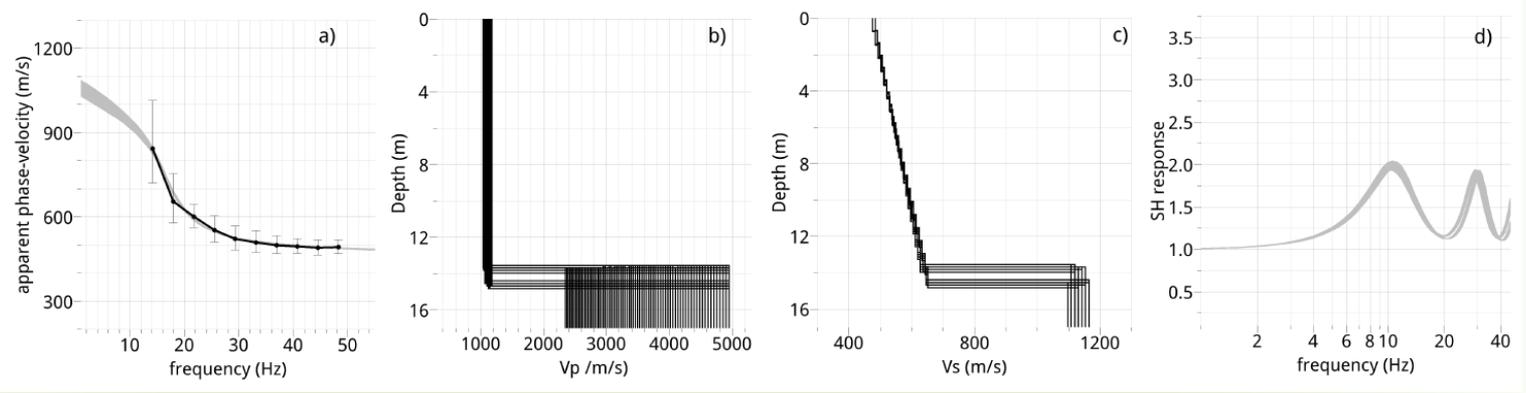
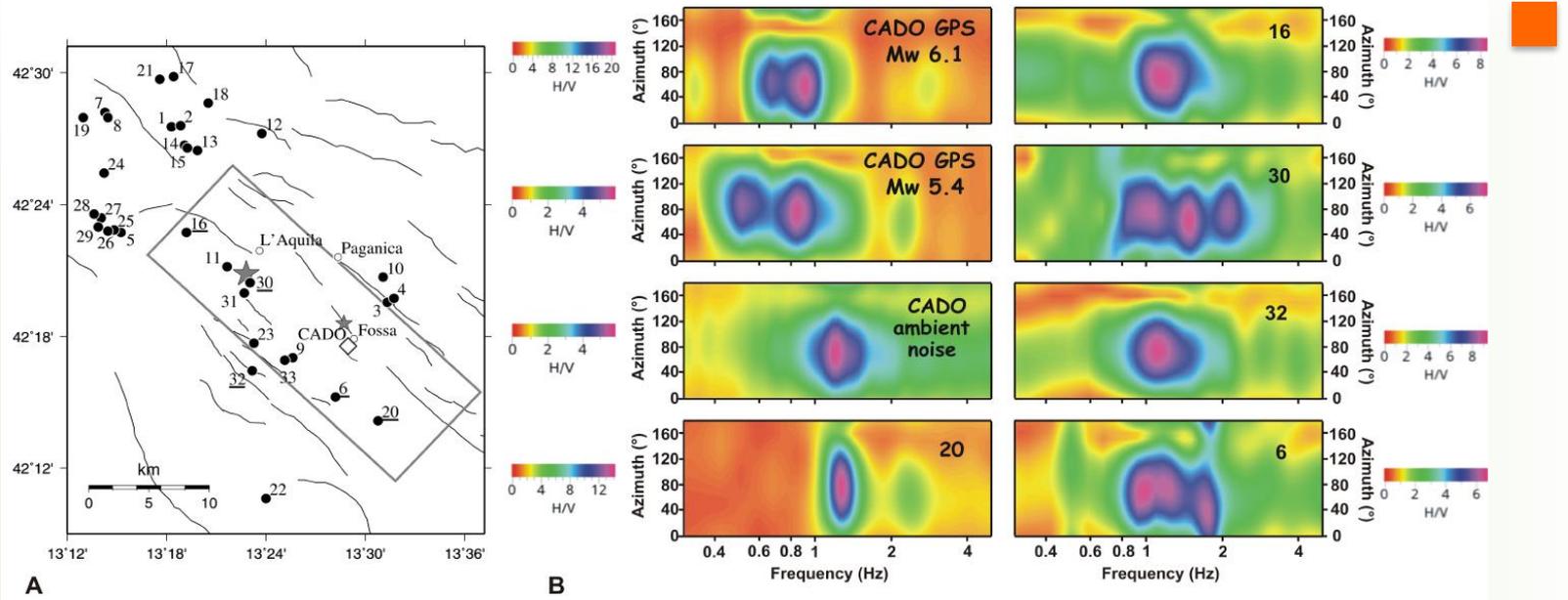
Esperimenti sismici ad hoc (array 2D e 1D) per stimare il profilo Vs

*\*Avallone, A. et al., 2011,*

*Very high rate (10 Hz) GPS seismology for moderate-magnitude earthquakes: The case of the Mw 6.3 L'Aquila (central Italy) event, Journal of Geophysical Research, 116, B02305, doi:10.1029/2010JB007834*

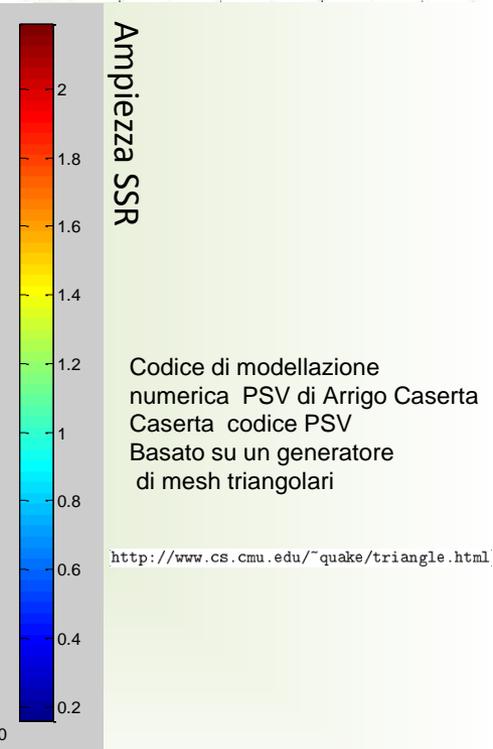
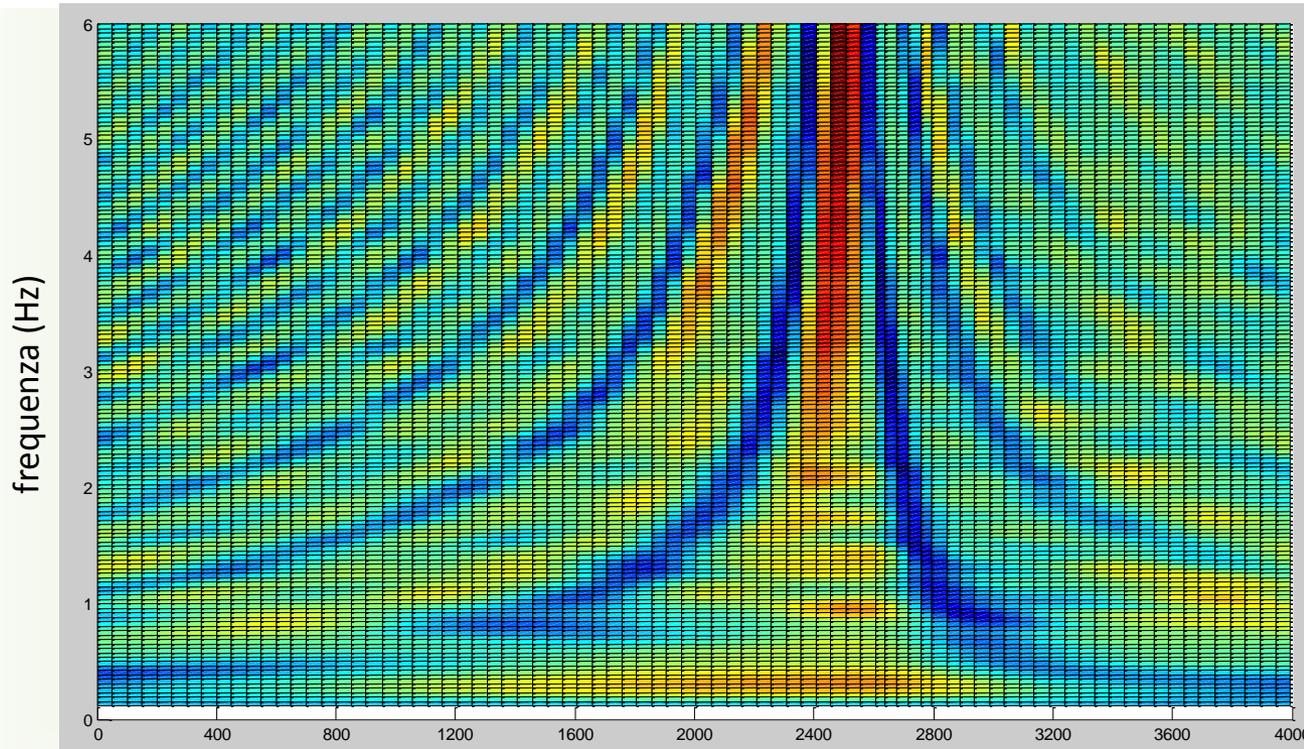
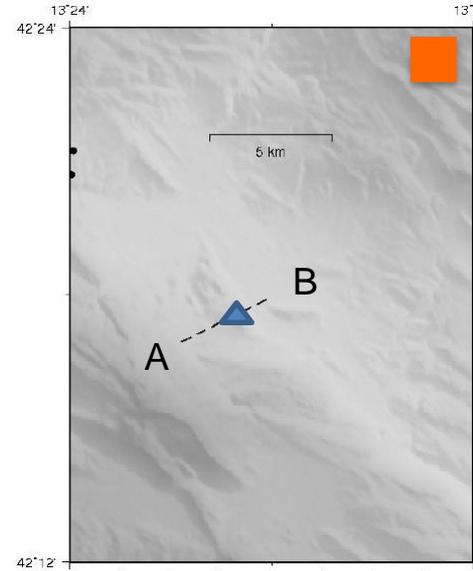
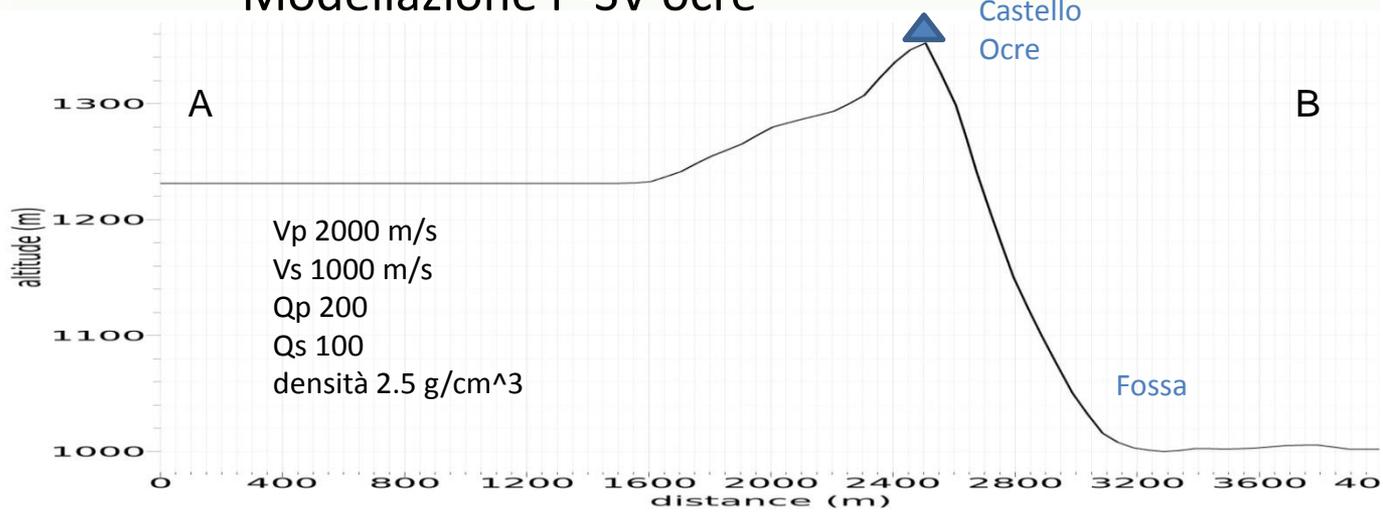


I dati indicano un segnale amplificato e polarizzato N+60° a circa 1Hz



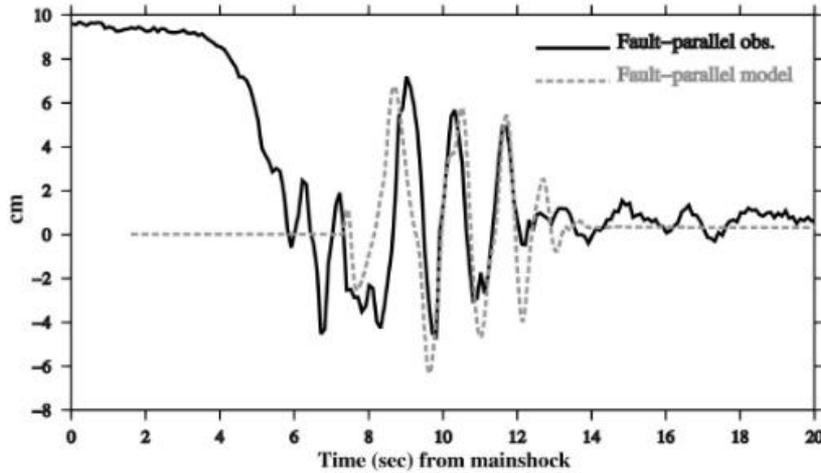
Il modello di velocità ricavato con indagini MASW 1D e 2D non consente di ipotizzare nessun effetto di amplificazione a bassa frequenza

# Modellazione P-SV ocre



Neanche un effetto topografico riesce a spiegare le osservazioni sperimentali

## Best Fit Model



~650 m

$V_l$   
2200 m/s

$Q = 250$

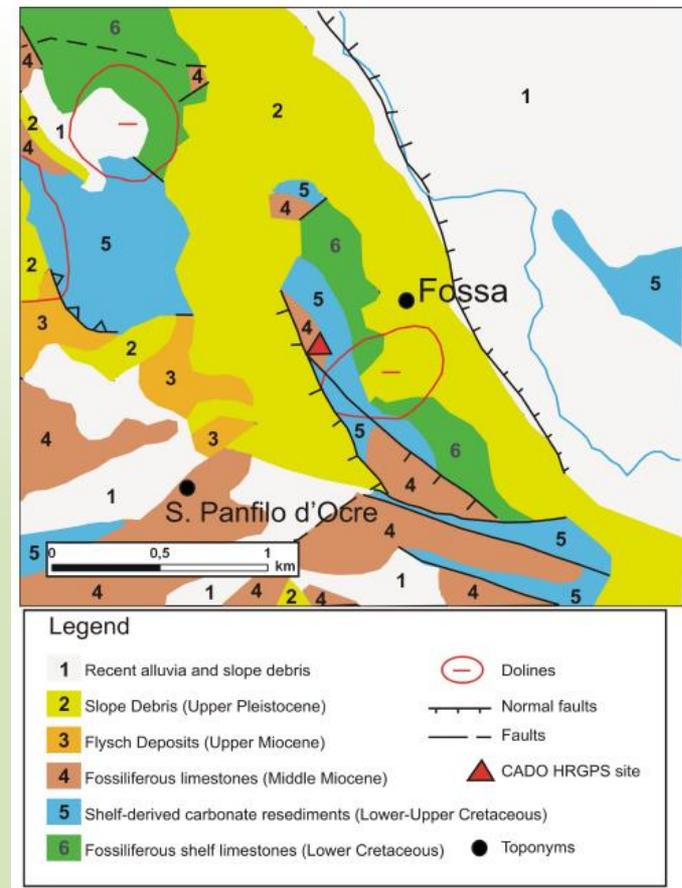
$V_c$   
1300 m/s

$Q = 20$

$V_r$   
2300 m/s

$Q = 250$

Source-receiver distance = 12 Km

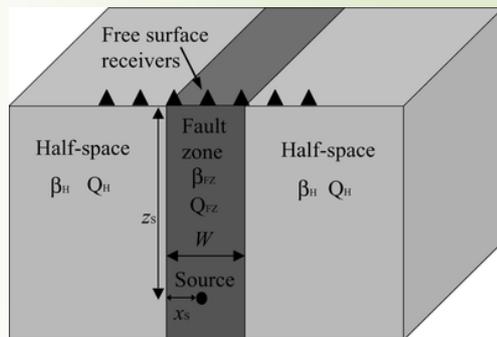


### Legend

- 1 Recent alluvia and slope debris
- 2 Slope Debris (Upper Pleistocene)
- 3 Flysch Deposits (Upper Miocene)
- 4 Fossiliferous limestones (Middle Miocene)
- 5 Shelf-derived carbonate resediments (Lower-Upper Cretaceous)
- 6 Fossiliferous shelf limestones (Lower Cretaceous)
- Dolines
- Normal faults
- Faults
- CADO HRGPS site
- Toponyms

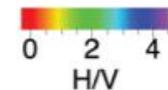
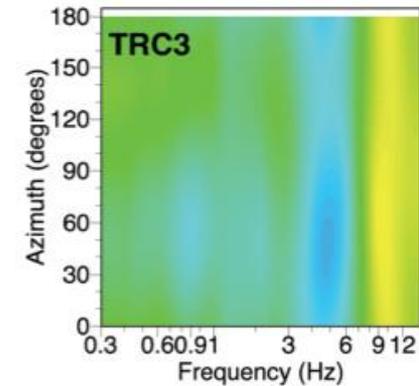
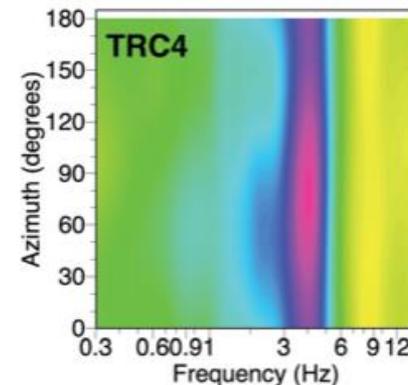
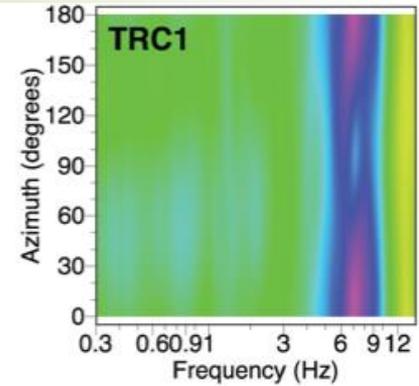
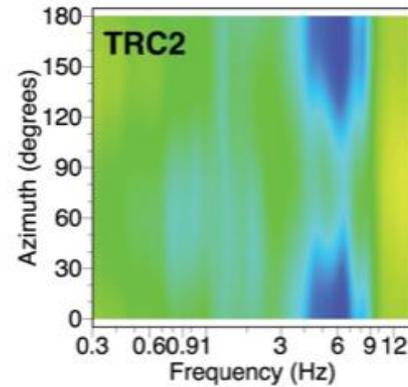
Tratto da

Avallone, A. et al., 2014,  
Waveguide effects in very high rate GPS  
record of the 6 April 2009, Mw 6.1 L'Aquila,  
central Italy earthquake.  
*Journal of Geophysical Research: Solid Earth*,  
119(1), 490-501, doi: 10.1002/2013JB010475



Si ipotizza un effetto indotto dalla presenza di rocce fratturate  
legate alla presenza di una zona di faglia

# Indagini su strutture sepolte (faglie – gradini morfologici)



Pizzoli (Trincea paleosismologica – HVNSR – Polarizzazione rumore ambientale)

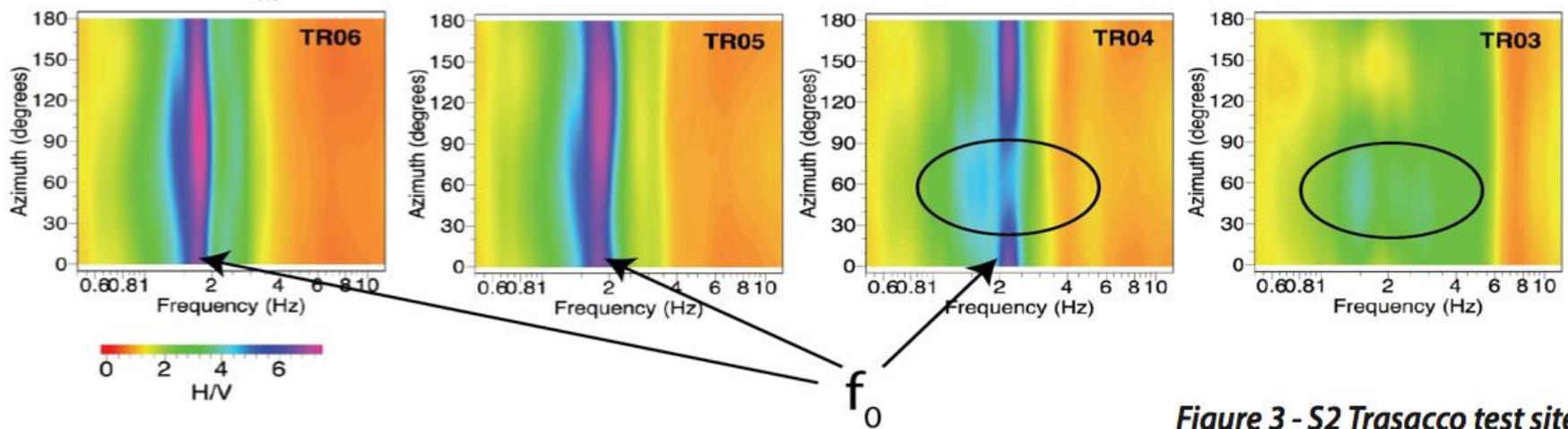
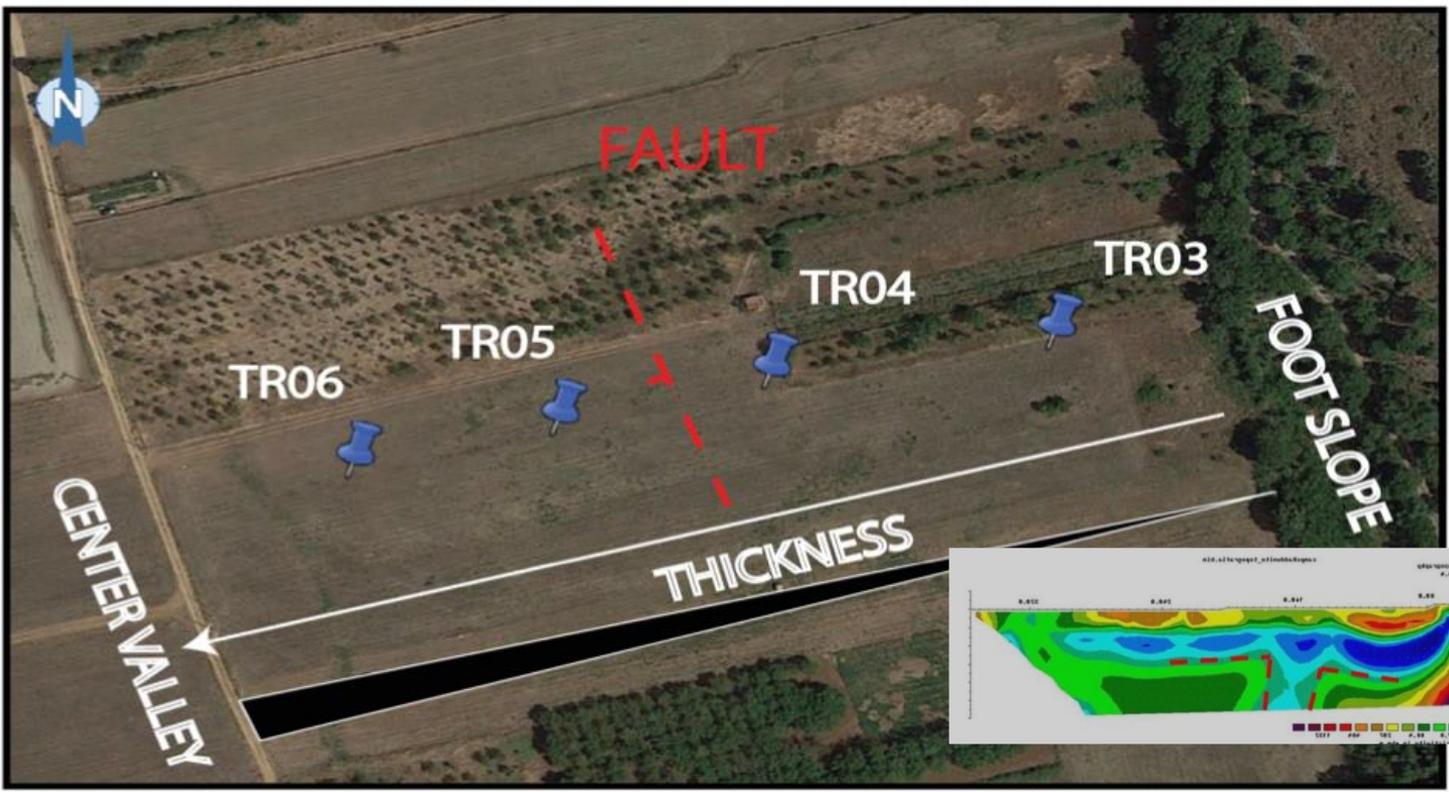
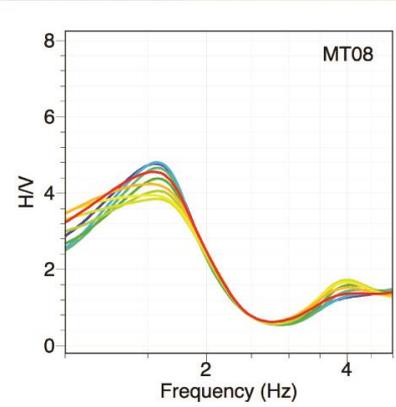
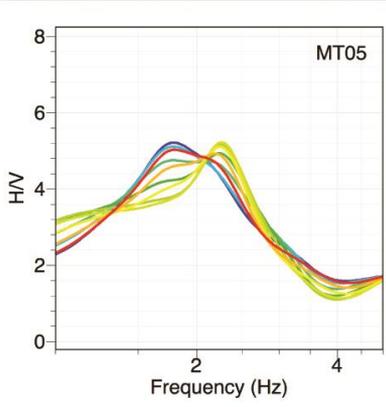
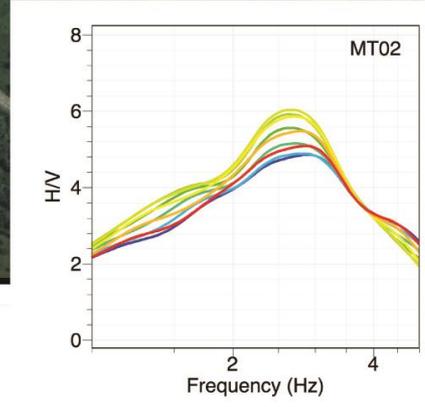
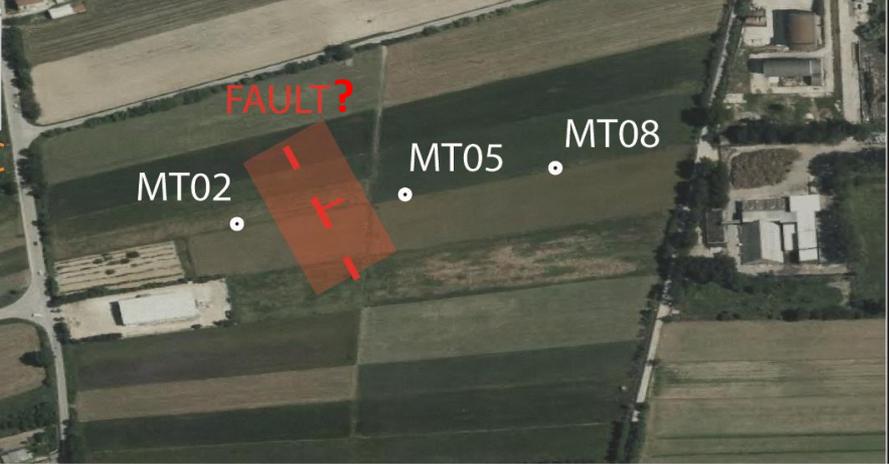
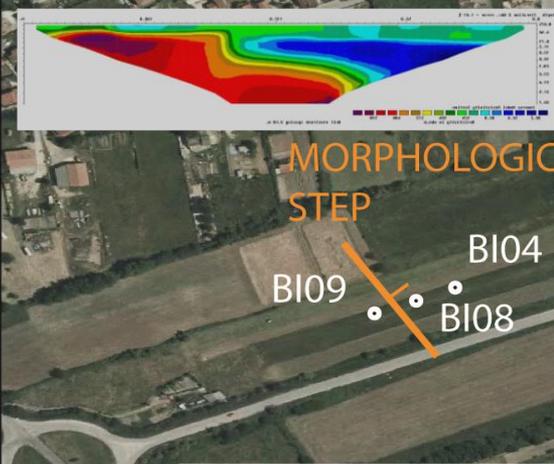
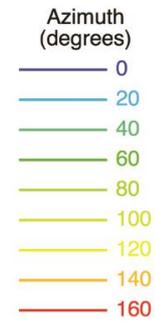
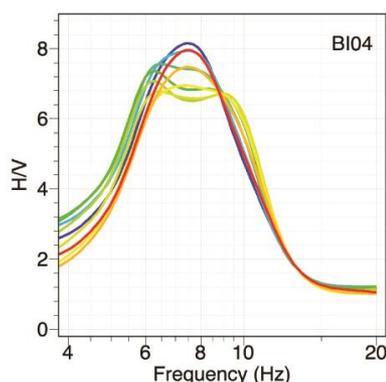
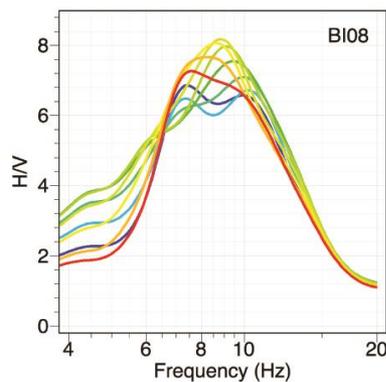
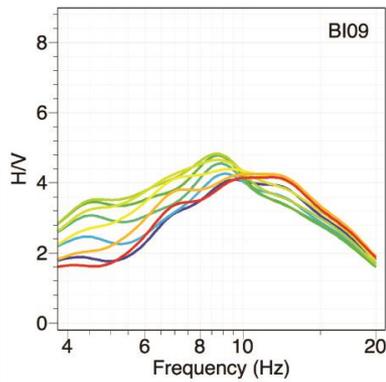
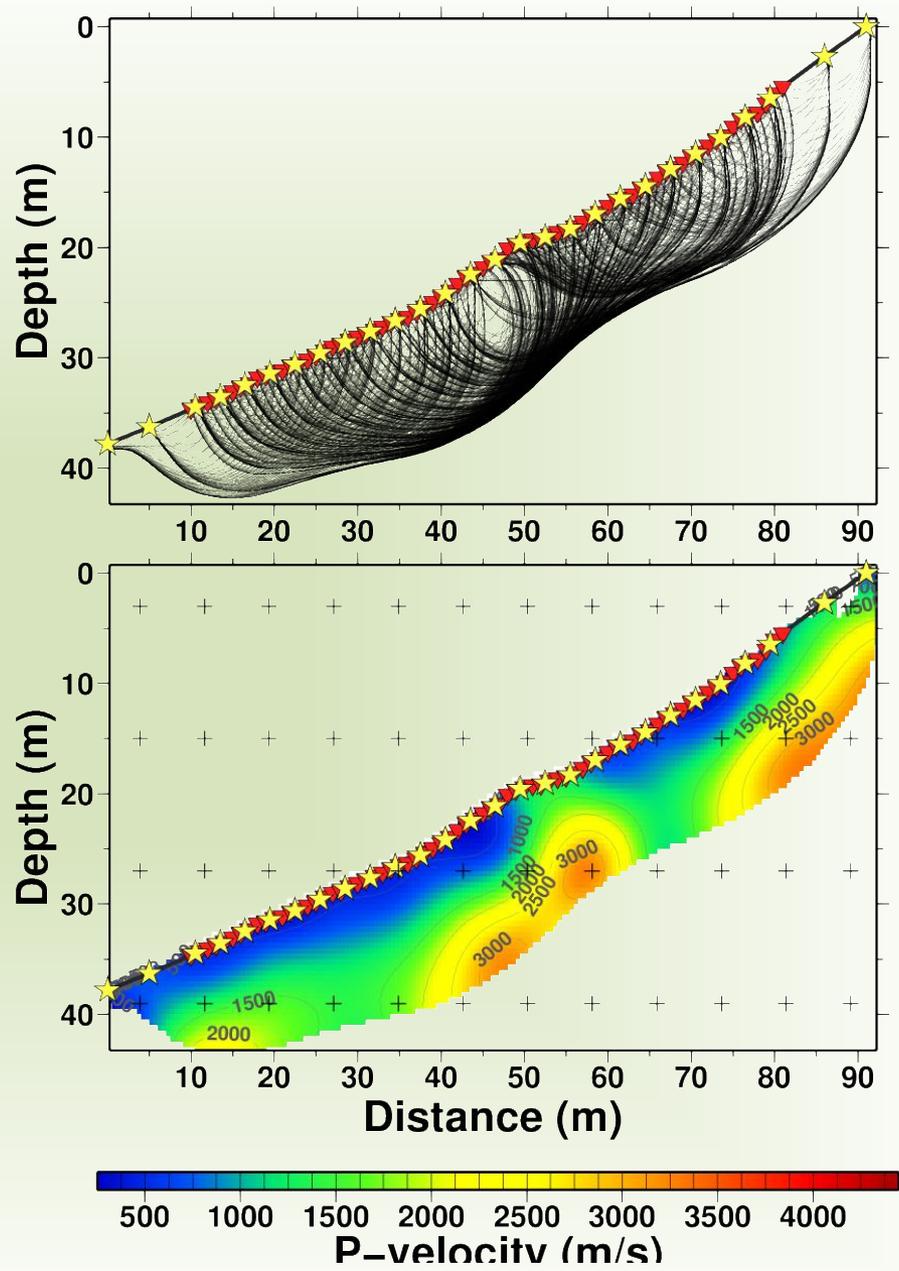
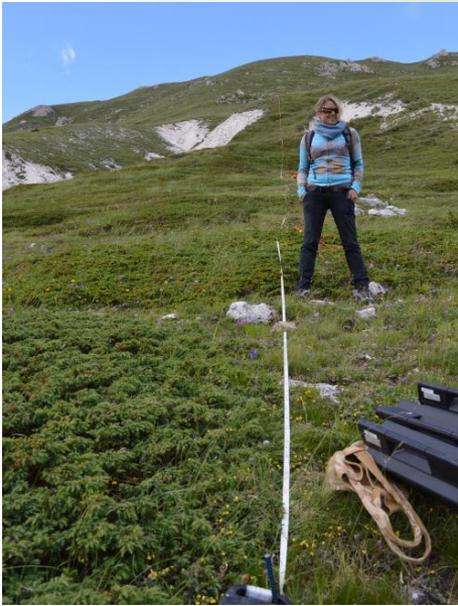
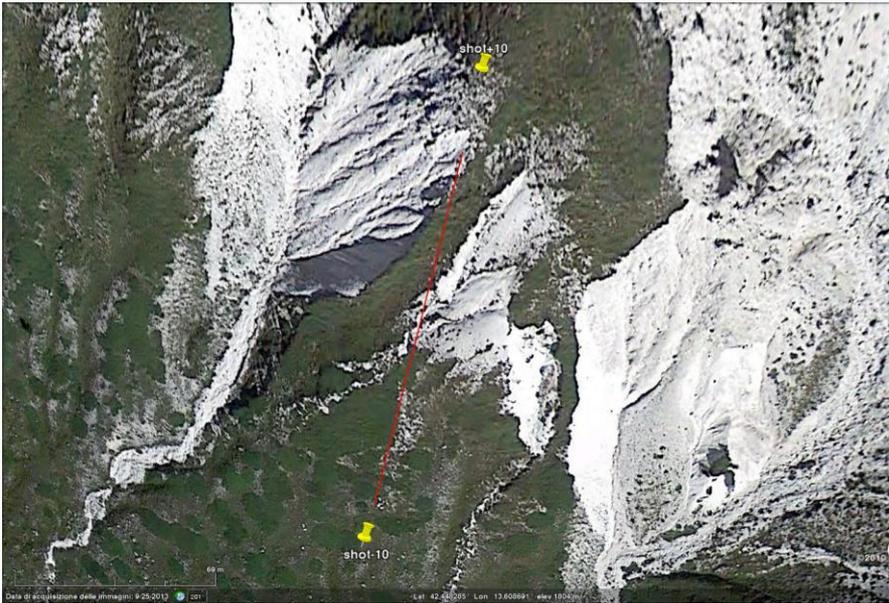


Figure 3 - S2 Trasacco test site  
 Trasacco (Profilo ERT – HVNSR – Polarizzazione rumore ambientale – MASW)

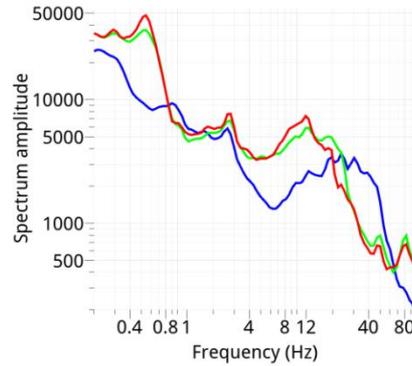
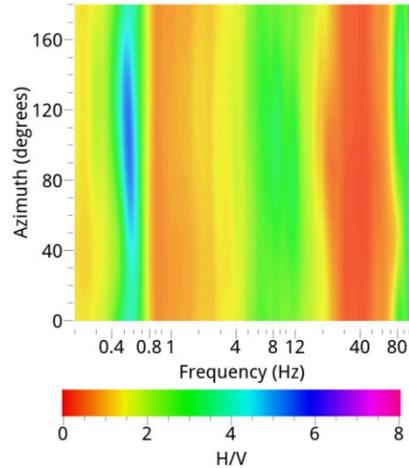
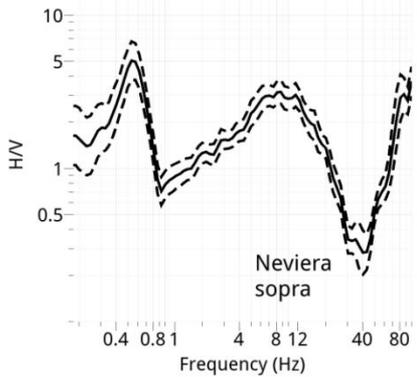
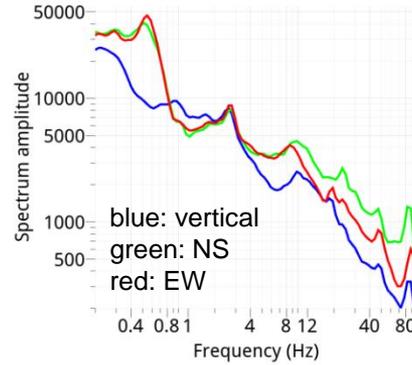
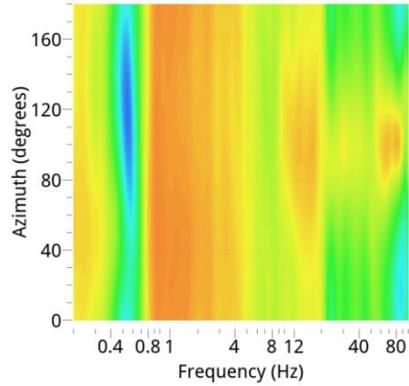
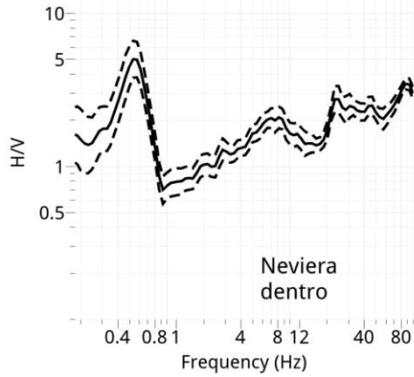


Borgo Incile (Profilo ERT – HVNSR – Polarizzazione rumore ambientale - MASW)

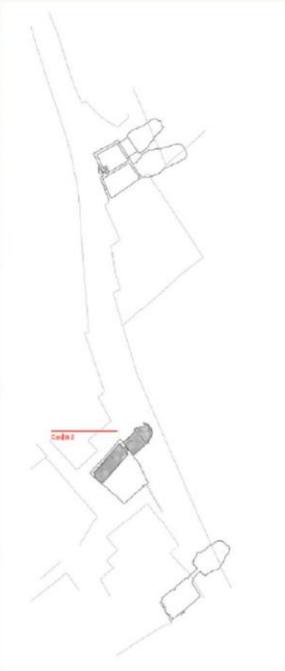


Campo Imperatore (Tomografia Sismica – Indagini geomeccaniche)

# Indagini HVNSR, proxy per l'individuazione delle cavità?



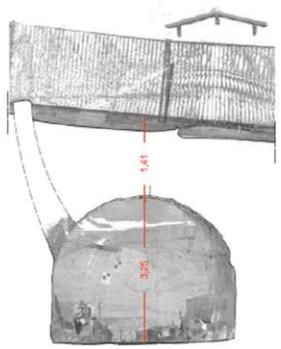
La nevieria di Palazzo Centi a L'Aquila



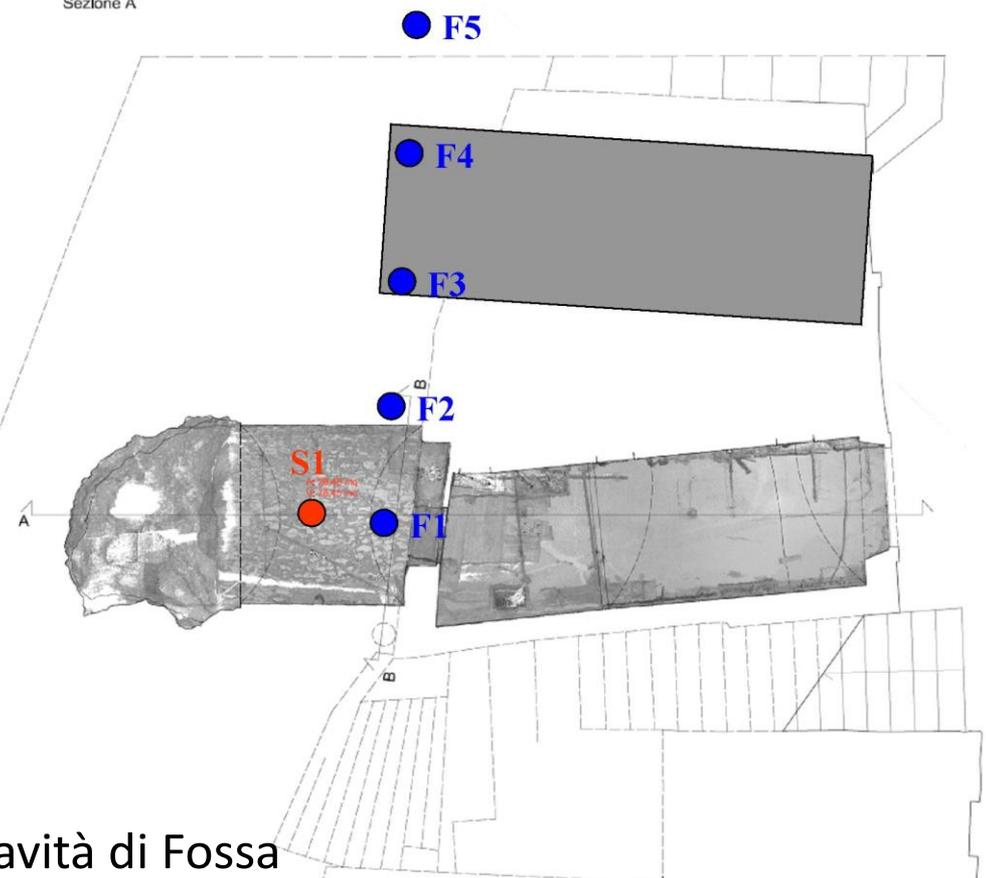
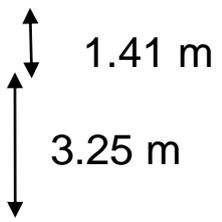
Sezione A

### RILIEVO LASER SCANNER DELLE CAVITA' SU VIA OSTERIA FOSSA (AQ)

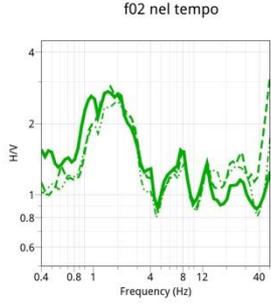
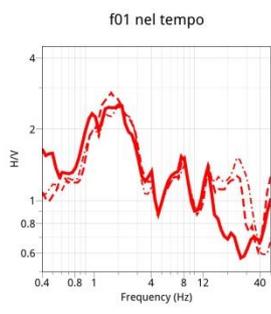
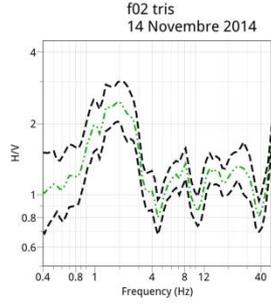
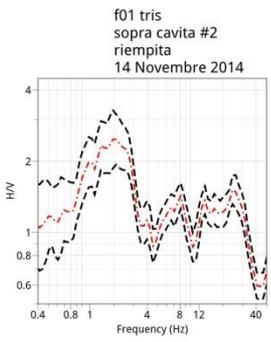
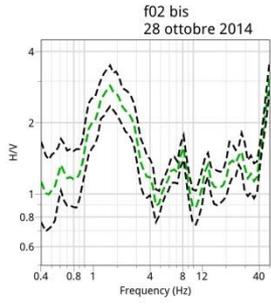
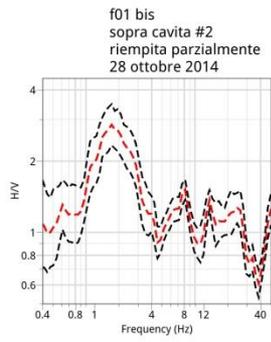
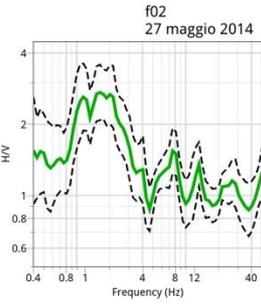
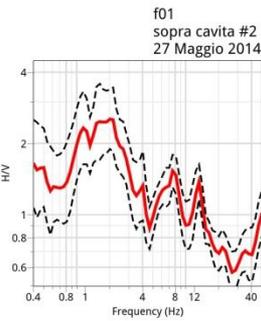
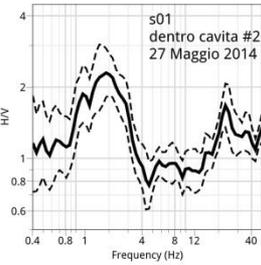
<p>TECNICO INCARICATO DAI PROPRIETARI PER RIPARAZIONE EDIFICI DANNEGGIATI DAL SISMA:</p> <p>ARCH. ROBERTA BOCCABELLA</p> <p>COLLABORATORI: DOTT. ARCH. ALESSANDRA PAPERI ARCH. JUNIOR STEFANO PARASMO</p>	<p>RILIEVO PER CONTO DEL TECNICO INCARICATO TRAMITE STRUMENTAZIONE LASER SCANNER</p> <p>ERRESSEGROUP WWW.ERRESSEGROUP.IT</p> <p>ARCH. RAFFAELE FABRIZIO ARCH. ROBERTA CAMPOCCIA</p>
<p>Tavola 3: Cavità 2</p> <p>scala di rappresentazione 1:50</p>	<p>Dati dimensionali: Area 28,48 mq Volume 78,45 mc</p>



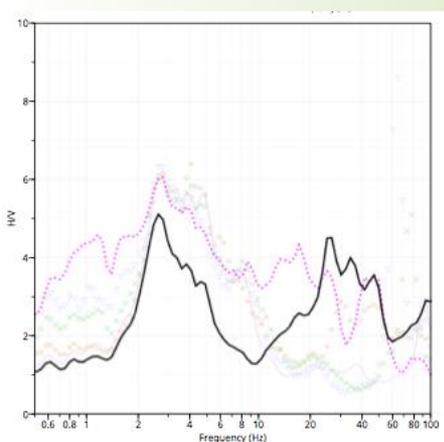
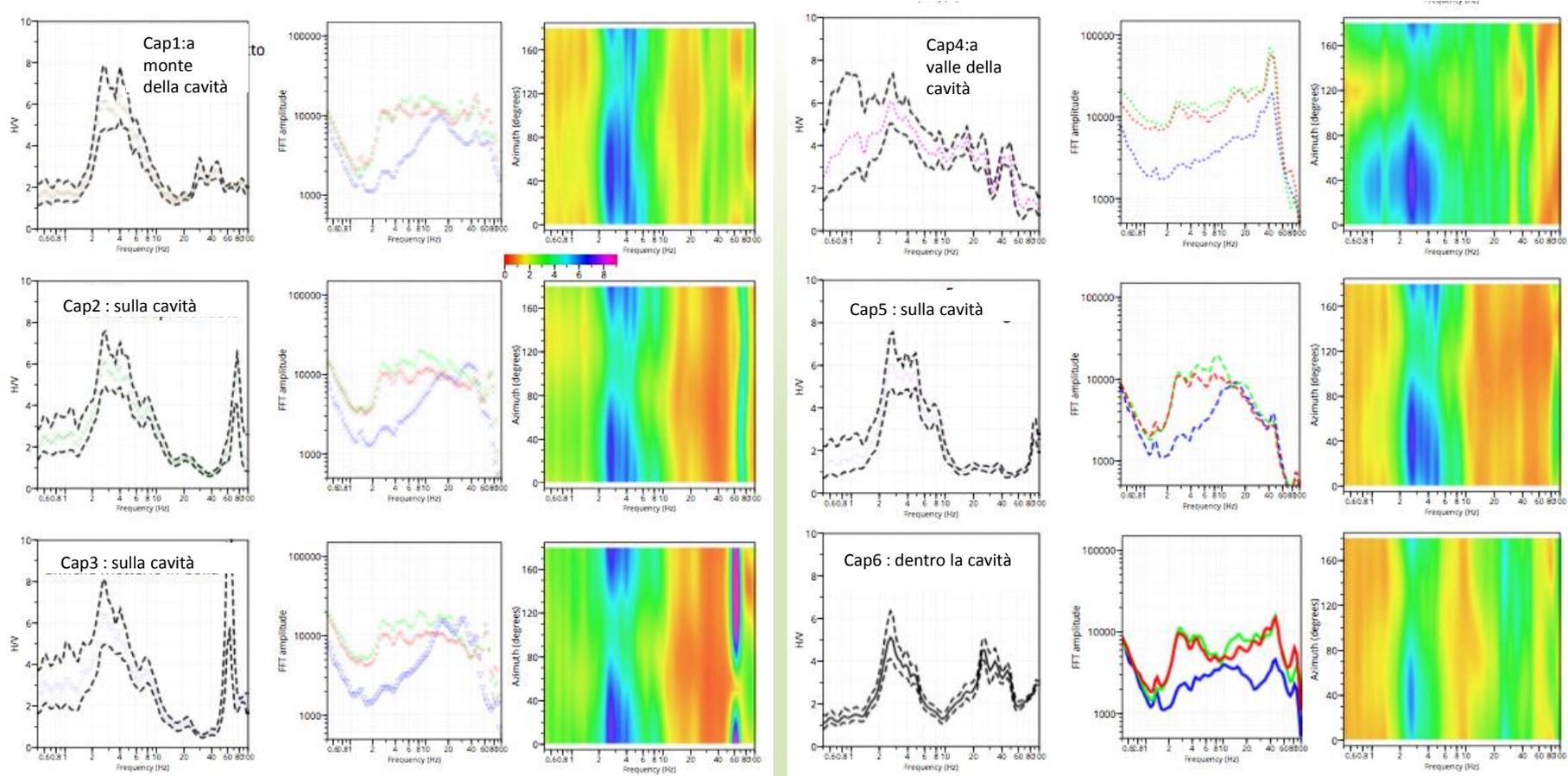
Sezione B



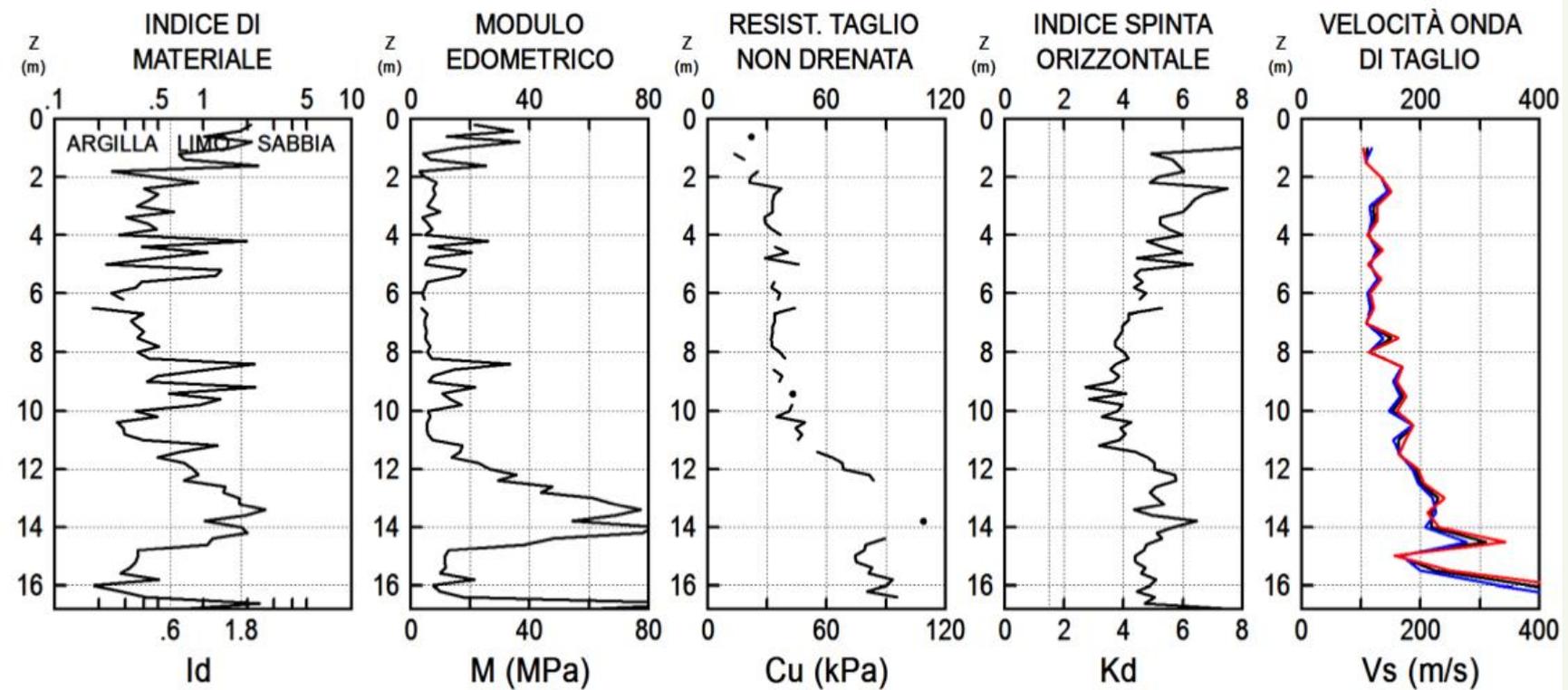
Le cavità di Fossa



Effetto sul rapporto H/V del riempimento progressivo della cavità



Capestrano

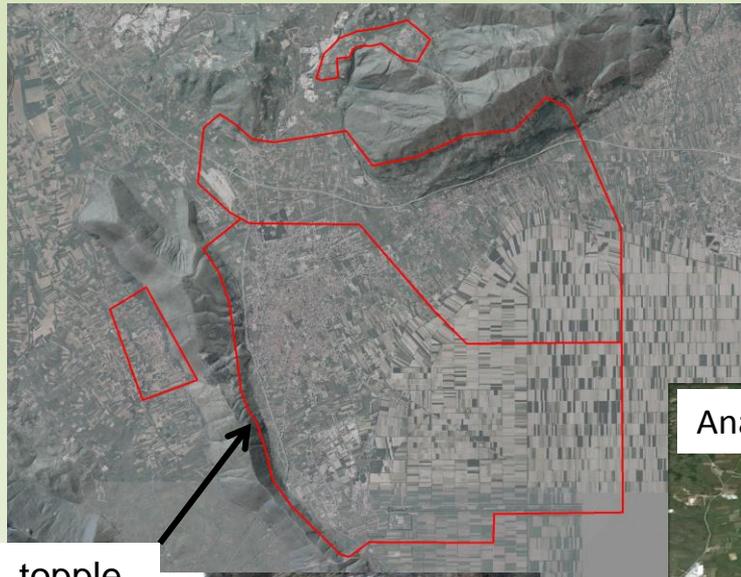


Sondaggi meccanici, prove CPTU e SDMT su siti interessati da liquefazioni storiche nella Piana del Fucino

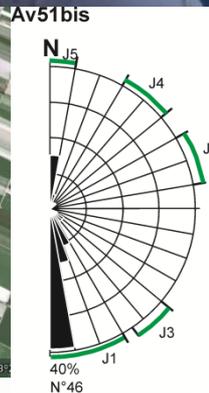
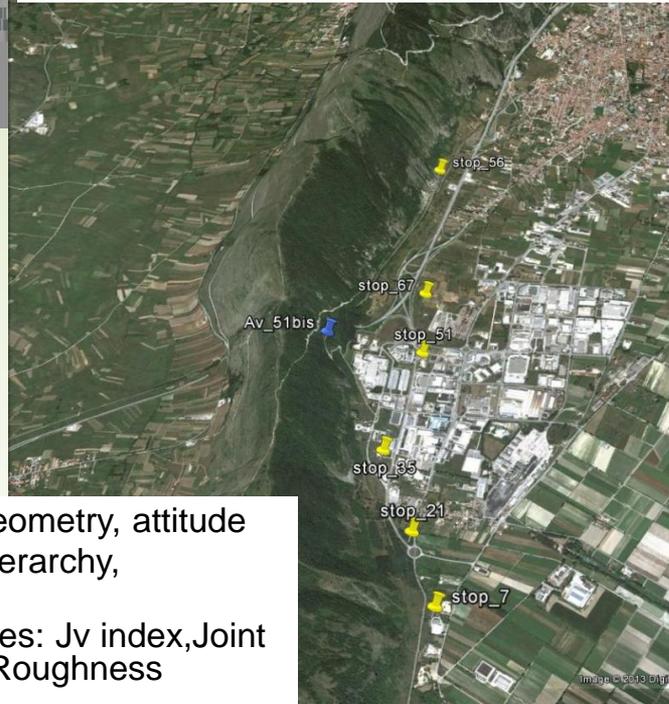
# Studio delle instabilità dei pendii in roccia



- Kinematic compatibility testing of discontinuity-controlled rock slope instability
- geometrical relationships between topographic slopes and structural discontinuity
- 3 modes of rock slope failures: planar sliding-wedge sliding-topple
- GIS-based methodology



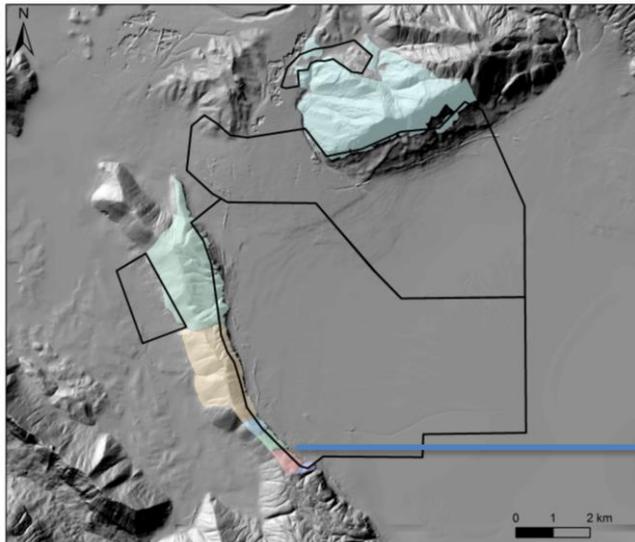
Analisi strutturale sul bedrock carbonatico



Jv = 33

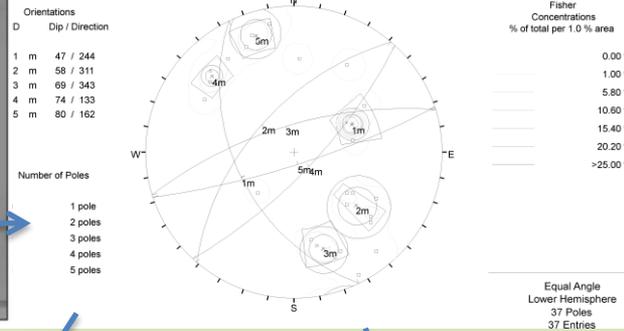
- Fracture characteristics: typology, geometry, attitude
- Fracture network properties: sets, hierarchy, persistence, spacing..
- Quantitative geomechanical properties: Jv index, Joint Compressive Strength (JCS), Joint Roughness Coefficient (JRC)

# Kinematic compatibility testing area



## Example of Fracture analysis for each site

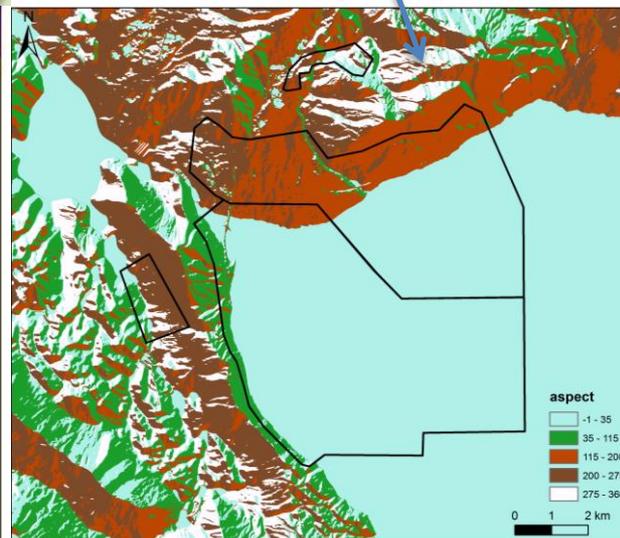
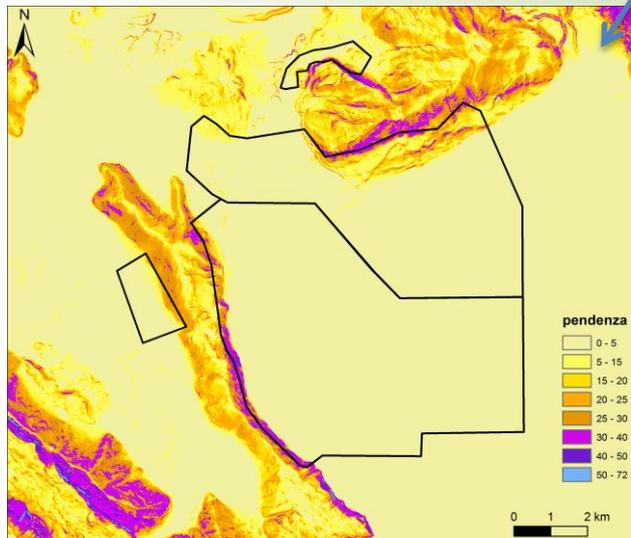
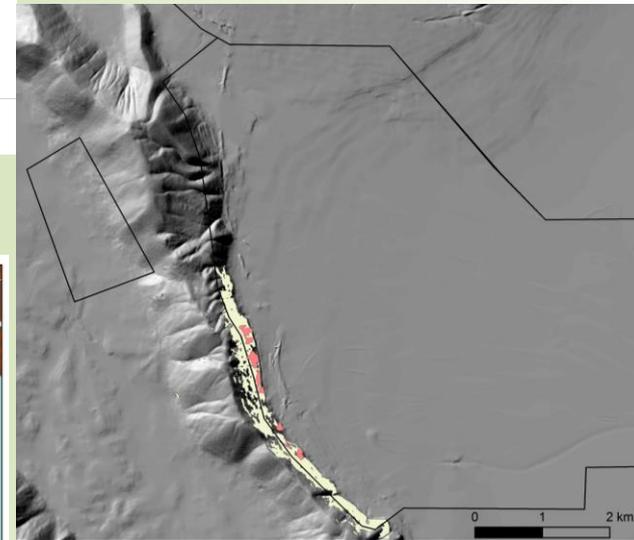
Av\_7



## geometrical relationships between

- topographic slopes
- exposure of slopes
- fracture attitude

## Results of the kinematic compatibility test



Yellow area: the topple is the kinematically possible failure mode

Red area: field observation of topple

Slope map

Aspect map

# Attività in corso e/o in programmazione

- Realizzazione di indagini sismologiche e geofisiche finalizzate alla microzonazione sismica di livello III per la città di Avezzano
- Realizzazione di indagini sismologiche e geofisiche finalizzate alla microzonazione sismica di livello III per i centri abitati del comune dell'Aquila non interessati alla MZS post evento del 2009
- Determinazione di scenari di scuotimento per la città di Avezzano
- Blast test per studi sulla liquefazione del terreno in un'area campione
- Implementazione di un pacchetto software, già in avanzata fase di sviluppo, per l'analisi del rumore ambientale tramite tecniche di Cross Correlazione

## Collaborazioni in corso

- Università "G. d'Annunzio" di Chieti-Pescara (Dipartimento DiSPUTer)
- Università dell'Aquila (Dipartimento DICEA)
- Regione Abruzzo (Direzione LL.PP., Ciclo Idrico Integrato e Difesa del Suolo e della Costa, Protezione Civile)
- USRC - Ufficio Speciale per la Ricostruzione dei Comuni del Cratere
- ENEA (Laboratorio Prevenzione Rischi Naturali e Mitigazione Effetti)
- Università di Padova (Dipartimento di Geoscienze)
- Università IUAV di Venezia

## Personale FIRB-Abruzzo ed INGV coinvolto

Sara Amoroso, Luciana Cantore, Fabrizio Cara, Riccardo Civico, Giuseppe Di Giulio, Deborah Di Naccio, Emanuela Falcucci, Daniela Famiani, Stefano Gori, Alessia Mercuri, Marta Pischiutta, Francesca Pacor, Rodolfo Puglia, Maurizio Vassallo, Fabio Villani.