CARATTERIZZAZIONE GEOFISICA DEI TERRENI STABILI SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONE NELL'AMBITO DELLA MICROZONAZIONE SISMICA DI PRIMO LIVELLO

Dario Albarello

Dip. di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente
Università degli Studi di Siena
Via Laterina, 8 – 53100 Siena - dario.albarello@unisi.it

Un elemento chiave della MicroZonazione Sismica (MZS) è la ricostruzione del modello geologico del sottosuolo dell'area indagata

Si tratta però di un modello geologico in **prospettiva sismica**, ovvero orientato alla previsione dei possibili effetti indotti dal moto sismico sulla stabilità dei terreni (Zone Instabili) o sui possibili effetti di amplificazione locale del moto indotte dalla configurazione litostratigrafica e morfologica locale (Zone Stabili Soggette ad Amplificazione)

Primo scopo dell'indagine è la determinazione della geometria di queste zone e, in negativo, delle aree non soggette ad effetti sismici particolari (Zone stabili non soggette ad amplificazione)

Obiettivo specifico del primo livello di analisi è quello di definire la sola geometria di queste zone ed orientare possibili approfondimenti relativi ad aree particolari

Obiettivo del secondo livello è quello di aggiungere una prima valutazione **quantitativa (ovvero mediante metodi semplificati)** degli effetti attesi nelle due tipologie di zone per le quali sono attesi effetti sismici potenzialmente più dannosi

In particolare, scopo di un'analisi di primo livello è quello di identificare e rappresentare le geometrie di microzone potenzialmente caratterizzate da specifici effetti sismici a una scala di dettaglio (almeno 1:5.000/1:10.000) corredata da sezioni geo-litologiche rappresentative della situazione lito-stratigrafica e strutturale presente.

- Di grande importanza per lo scopo risulta la ricostruzione del modello geologico dell'area, l'individuazione dei litotipi che possono costituire il substrato rigido (ovvero dei terreni caratterizzati da valori delle velocità di propagazione delle onde di taglio S significativamente maggiori di quelli relativi alle coperture localmente presenti) accompagnata da una stima approssimativa della loro profondità rispetto al piano di campagna (del tipo: "qualche metro", "una decina di metri", "alcune decine di metri", "oltre i 100 metri") e, infine, una stima di massima del contrasto di impedenza sismica atteso (del tipo: "alto" o "basso").

Uno degli scopi della carta di primo livello sarà anche quello di fornire prime indicazioni su situazioni geologiche e morfologiche complesse per le quali è presumibile che l'approccio semplificato previsto dalle NTC (2008) non sia da ritenersi idoneo per una stima corretta della RSL.

Un elenco delle situazioni geologiche e geomorfologiche complesse :

1. *geometria articolata del substrato rigido sepolto alla scala di interesse (presenza di paleoalvei, substrato rigido deformato da strutture tettoniche, andamento del substrato a Horst e Graben, ...);*
2. *zona di raccordo tra rilievo e pianura (zona di unghia con substrato rigido sepolto in approfondimento sotto la pianura, in maniera continua o discontinua);*
3. *geometria del substrato rigido che crea una valle stretta colmata di sedimenti soffici (C>0.25, C coefficiente di forma, C=h/l, dove h è lo spessore della coltre alluvionale, l la sua semiampiezza)*
4. *successione litostratigrafica che preveda terreni rigidi su terreni soffici (possibile profilo di Vs con inversioni di velocità;*
5. *substrato rigido profondo alcune decine di metri (più di 30 m);*
6. *presenza di marcati contrasti di impedenza sismica (rapporto >2.5?)*
7. *presenza di possibili cavità sepolte;*

Per una efficace identificazione delle Zone Stabili Soggette ad Amplificazione è necessario rispondere a alcuni quesiti fondamentali

1. ***Quali contatti geologici rappresentano significativi contrasti di impedenza sismica?***
2. ***Anche nel caso di formazioni litoidi affioranti (terreni stabili) è possibile escludere la presenza di effetti di amplificazione stratigrafica indotti, per esempio, da zone di alterazione?***
3. ***Quale è la morfologia sepolta di questi contatti ? (da notare che non vengono posti a priori limiti alla profondità di esplorazione)***

Se le informazioni geologiche svolgono un ruolo assai importante per determinare le geometria in affioramento delle formazioni potenzialmente responsabili di fenomeni di amplificazione, ma possono solo fornire vincoli generali sulla loro **geometria profonda**

Inoltre, non consentono di valutare efficacemente l'entità e il ruolo dei possibili **contrasti di impedenza sismica** eventualmente presenti alle superfici di contatto fra le diverse formazioni

In questo contesto, le **indagini geofisiche** possono fornire un contributo essenziale per integrare le informazioni geologiche fornendo indicazioni quantitative su questi aspetti

Tuttavia, per essere utili nel contesto della microzonazione sismica, queste tecniche devono essere caratterizzate da

1. *Bassi costi di esercizio per unità di volume di sottosuolo esplorato*
2. *Buona capacità di penetrazione (anche centinaia di metri)*

Nel corso delle attività di microzonazione sismica svolte nell'area aquilana e nelle diverse esperienze accumulate negli ultimi anni, è risultato evidente come le tecniche di esplorazione geofisica debbano giocare un ruolo importante nelle diverse fasi del lavoro

In particolare:

- *Nella fase di* ***costruzione del modello geologico di riferimento*** *a fini* ***esplorativi*** *(sismica passiva, geoelettrica, gravimetria)*
- *Nella fase di* ***caratterizzazione*** *dei terreni in termini* ***di risposta sismica locale*** *(sismica attiva con onde di volume e superficiali, metodi in foro)*

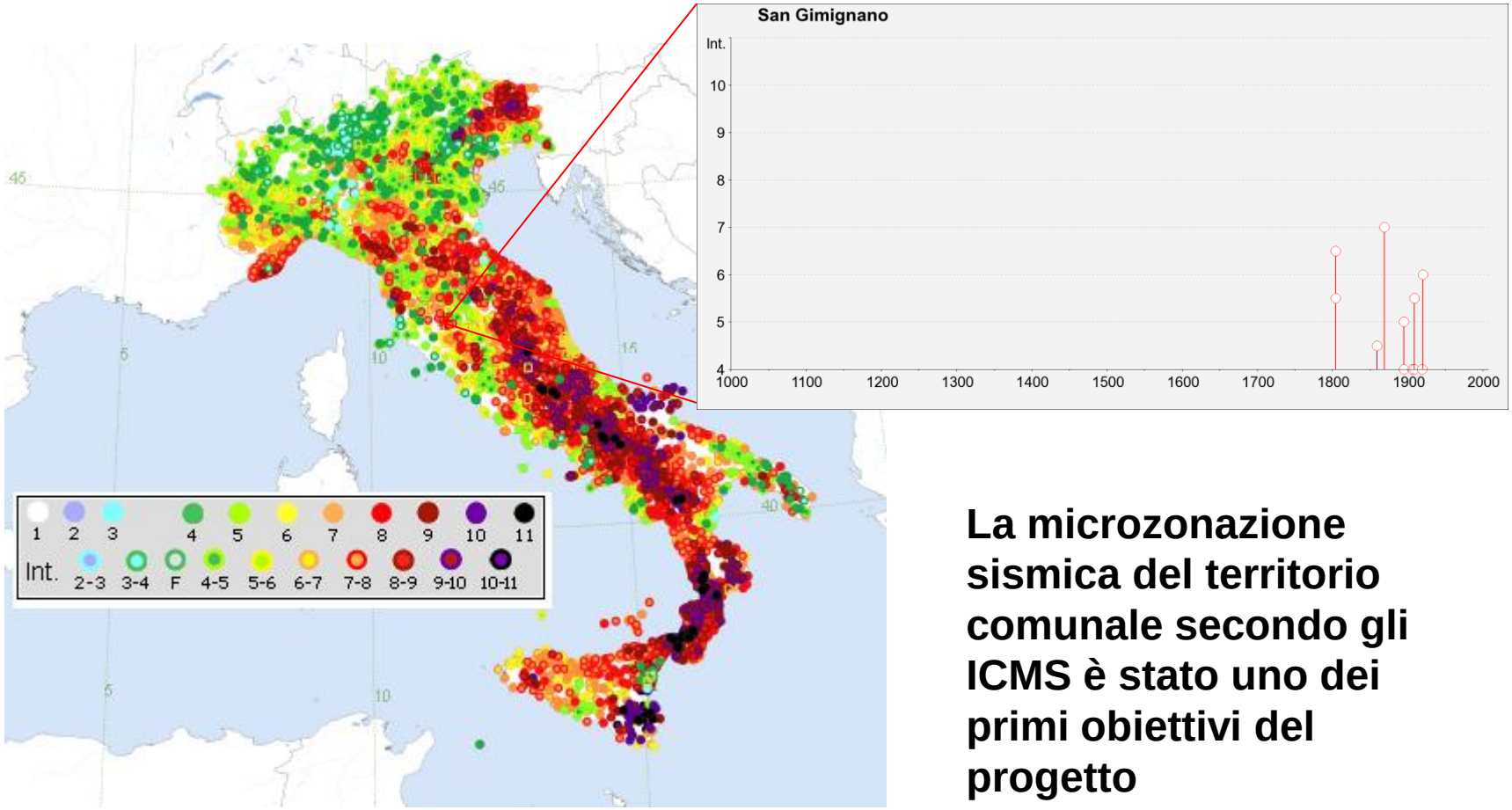
Si tratta di scopi differenti che richiedono livelli di dettaglio e capacità di penetrazione differenti:

1. *basso dettaglio e grande penetrazione per l'****esplorazione*** *(primo e secondo livello di approfondimento)*
2. *grande dettaglio e bassa penetrazione per gli studi di* ***risposta sismica locale*** *(terzo livello di approfondimento)*

Un primo esempio riguarda il territorio di S.Gimignano (SI). Si tratta di uno studio finanziato dalla Regione Toscana ed è finalizzato alla valutazione del Rischio sismico delle Torri

Le torri medioevali di S.Gimignano rappresentano infatti un patrimonio UNESCO e sono una importante attrazione turistica della Toscana

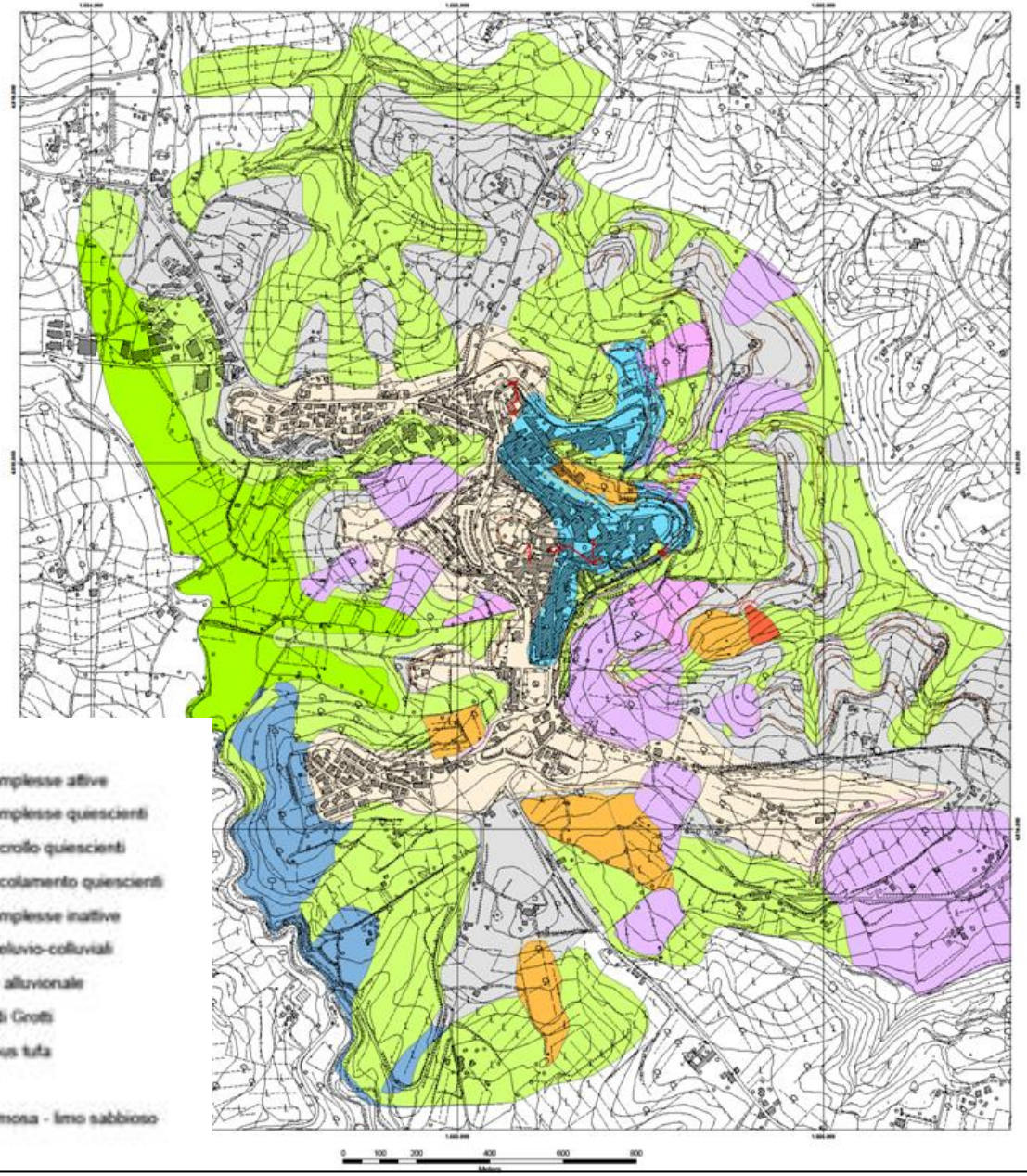
Nonostante il fatto che la pericolosità sismica della Toscana Centrale non possa essere consiedrato elevato, diversi eventi sismici nel passato hanno colpito S.Gimignano con intensità macrosismiche che hanno raggiunto il VII grado IMCS (pari a quelle dell'ultima sequenza sismica del maggio-giugno 2012 nella Pianura Padana)



La microzonazione sismica del territorio comunale secondo gli ICMS è stato uno dei primi obiettivi del progetto

Carta Geologica

Il primo passo è stato l'elaborazione di una carta geologica e geomorfologica del territorio comunale



Sono state identificate 4 formazioni principali

Sintema Campiglia dell'Elsa (Calcari Tufa, Pleistocene) => formazione caratterizzata da diverse litofacies continentali contenenti silt calcarei bianchi or sabbie fini intercalate da carbonati micritici con spessori che raggiungono il metro, spesso con stratificazione parallela e laminazione.

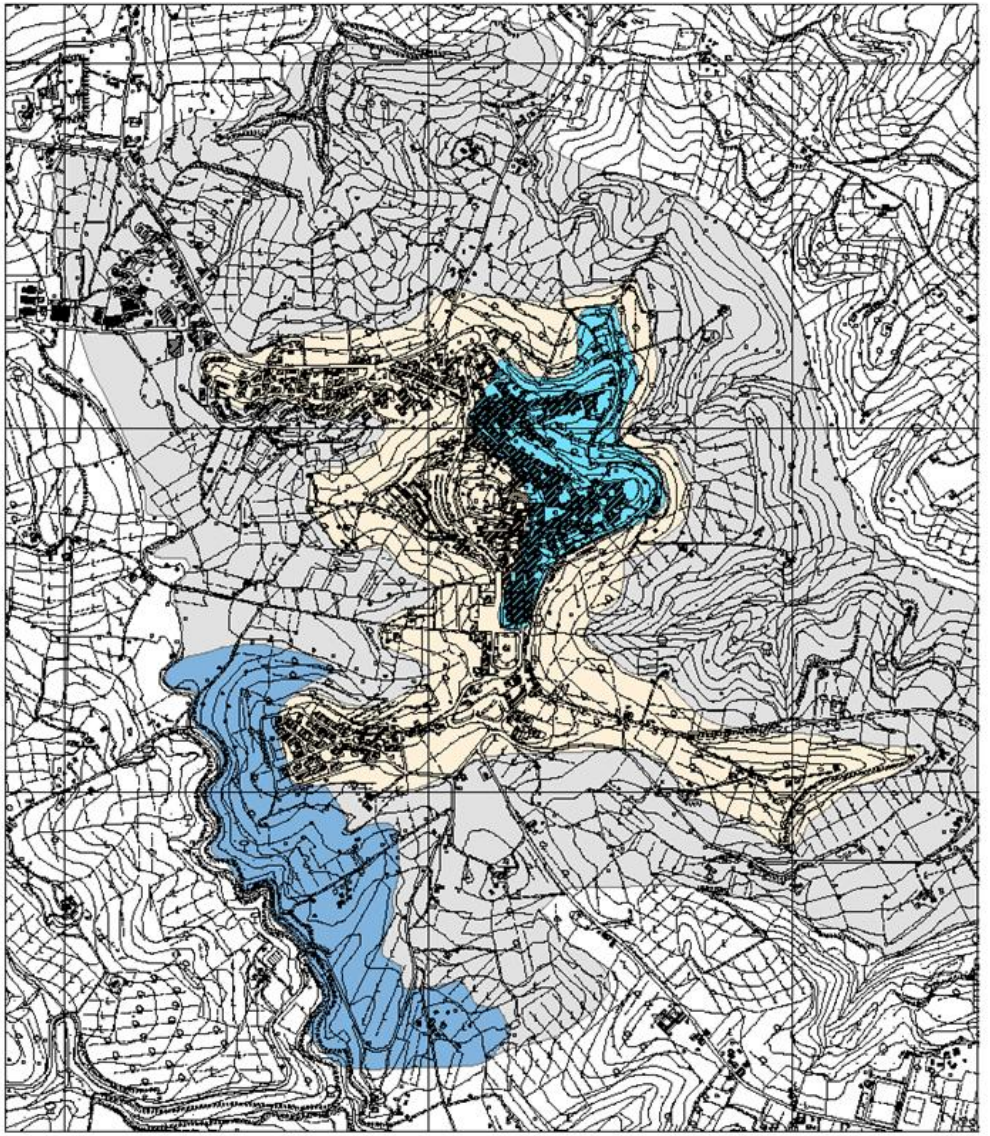
Sabbie di San Vivaldo (Pliocene) => formazione marina essenzialment composta da sabbie gialle (a granulometria medio-grossolana) spesso debolmente stratificata

Argille azzurre (Pliocene) => formazione marina di limi e sabbie fini grigie. La stratificazione è assente con presenza diffusa di molluschi marini.

Breccia di Grotti (breccia calcarea, Miocene) => formazione continentale di clasti e detriti di roccie carbonatiche (essenzialmente Calcare Cavernoso). I clasti hanno dimensioni fra pochi cma qualche dm con alterazione. La matrice sabbiosa e poco comune e consiste di sabbia medio-grossolana

Carta Litologica

Dalla carta geologica è stata estratta una carta litologica



Legenda

- Breccia di Grotti
- Calcari tufa
- Sabbie
- Sabbie Argillose

É stata quindi pianificata una campagna di misure geofisiche volta a identificare

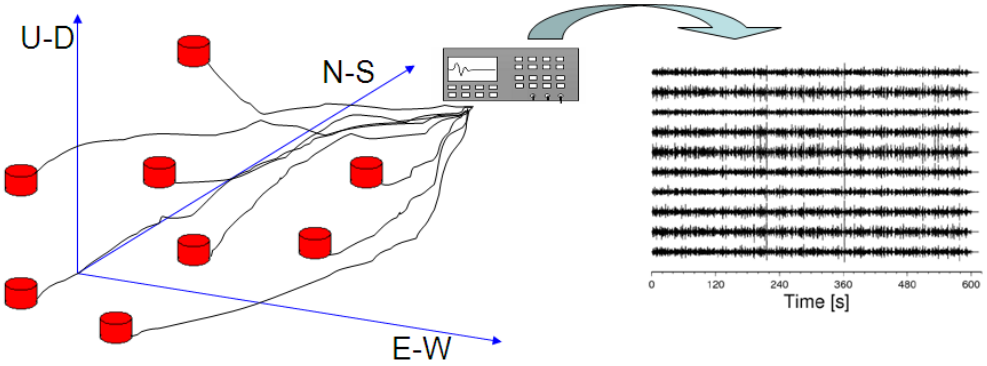
1. *la presenza di possibili fenomeni di risonanza responsabili di effetti di amplificazione sismica nel campo di frequenze di interesse ingegneristico*
2. *i contatti geologici associati a variazioni significative dell'impedenza sismica (Contrasti di Vs)*
3. *topografia sepolta di questi contatti*
4. *il basamento sismico ovvero il terreno di riferimento dove applicare il moto di input per analisi RSL*
5. *Aree dove la presenza di possibili effetti 2D/3D rendessero necessaria il terzo livello di approfondimento*

A questo scopo abbiamo utilizzato metodi di sismica passiva che garantivano una buona penetrazione a fronte di bassi costi di esercizio per unità di volume di sottosuolo esplorato e bassi livelli di occupazione

Per integrare le misure disponibili abbiamo utilizzato due tecniche di indagine di sismica passiva

Misure a stazione singola con la tecnica HVSR per la determinazione di fenomeni di risonanza e vincolare, in maniera almeno preliminare, la profondità dei possibili contrasti di impedenza sismica nel sottosuolo

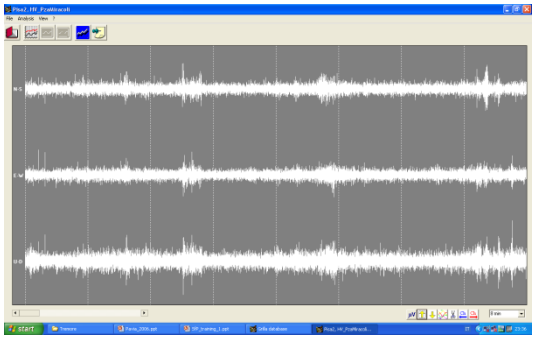
Misure di vibrazioni ambientali su antenna sismica (ESAC technique) per la determinazione della curva dispersione delle onde di Rayleigh che, invertite congiuntamente alle curvfe HVSR permettessero di definire un profilo di Vs rappresentativo della situazione locale

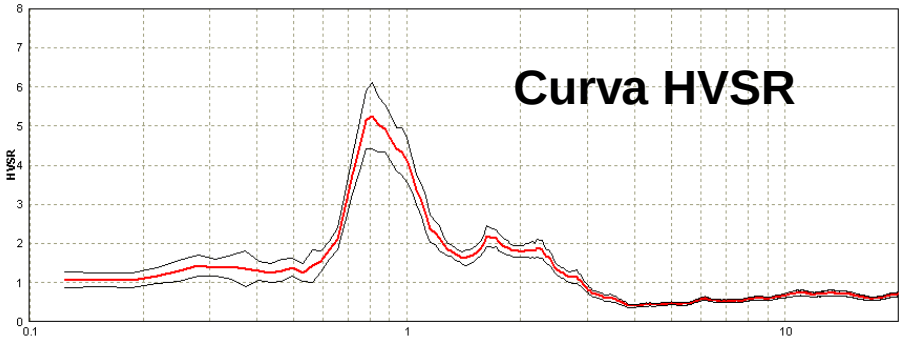


Il metodo della stazione singola è piuttosto semplice e richiede un solo operatore

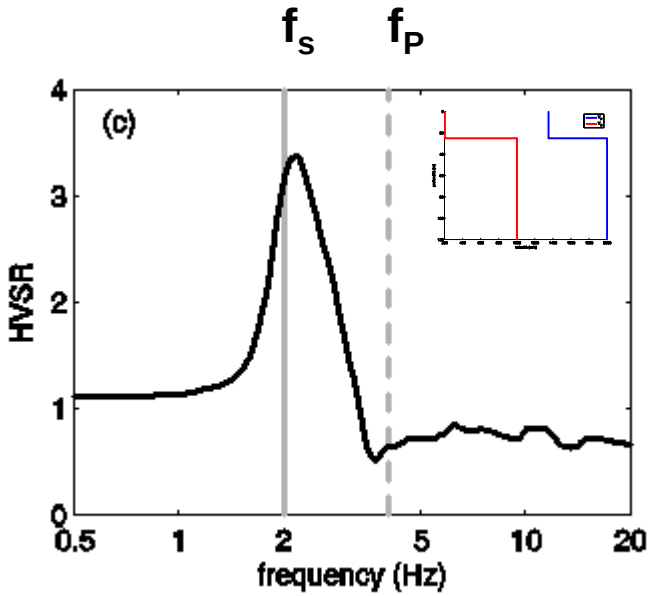
Si tratta infatti di misurare con un sismometro a tre componenti le vibrazioni ambientali presenti in un punto e quindi costruire una curva rappresentativa dei rapporti spettrali (H/V) in funzione della frequenza di vibrazione

Gli eventuali massimi saranno indicativa della possibile presenza di fenomeni di risonanza

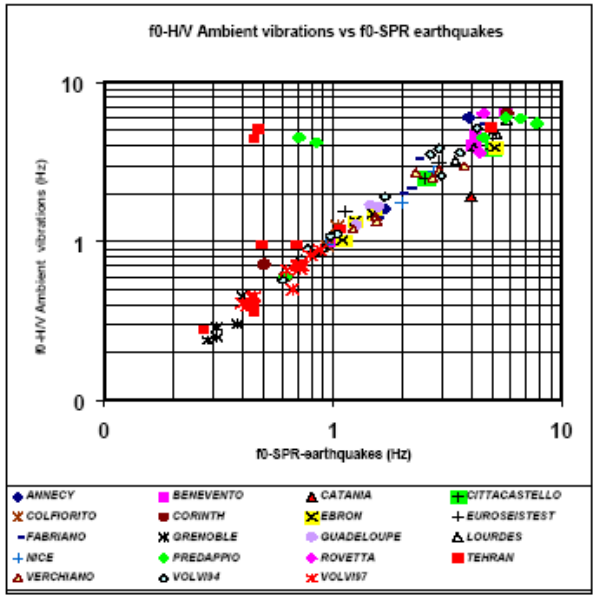


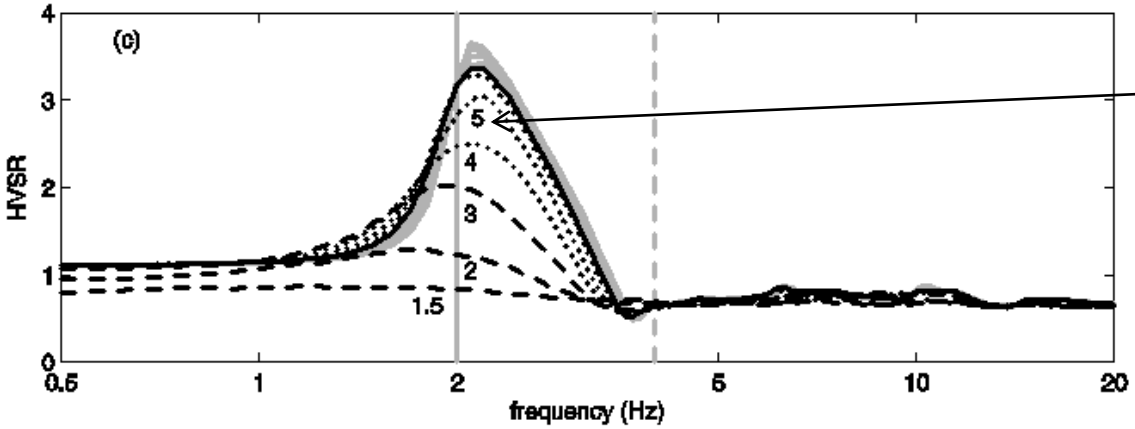


Simulazioni numeriche e dati osservativi indicano che



La posizione dei massimi dei rapporti spettrali mostra una buona correlazione con le frequenze di risonanza delle onde S (f_o=V_S/4H)





Per contrasti di impedenza bassi o nulli il picco sparisce e la sua ampiezza aumenta con l'aumentare del contrasto (in modo non lineare)

Un elemento chiave è la corretta esecuzione della misura

L'esecuzione della misura presenta due ordini di problemi

Il primo è legato ai ridotti valori di ampiezza del segnale

Trattandosi infatti di valori di ampiezza ridotti, le modalità di accoppiamento dello strumento con il suolo giocano un ruolo essenziale

Le analisi condotte indicano infatti che lo strumento andrebbe accoppiato direttamente al terreno libero, evitando materiali troppo soffici (fango o neve soffice per esempio). Bisogna anche evitare che elementi disturbo, agendo direttamente sul sensore, ne possano influenzare il comportamento modificandone l'assetto o indicendo movimenti anche piccoli ma comunque registrabili (contatto con fili d'erba, vento forte o pioggia sullo strumento, ecc.)

In linea di massima ed in presenza di un forte vento edifici elevati o alberi nelle immediate vicinanze del punto di misura possono disturbarla. Tuttavia questo effetto diviene trascurabile appena ci si allontana di qualche metro dai piedi della struttura

Riguardo alla durata complessiva delle misura

1. Se l'intervallo di frequenze di interesse è quello più alto (> 1Hz) sono le sorgenti antropiche a "guidare" il gioco. In questo caso è necessario adottare un intervallo di misura tale da garantire l'attivazione di un numero adeguato di sorgenti all'intorno del ricevitore. In aree urbane, potrebbero bastare allo scopo pochi minuti di misura. Questi però potrebbero non essere sufficienti in aree meno urbanizzate dove il rumore è più scarso. In generale, si consigliano misura di almeno 20 minuti

2. Se l'intervallo di frequenze è quello più basso (<0.5 Hz), allora può essere utile prolungare l'intervallo di misura (30 min - 1 ora) tenendo presente che, in generale, il segnale può essere molto debole (si tratta di sorgenti remote di grandi dimensioni). In presenza di forti perturbazioni (non necessariamente nella zona di misura) può invece essere sufficiente la durata standard di 20 minuti

3. La frequenza di campionamento deve invece essere adeguata all'intervallo di frequenze di interesse (frequenza di Nyquist): non deve essere inferiore a 50 Hz, se si vuole stimare lo spettro sino ad almeno 20 Hz.

Il secondo aspetto riguarda il carattere “statistico” dell’osservabile considerato, che a sua volta romanda a due problemi: quello della rappresentatività del campione di dati e quello della caratterizzazione statistica dell’osservabile (ampiezza spettrale media)

Riguardo al primo problema, le misure vanno eseguite in modo da campionare adeguatamente le diverse sorgenti in modo da eliminare l’effetto caratteristiche di ciascuna. Questo richiede misure di “lunga durata” (dell’ordine delle decine di minuti)

Per quanto riguarda il secondo problema, si utilizzano le tecniche standard per la definizione dello spettro (detrend, padding e tapering) oltre che procedure specifiche per la determinazione delle caratteristiche spettrali medie (metodi di Daniell e Bartlett)

In particolare, la procedura si divide in due fasi

1. *Determinazione degli spettri e dei rapporti spettrali su sotto-finestre del segnale*
2. *Determinazione dello spettro medio del rapporto spettrale medio*

Ciascuna procedura richiede delle scelte che possono condizionare i risultati

La Classificazione delle misure H/V

Obiettivo della classificazione è fornire una indicazione immediata circa la qualità delle singole misure H/V, con lo scopo di aiutare gli operatori nella fase interpretativa e nel confronto con altri dati osservati. Questo tipo di classificazione trova il suo principale impiego nella redazione delle mappe delle indagini relative al livello 1 della microzonazione sismica. I criteri proposti sono più rigidi di quelli di SESAME in quanto includono elementi di giudizio non contemplati in precedenza, quali:

1. durata complessiva della registrazione che deve essere tale da produrre stime “robuste” del campo medio delle vibrazioni ambientali
2. stazionarietà temporale dei rapporti spettrali
3. isotropia del segnale in termini dei rapporti spettrali
4. assenza di disturbi di origine artificiale
5. andamento complessivo della curva H/V

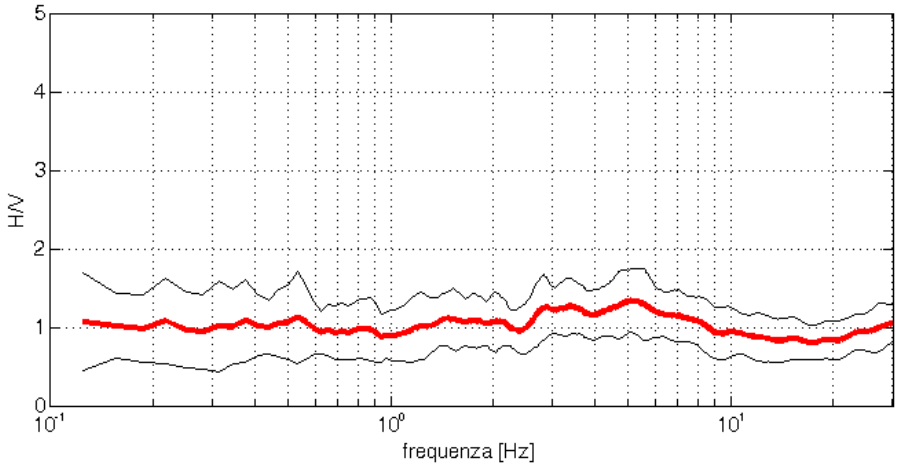
Si confrontano misure ottenute con spettri lisciati con una finestra triangolare al 5% della frequenza centrale. Valori maggiori dell’ampiezza della finestra di lisciamento possono essere utilizzati per migliorare la leggibilità della curva in fase di interpretazione.

Vengono proposte tre classi di qualità:

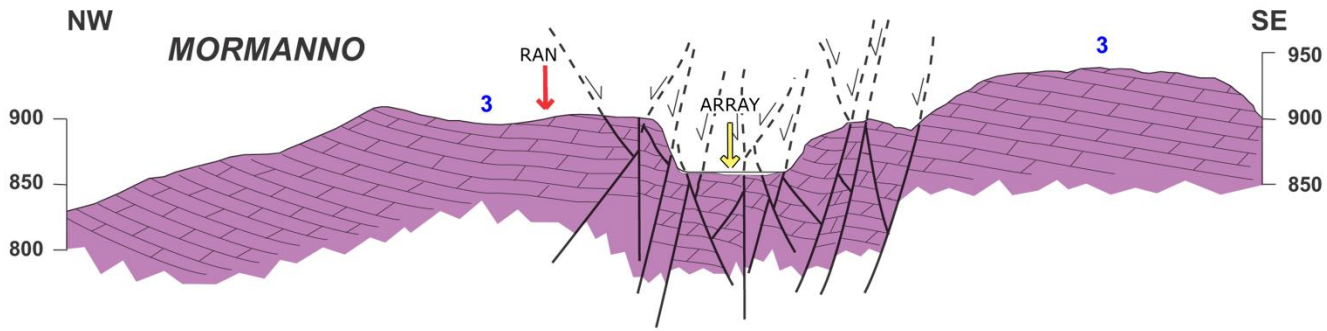
Classe A: H/V affidabile e interpretabile: <u>può essere utilizzata anche da sola per la caratterizzazione sismica del sottosuolo</u>

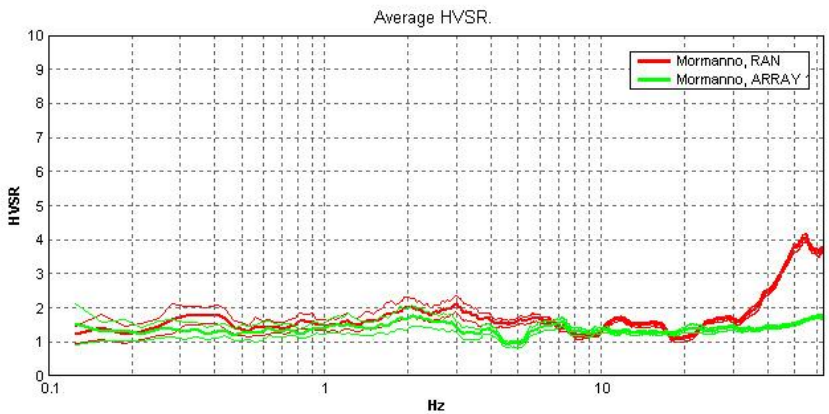
1. **la forma dell'H/V nell'intervallo di frequenze di interesse rimane stazionaria per almeno il 30% circa della durata della misura (*stazionarietà*)**
2. **le variazioni azimuthali di ampiezza non superano il 30% del massimo (*isotropia*)**
3. **non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse (*assenza di disturbi*)**
4. **i massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale (p*lausibilità fisica*)**
5. **i criteri di SESAME per una curva H/V attendibile (primi 3 criteri) sono verificati (*robustezza statistica*)**
6. **la misura è durata almeno 15/20 minuti (*durata*)**

ECCEZIONE: misure effettuate su roccia integra affiorante o in zone alluvionali fini con basamento sismico molto profondo (tipicamente > 1 km) possono non mostrare alcun picco statisticamente significativo della curva H/V nell'intervallo di frequenze di interesse ingegneristico, a causa dell'assenza di contrasti di impedenza sufficientemente marcati. In questi casi, in cui la curva H/V apparirà piatta e con *ampiezza circa pari a 1*, il criterio 5 risulterà non verificato anche se la misura è di fatto attendibile. In questo solo caso la misura può ricadere nella classe A ma si consiglia di ripetere la misura per confermare l'effettiva assenza di massimi significativi.



Indagine esplorativa del territorio comunale di Mormanno (Cosenza)





In assenza di contrasti di impedenza sismica significativi, la curva HVSR è "piatta" (non ci sono massimi significativi) e non ci sono variazioni laterali significative

Classe B: **curva H/V "sospetta": <u>va utilizzata con cautela e solo se coerente con altre misure ottenute nelle vicinanze</u>**

1. **almeno una delle condizioni della classe A non è soddisfatta, a condizione che non si rientri nell'ECCEZIONE citata per la Classe A**

Classe C: **curva H/V scadente e di difficile interpretazione: <u>non va utilizzata</u>**

1. **misura di tipo B nella quale la curva H/V mostra una ampiezza crescente al diminuire della frequenza (deriva), indice di un movimento dello strumento durante la misura**
2. **misura di tipo B nella quale si evidenza la presenza di rumore elettromagnetico nell'intervallo di frequenze di potenziale interesse**

I criteri delineati sopra non riguardano l'interpretazione in chiave geologico-stratigrafica della curva, per la quale sono richiesti ulteriori criteri (per esempio i criteri SESAME per la "chiarezza" del picco).

Per le sole Classi A e B si possono pertanto definire due sottoclassi delle classi precedenti, ossia:

Tipo 1. Presenta almeno un picco "chiaro" secondo i criteri di SESAME: *possibile risonanza*

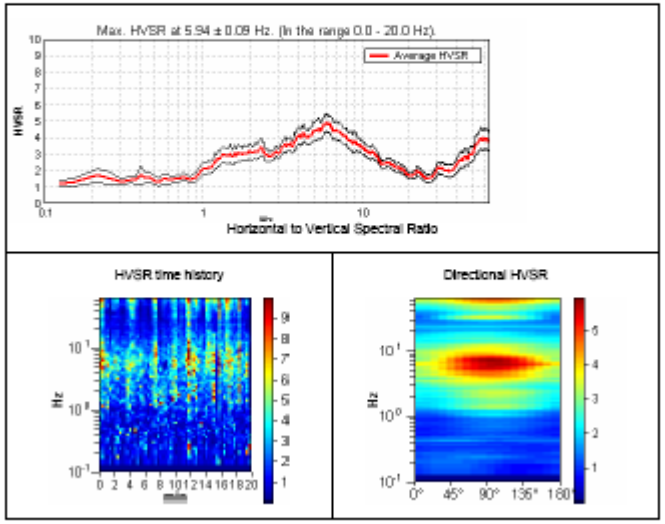
Tipo 2. Non presenta picchi "chiari" nell'intervallo di frequenze di interesse: *assenza di risonanza*

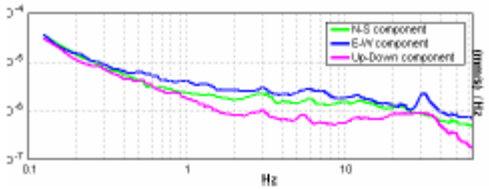
Ogni misura è stata corredata da una relazione tecnica con le caratteristiche principali dell'analisi, informazioni sulla localizzazione delle misure e relativi criteri di qualità in modo che successivamente sia possibile interpretare correttamente il dato

Fossa_TN, Parcheggio M4BIS

Start recording: 18/06/09 17:07:47 End recording: 18/06/09 17:27:48
GPS data not available

Trace length: 0h20'00". Analysis performed on the entire trace.
Sampling frequency: 128 Hz
Window size: 20 s
Smoothing window: Triangular window
Smoothing: 5%





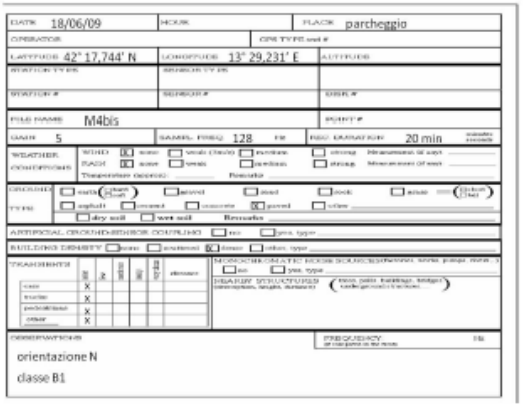
[According to the Sesame, 2005 guidelines. Please read carefully the *Grilla* manual before interpreting the following tables.]

Max. HVSR at 5.94 ± 0.08 Hz. (in the range 0.0 - 20.0 Hz).

Criteria for a reliable HVSR curve (All 3 should be fulfilled)			
$f_0 > 10 / L_w$	5.94 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	7125.0 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.6f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.6Hz$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.6f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.6Hz$	Exceeded 0 out of 285 times	OK	
Criteria for a clear HVSR peak (At least 5 out of 6 should be fulfilled)			
Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ | $A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$			NO
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ | $A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$	13.25 Hz	OK	
$A_0 > 2$	4.93 > 2	OK	
$f_{peak}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	|0.00746| < 0.05	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.04432 < 0.29688	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.2628 < 1.58	OK	

L_w	window length
n_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{HV}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{HV}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{HV}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{HV}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{HV}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{log HV}(f)$	standard deviation of log $A_{HV}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$					
Freq.range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [-Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
Log $\theta(f_0)$ for $\sigma_{logHV}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20



Criteri SESAME

Misure HVSR

Legenda

- <1 Hz
- 1 - 2 Hz
- 2 - 4 Hz
- 4 - 8 Hz
- >8 Hz
- no peak

Sono stati identificati fenomeni di risonanza (deboli) in tutta l'area con ferquenze decrescenti verso NE

È stata quindi tentata una prima interpretazione semi-quantitativa

Le misure forniscono infatti una stima diretta della **frequenza di risonanza** ν_0 delle coperture

La frequenza di risonanza del sedimento dipende dallo spessore H del sedimento e dalla velocità "media" ($\hat{V}$) delle onde S nel sedimento

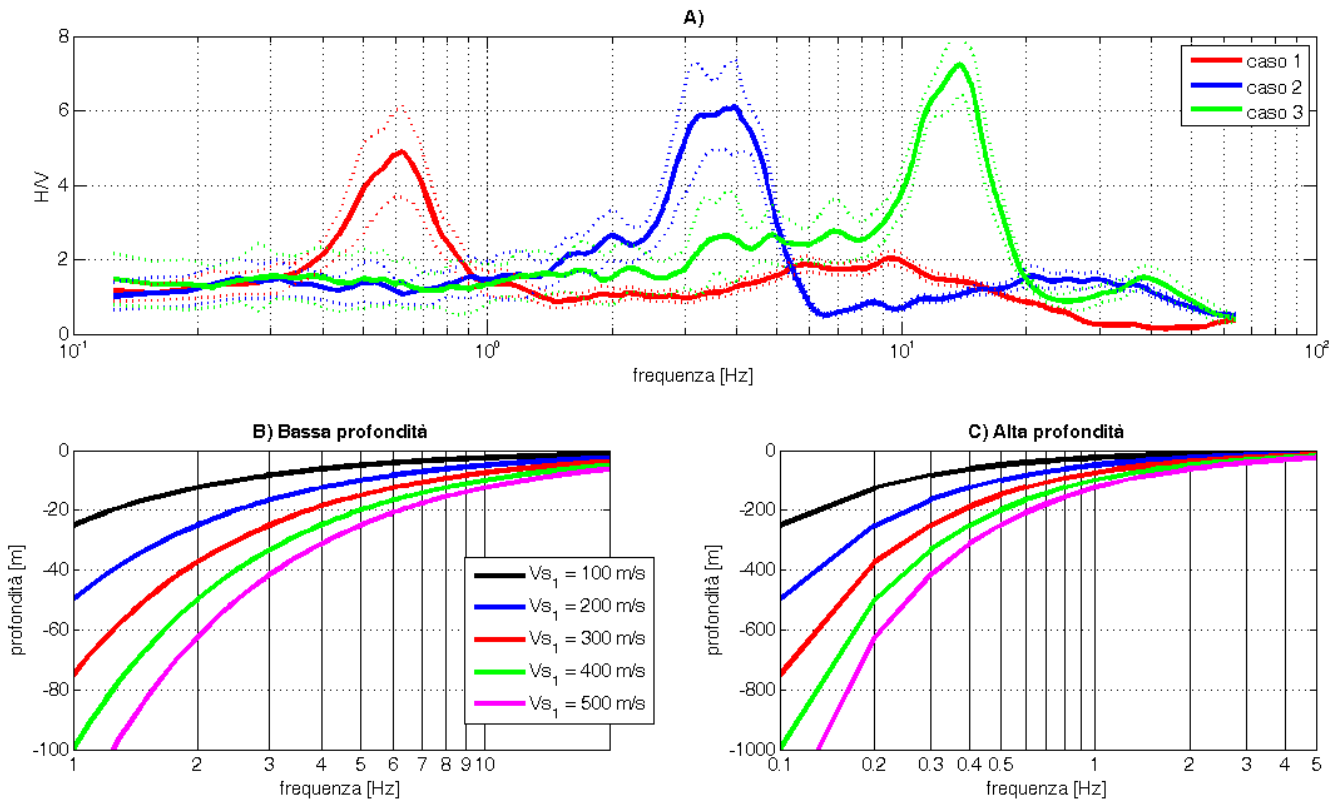
$$\boxed{\nu_0 = \frac{\hat{V}_s}{4H}}$$

$$\boxed{\hat{V}_s = 4H\nu_0}$$

$$\boxed{H = \frac{\hat{V}_s}{\nu_0 4}}$$

Conoscendo lo spessore H del sedimento (per esempio da sondaggi) è possibile avere informazioni sulla velocità "media" delle Onde S

Alternativamente, conoscendo quest'ultima è possibile definire lo spessore H dello strato sedimentario



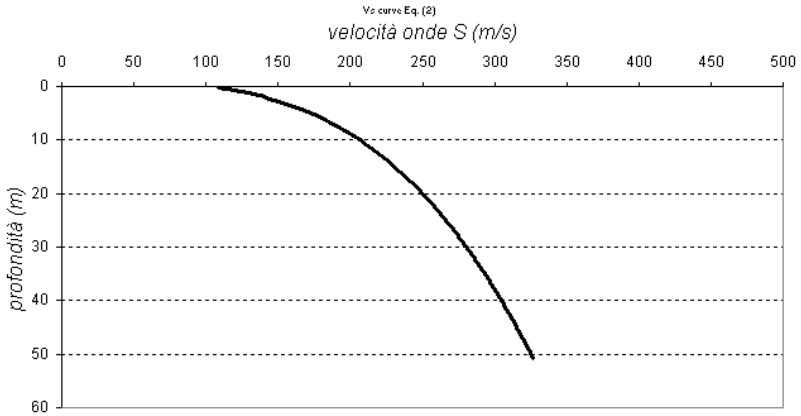
A) Esempio di bedrock sismico a diverse profondità che genera risonanze a diverse frequenze. Caso 1: bedrock a 300 m di profondità. Caso 2: bedrock a 20 m di profondità. Caso 3: bedrock a 4 m di profondità; B) relazione V-f_0-H alle medio-alte frequenze; C) relazione V-f_0-H alle medio-basse frequenze.

In alcuni casi è possibile formulare ipotesi ragionevoli riguardo al profilo di velocità

Per esempio, nel caso di corpi di sedimenti non consolidati, si può presumere che l'andamento medio del profilo di velocità sia controllato dal carico litostatico

In questo caso, per i mezzi granulari, è ragionevole ipotizzare un andamento delle Vs con la profondità H del tipo "Legge a potenza"

$$V_s(H) = V_0(1+H)^a$$



dove V_o e a dipendono dalle caratteristiche del sedimento (granulometria, coesione, ecc.)

l fine di provvedere una prima informazione di massima sulle caratteristiche delle zone caratterizzate da risonanza (valide solo in prima approssimazione e solo a fini esplorativi)sono stati prodotti degli abachi preliminari per:

1. *stimare la profondità del contrasto di impedenza responsabile degli effetti osservati*
2. *Valutare qualitativamente l'entità di questo contrasto*

Utilizzando questo strumento, le frequenze di risonanza possono tentativamente essere convertite in spessori permettendo una identificazione preliminare delle interfacce risonanti

Questo tipo di indagine **non ha sostituito analisi di dettaglio** ma ha avuto il solo scopo **(sotto stretto controllo geologico)** di fornire indicazioni preliminari sulla struttura del sottosuolo e orientare le indagini successive

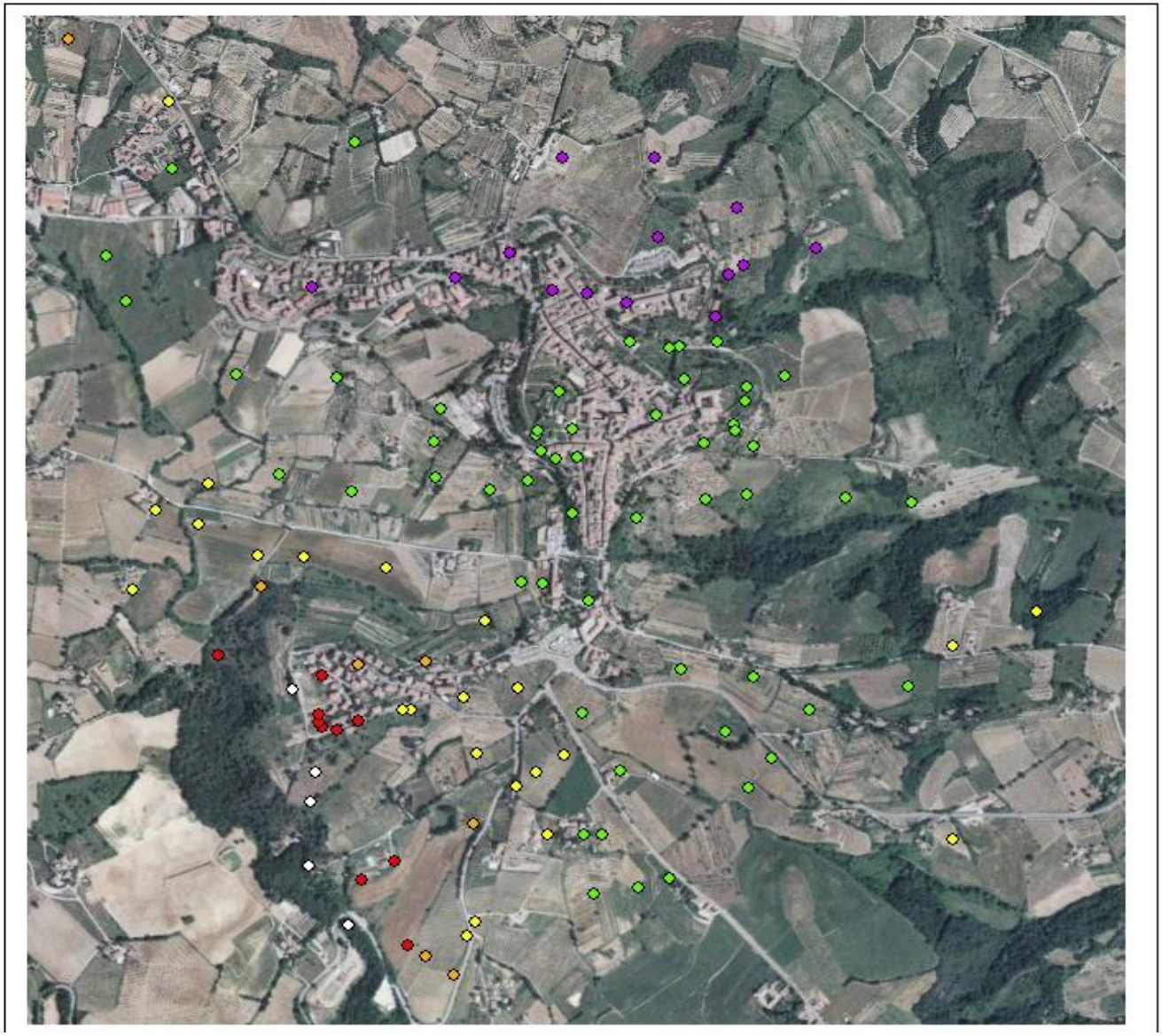
f_0 (Hz)	h (m)	
< 1	> 100	Centinaia di metri
$1 - 2$	$50 - 100$	Decine di metri
$2 - 3$	$30 - 50$	
$3 - 5$	$20 - 30$	
$5 - 8$	$10 - 20$	
$8 - 20$	$5 - 10$	Qualche metro
> 20	< 5	

H/V >3 Alto contrasto

2<H/V<3 Basso Contrasto

Misure HVSR

Abaco preliminare



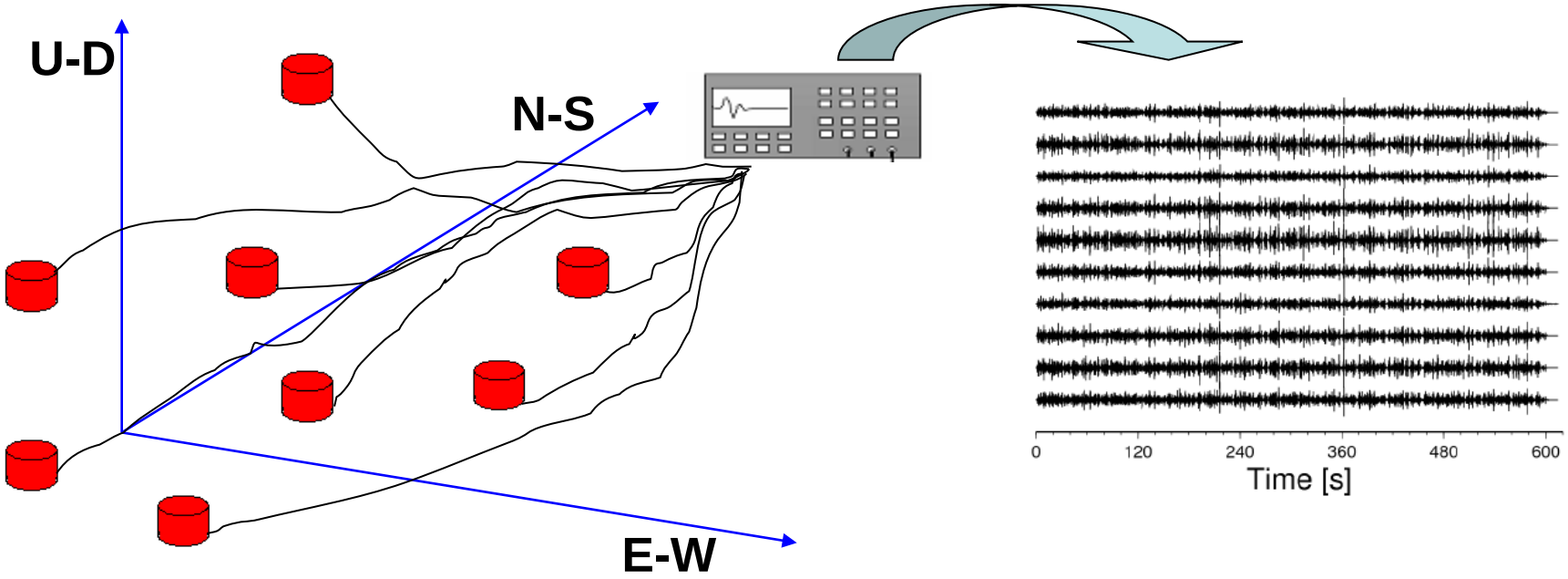
Legenda

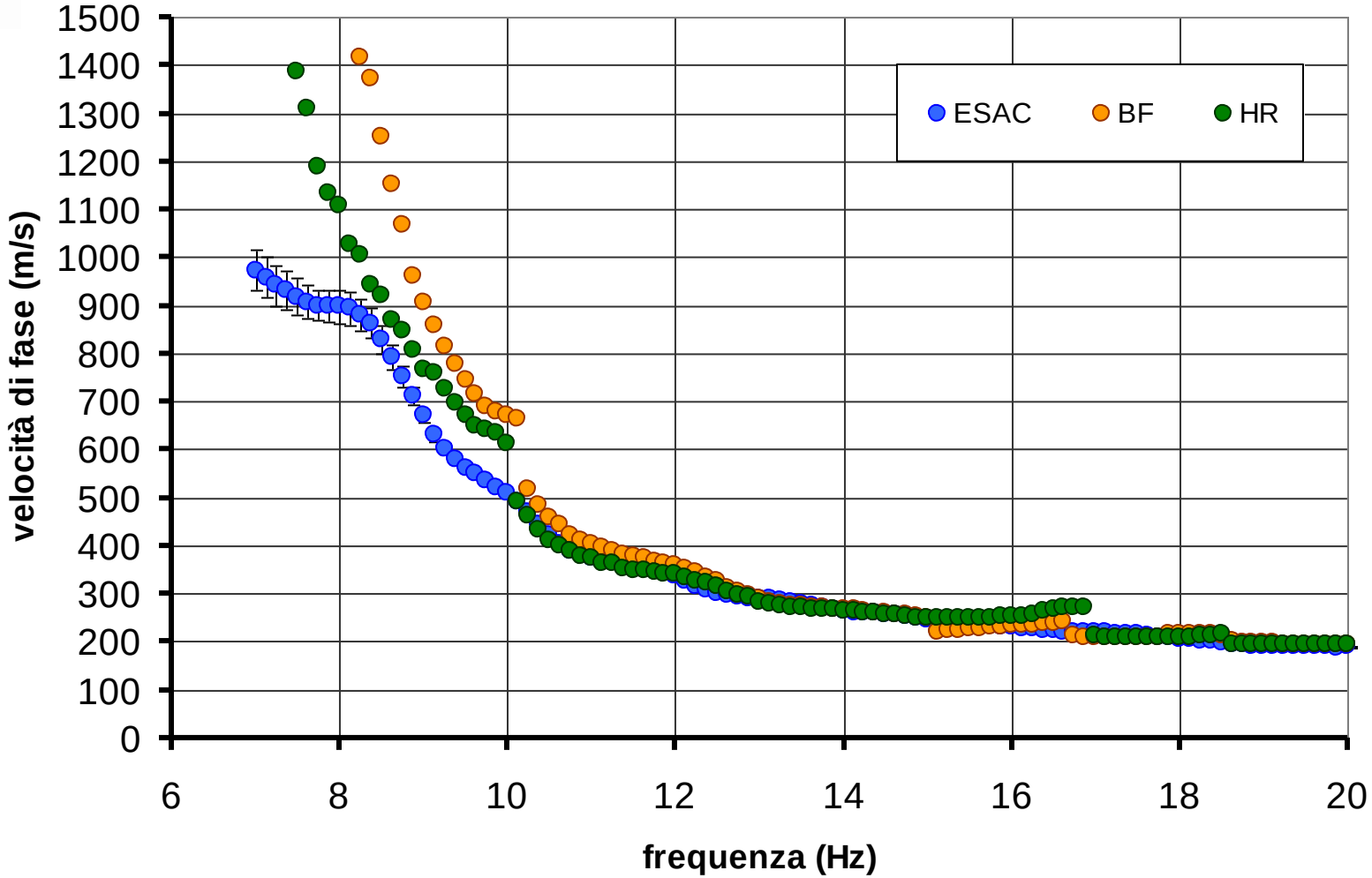
- <1 Hz
- 1 - 2 Hz
- 2 - 4 Hz
- 4 - 8 Hz
- **>8** Hz
- **no peak**

f_0 (Hz)	h (m)
< 1	> 100
$1 - 2$	$50 - 100$
$2 - 3$	$30 - 50$
$3 - 5$	$20 - 30$
$5 - 8$	$10 - 20$
$8 - 20$	$5 - 10$
> 20	< 5

Una antenna sismica è costituita da un insieme di sensori sismici sincronizzati distribuiti sulla superficie del terreno con geometrie variabili

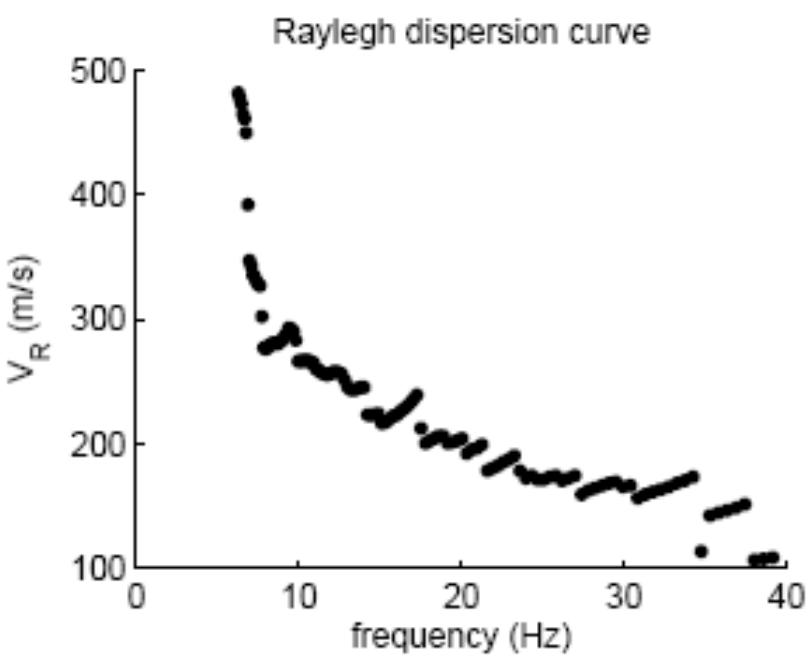
Le informazioni relative alle caratteristiche del sottosuolo vengono ottenute a partire da una analisi di correlazione fra i segnali registrati dai diversi sensori alle diverse frequenze

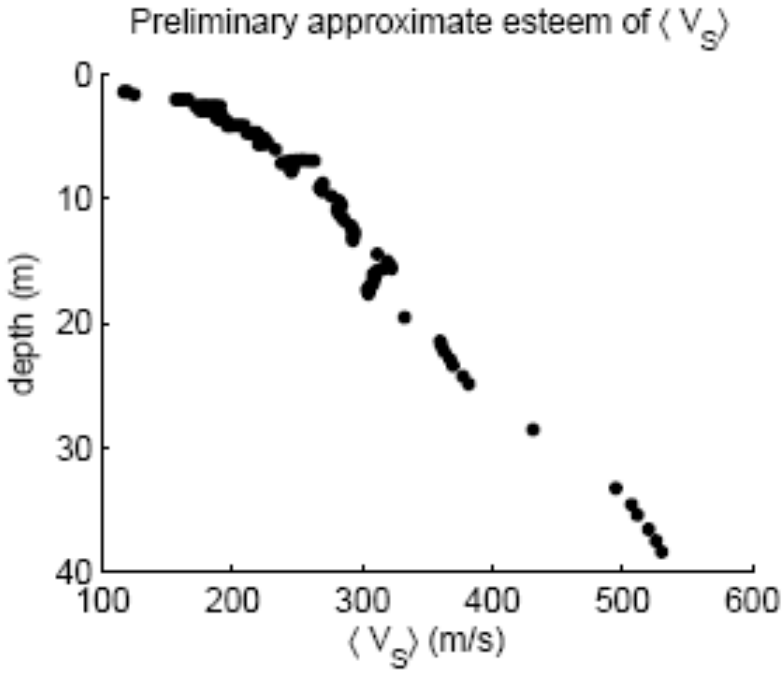




Se si utilizzano sensori verticali, le velocità di fase corrisponderanno a Onde di Rayleigh. Utilizzando sensori orizzontali è possibile analizzare le onde di Love. Analoghe curve di dispersione possono essere ricavate anche mediante tecniche di sismica attiva (MASW)

Anche per le curve di dispersione è possibile effettuate interpretazioni di tipo semi-quantitativo





$$\langle V_S \rangle_h \equiv 1.1 \cdot V_R(f) \qquad \text{with} \qquad h \equiv \frac{V_R(f)}{2f} \, .$$

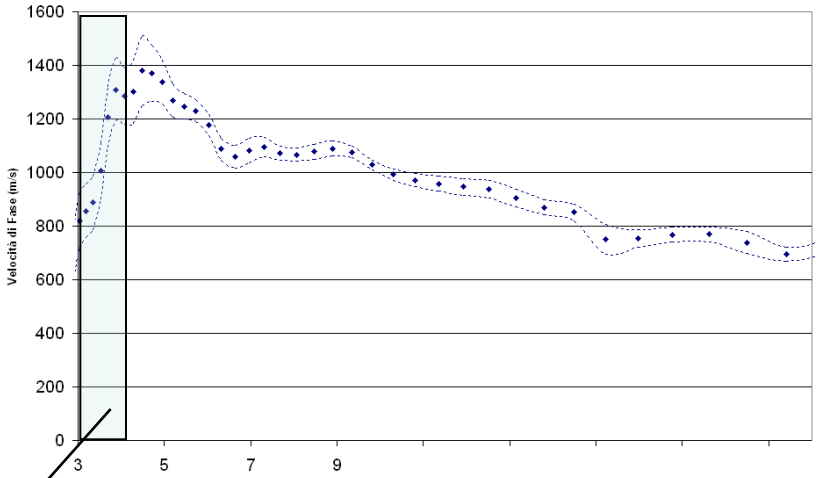
L'idea di base è che la velocità delle onde di Rayleigh corrispondenti ad una certa lunghezza d'onda λ siano rappresentative della velocità media delle onde S fino ad una profondità dell'ordine di una frazione di λ.

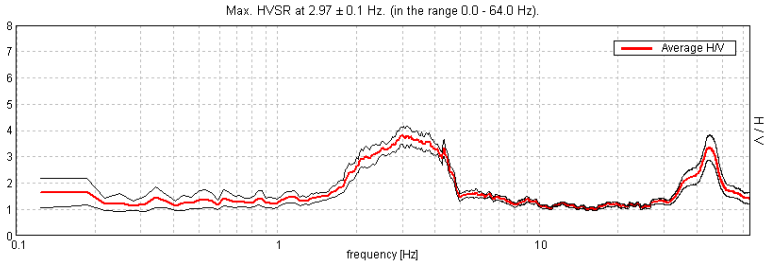
Per esempio, si può fare la ragionevole ipotesi che le velocità di fase delle onde di Rayleigh corrispondenti ad una certa lunghezza d'onda λ siano rappresentative della velocità media delle onde S fino ad una profondità dell'ordine di 0.5-0.8 λ (per Vs30 è opportuno λ=40)

La procedura per stimare grossolanamente la velocità media fino alla profondità *h* potrebbe essere la seguente

1. *La curva di dispersione $V_R(\nu)$ viene trasformata in una curva $V_R(\lambda)$ sfruttando la relazione $\lambda=V_R/\nu$*
2. *La curva $V_R(\lambda)$ viene trasformata in una curva Vs(h) sfruttando le relazioni $h=0.3\lambda$ e $Vs=1.1V_R$*
3. *La curva Vs(h) viene interpretata come indicativa della velocità media delle onde S fino alla profondità h*

Naturalmente questa interpretazione ha senso solo per frequenze al di sopra della frequenza di risonanza delle coperture



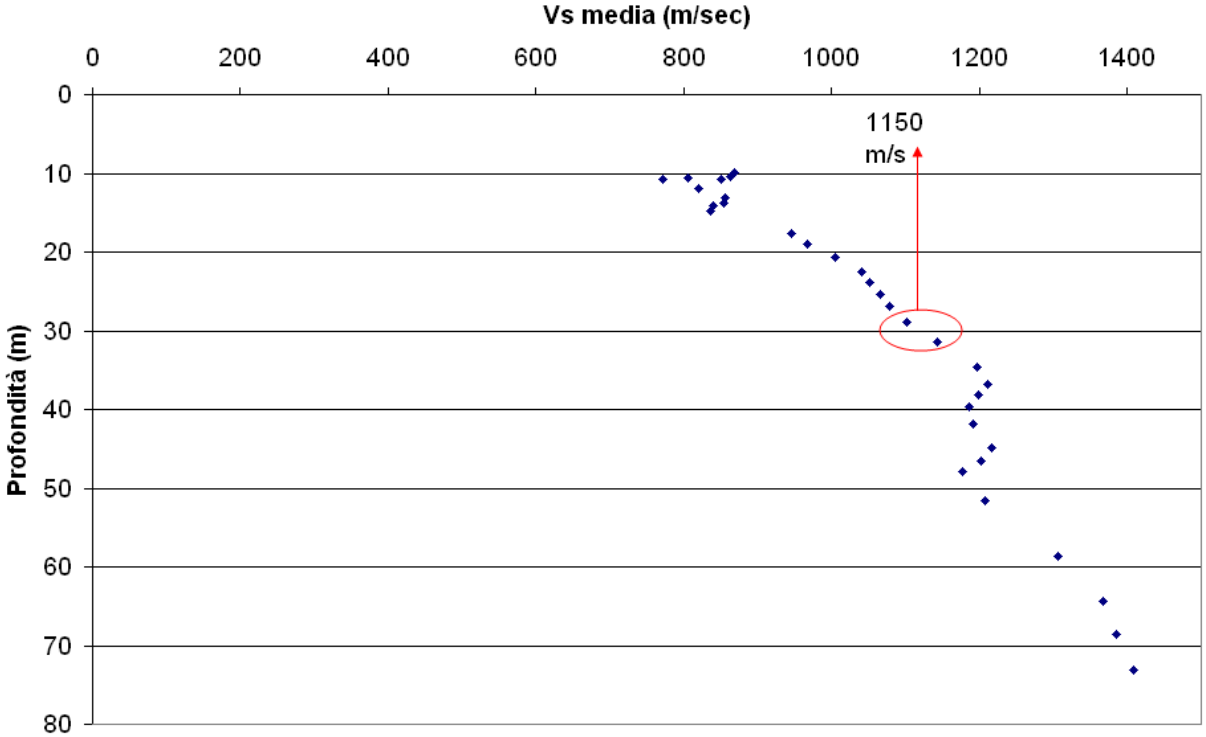


Frequenza di risonanza (HVSR)

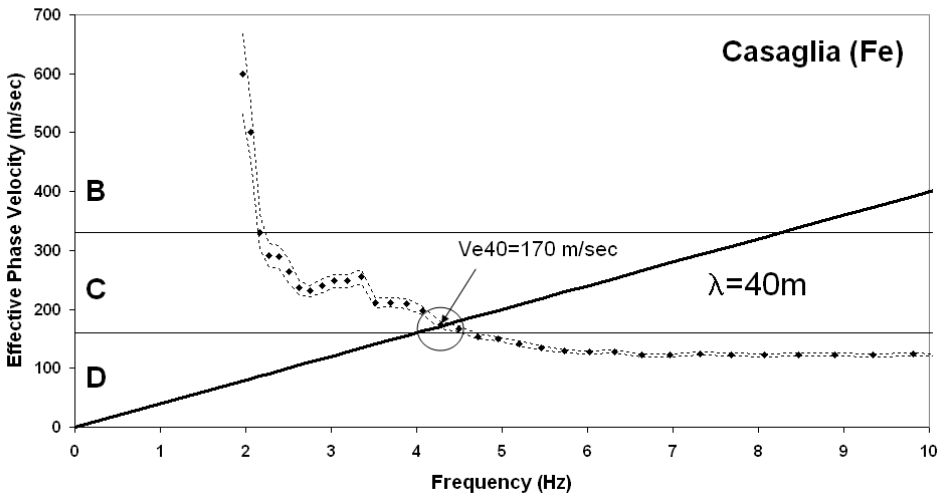
Sotto la frequenza di risonanza

Vs30 = 1150 m/s

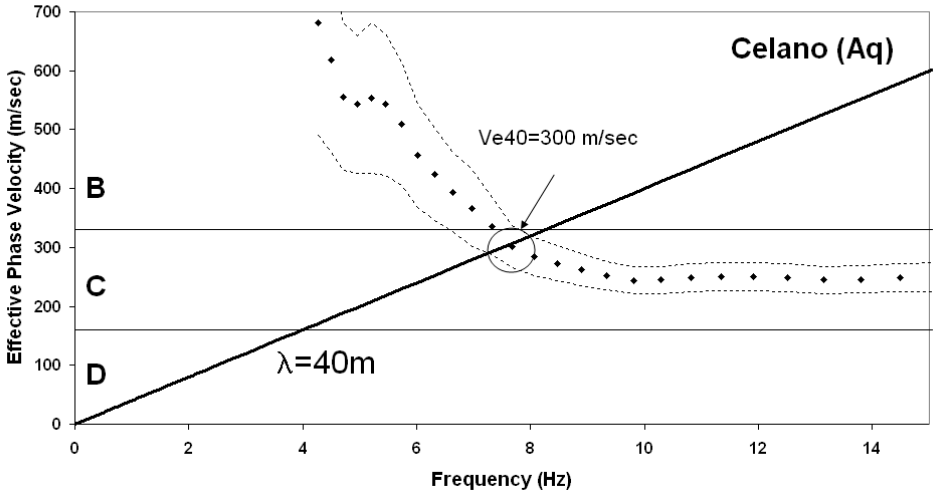
(Naturalmente è una stima approssimata!!!)



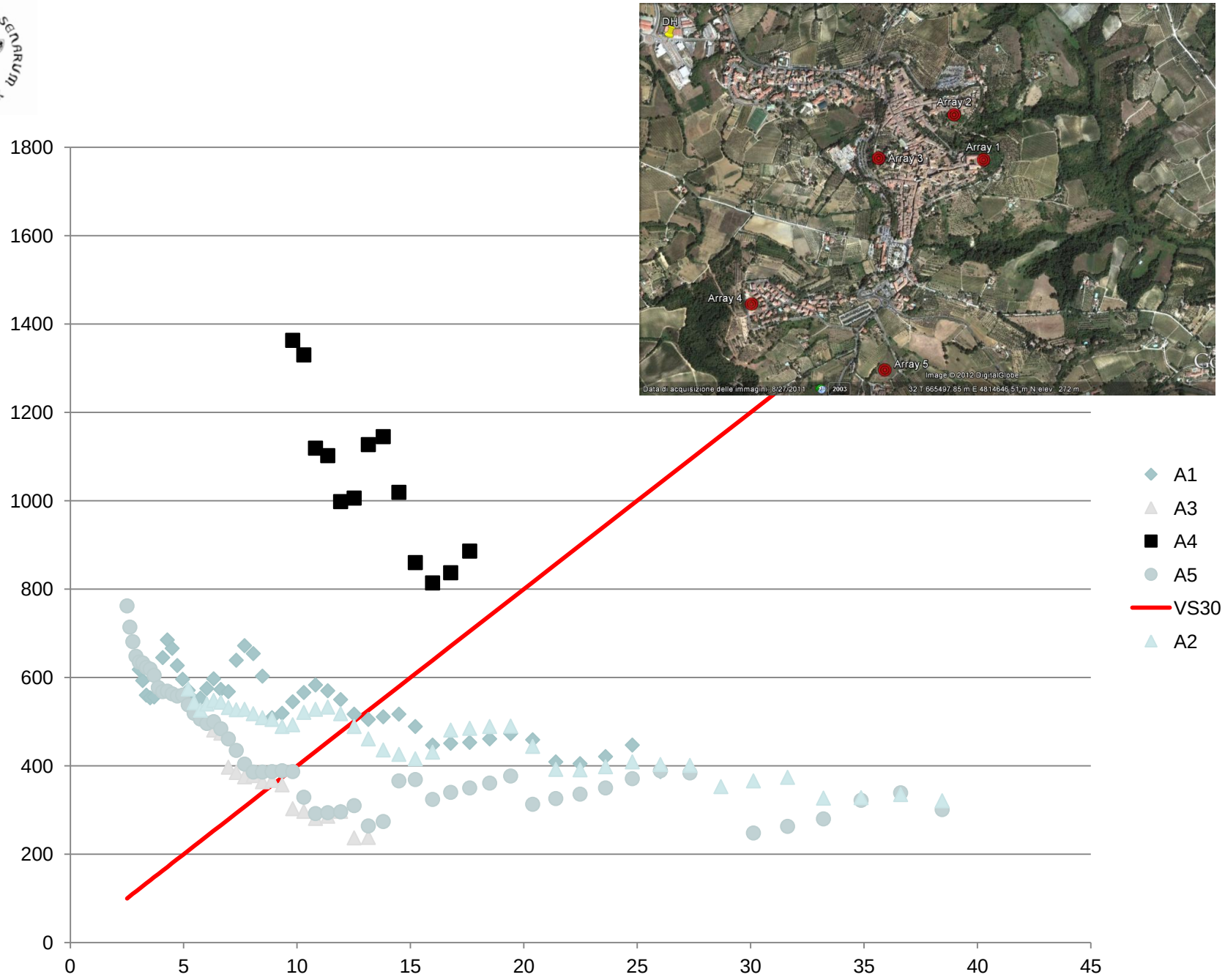
Il parametro V_s30 risulta leggermente superiore a 180 m/s pertanto la categoria di suolo è al limite tra C e D. Valore stimato tramite DH



Il valore, stimato tramite prova cross-hole, del parametro V_s30 è 330 m/s e la categoria di suolo è C.

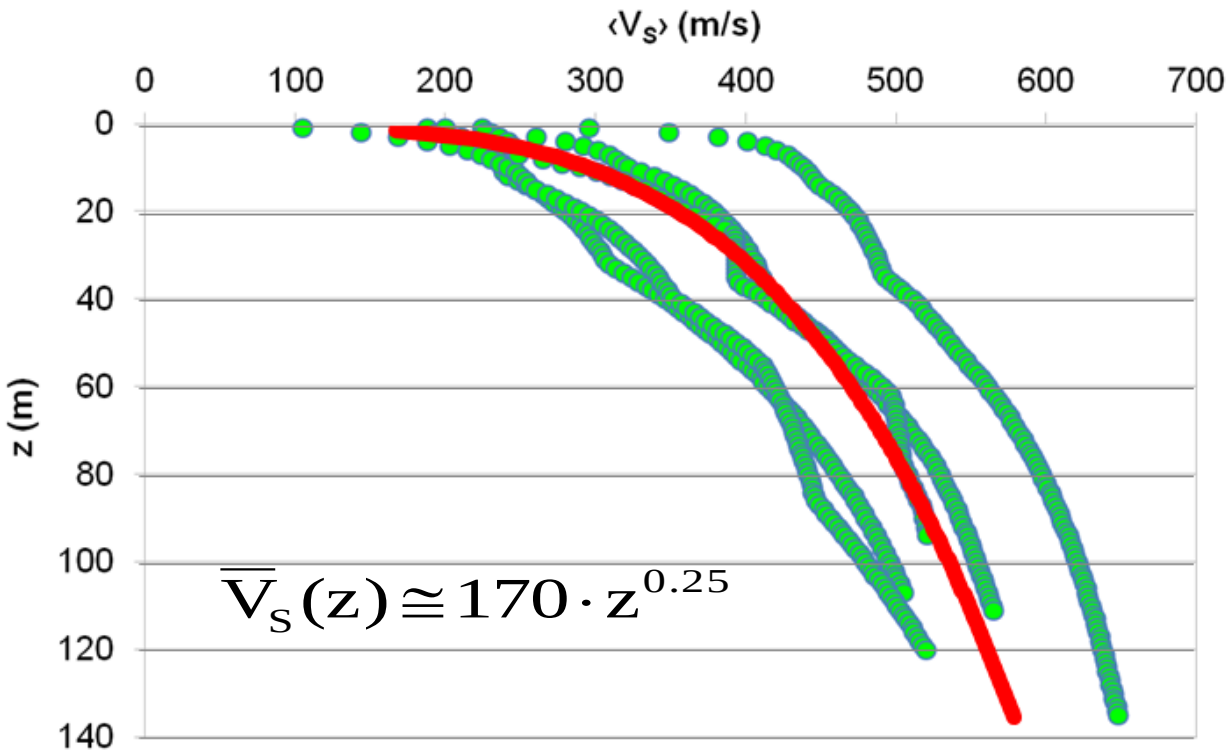


Misure su antenna sismica


1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
A1
A3
A4
A5
VS30
A2
DH
Array 2
Array 1
Array 3
Array 4
Array 5
Image © 2012 DigitalGlobe
Data di acquisizione delle immagini: 8/27/2011
2003
32 T 665497.85 m E 4814646.51 m N elev 272 m

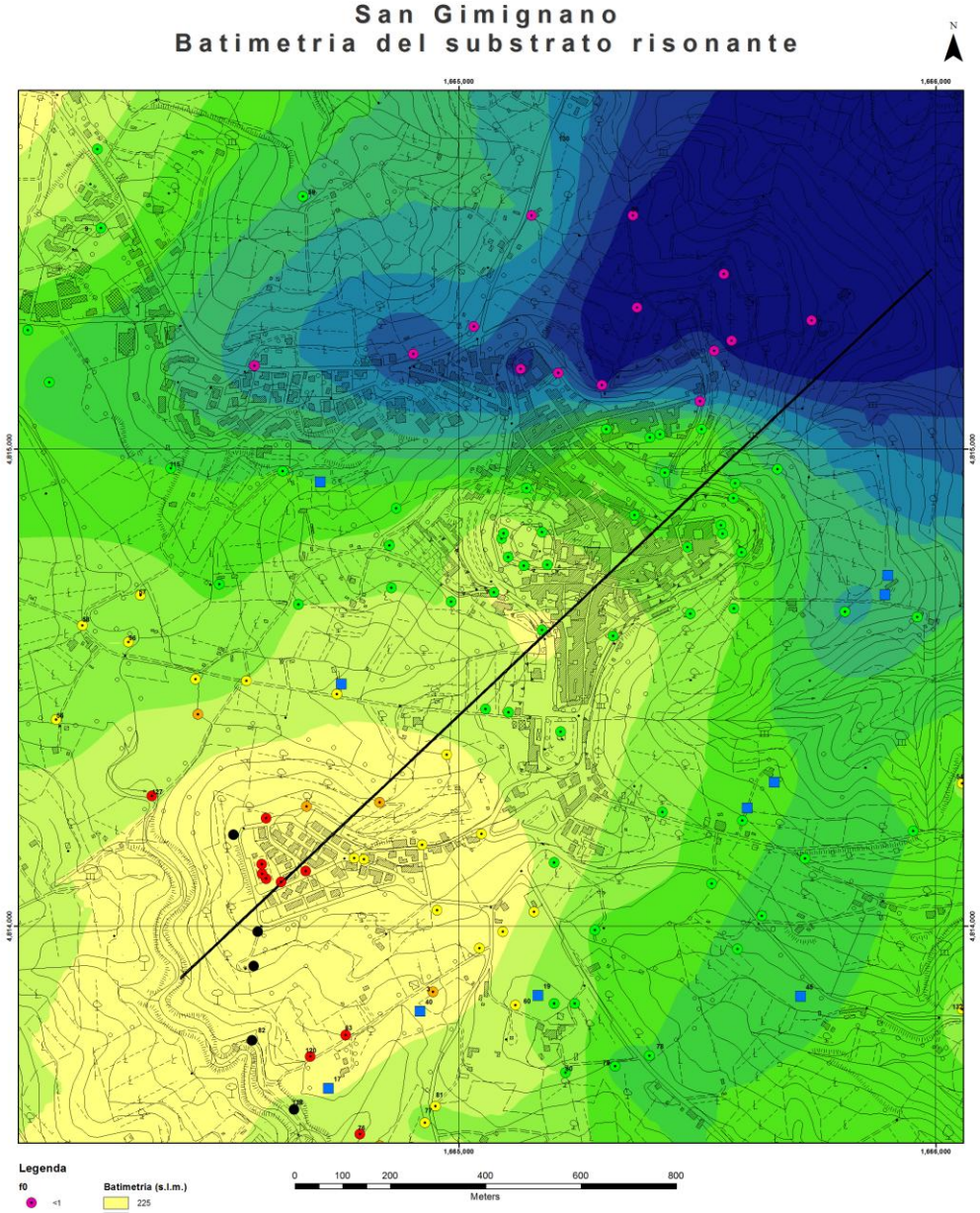
Sono state anche eseguite inversioni congiunte delle curve di dispersione e HVSR

I profili di velocità ottenuti sono stati utilizzati per validare l'abaco interpretativo utilizzato in prima approssimazione



$$H \approx A\nu^B$$

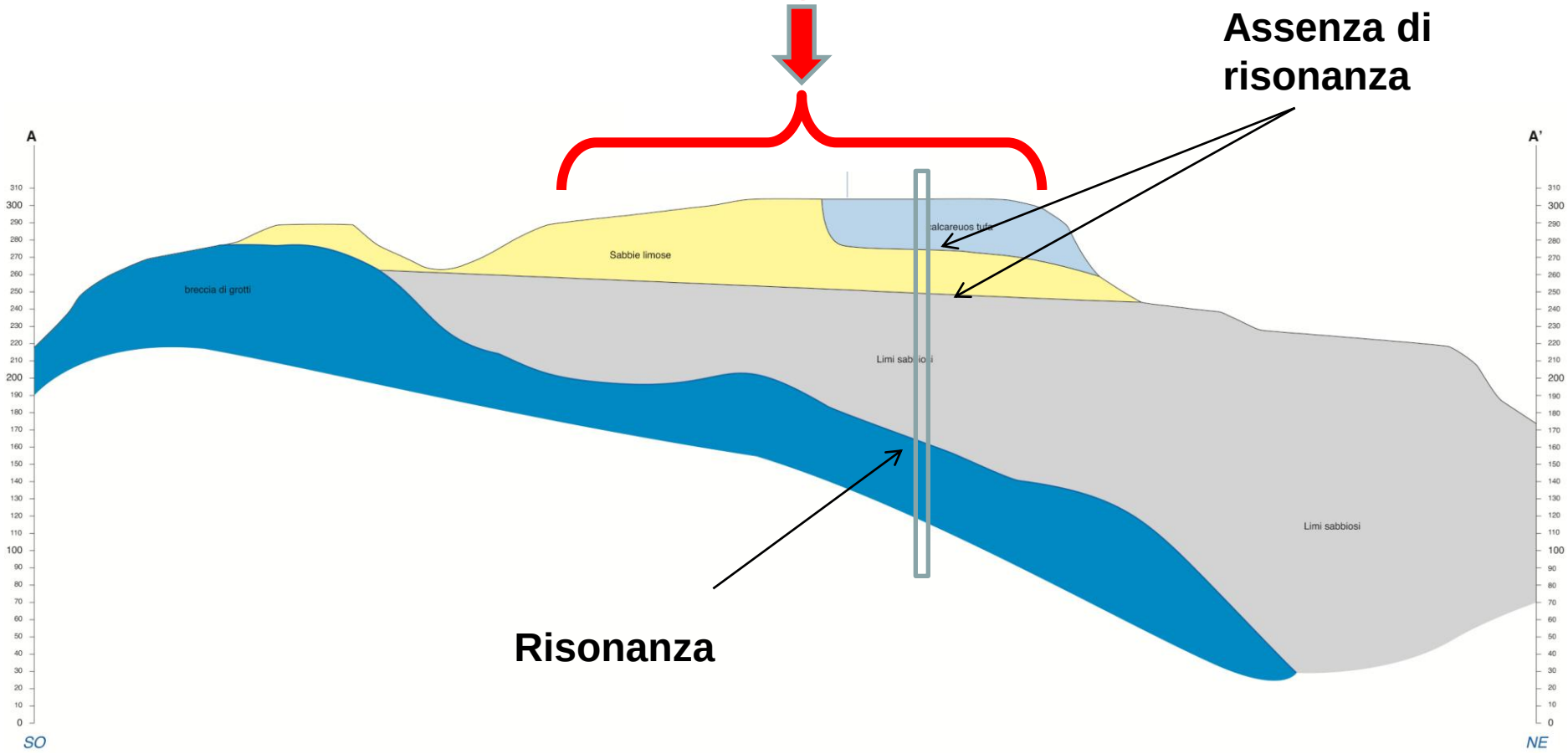
Batimetria del basamento



Legenda

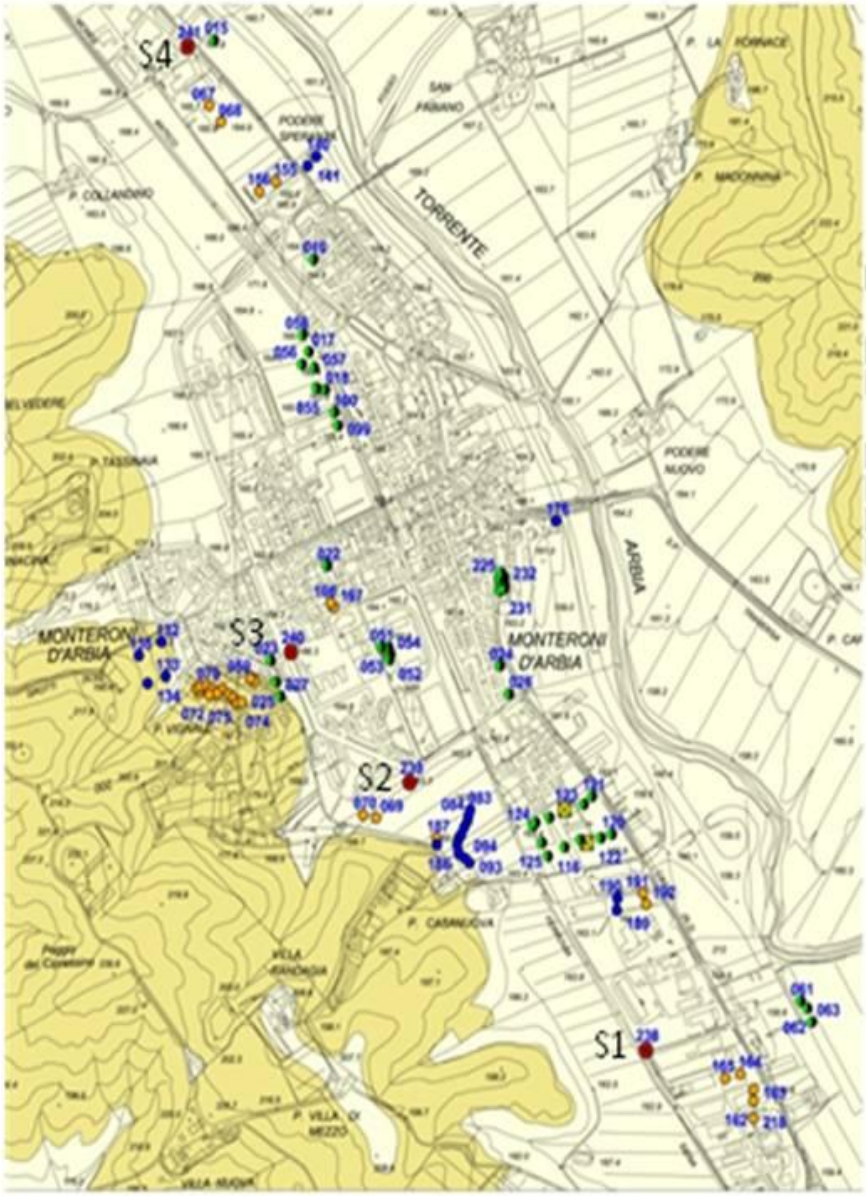
f0	Batimetria (s.l.m.)
<1	225
1-2	200
2-4	175
4-8	150
>8	125
no_picco	100
geol	75
	50
	25
	0
	-25

San Gimignano



SW **N E**

Altro esempio



UNITA' LITOTECNICHE

Litotipi lapidei

- *Rocce stratificate*

Successioni con alternanza di litotipi lapidei ed argillosi

- *Rocce stratificate con prevalenza di litotipi lapidei e subordinate argilliti*
- *Rocce stratificate con alternanza di litotipi lapidei ed argillosi*

Successioni conglomeratiche (o ghiaiose) sabbiose argillose

- *Brecce e conglomerati cementati*
- *Sabbie con livelli conglomeratici*
- *Argille e argille sabbiose*
- *Limi sabbie e ghiaie*

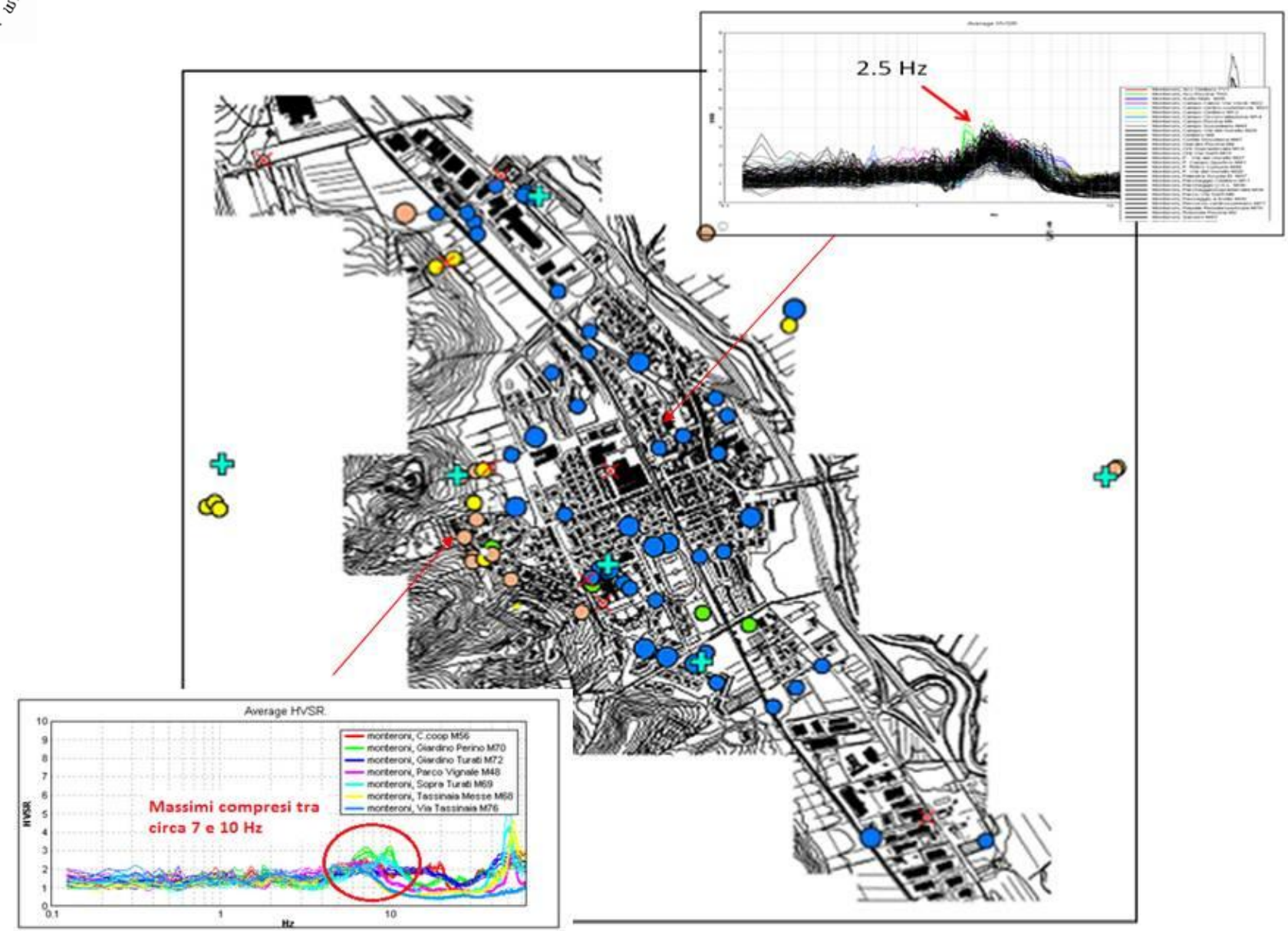
INDAGINI GEOGNOSTICHE

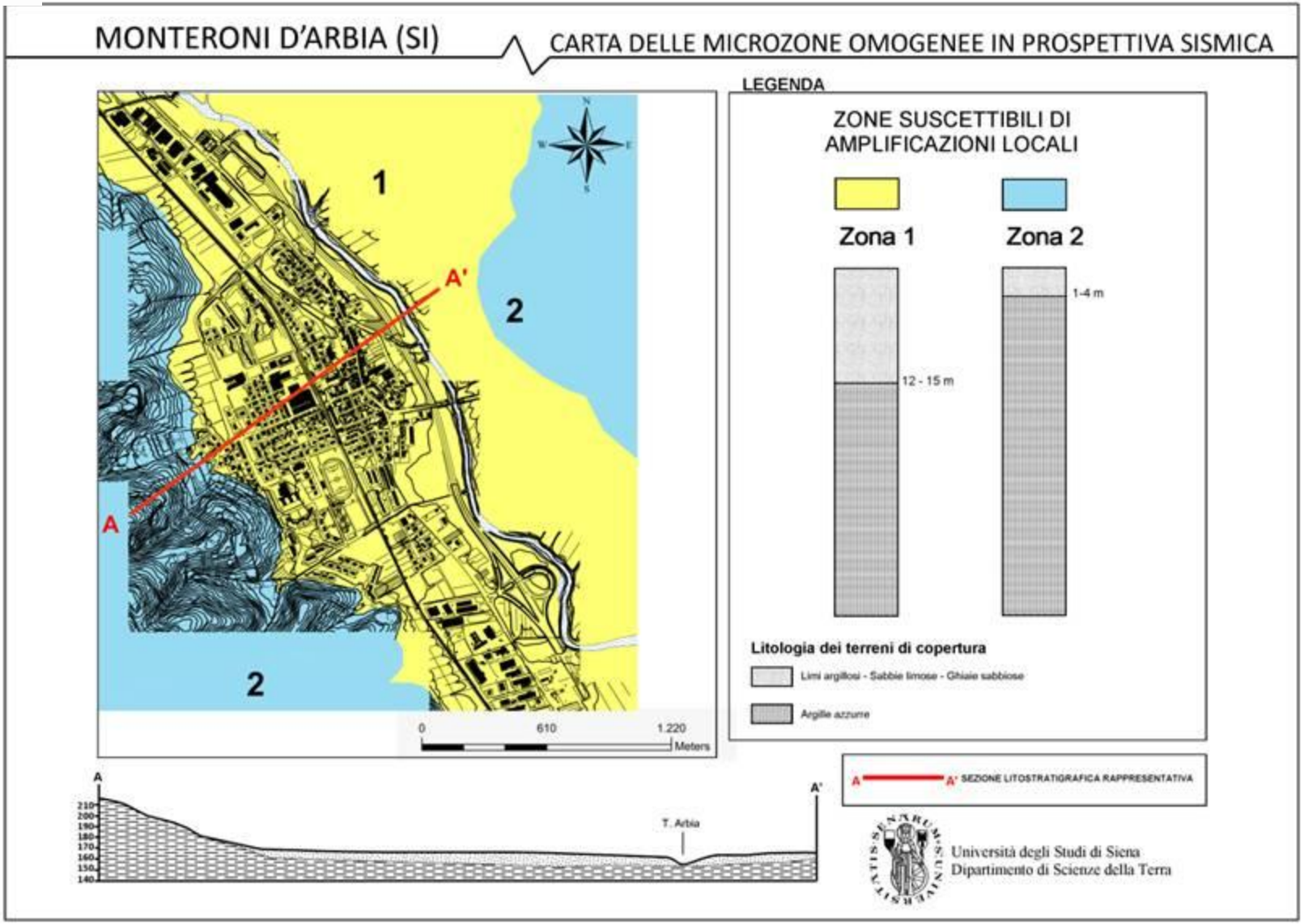
- *Sondaggio a carotaggio*
- *Prova penetrometrica statica CPT*
- *Prova penetrometrica dinamica DP*
- *Profilo sismico*
- *Trincea esplorativa*

PROGRAMMA DOCUP TOSCANA 2000-2006

- *Sondaggio per indagine geofisica in foro (Down-Hole)*

Il caso di Monteroni D'Arbia (Si)

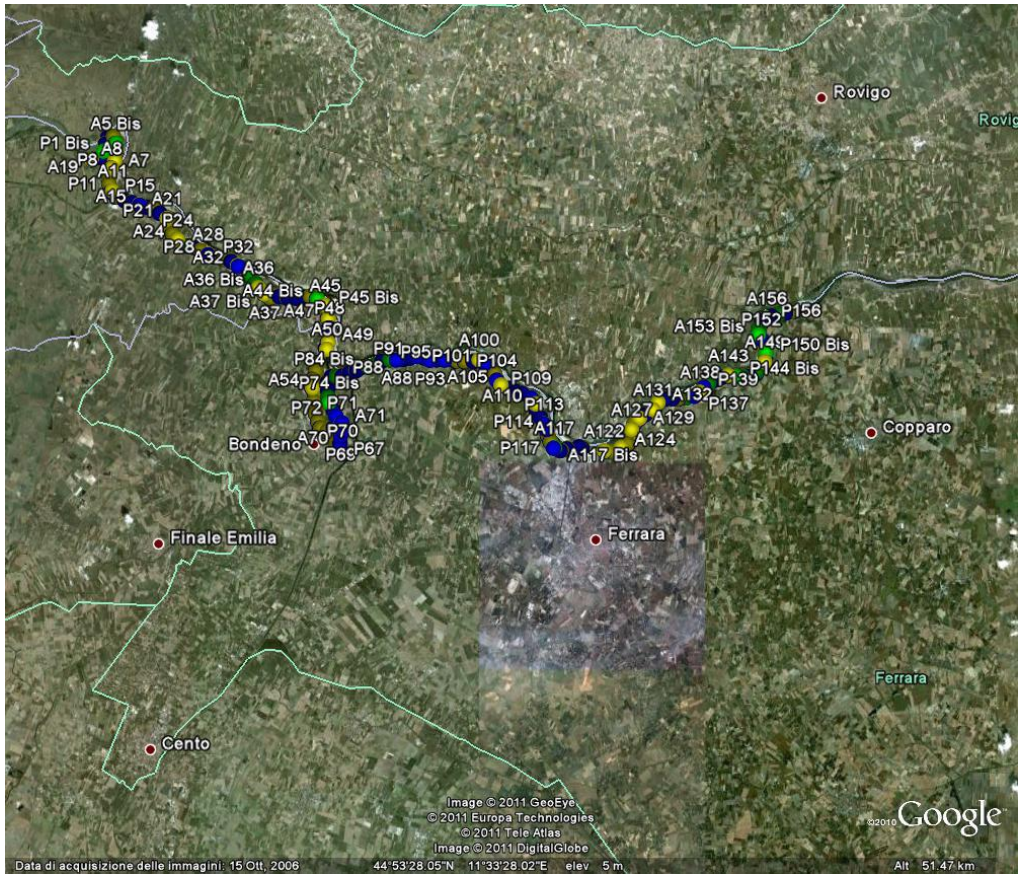

2.5 Hz
Average HVSR
HVSR
Hz
0.1
1
10
monteroni, C.coop M56
monteroni, Giardino Perino M70
monteroni, Giardino Turati M72
monteroni, Parco Vignale M48
monteroni, Sopra Turati M69
monteroni, Tassinaia Messe M68
monteroni, Via Tassinaia M76
Massimi compresi tra
circa 7 e 10 Hz


MONTERONI D'ARBIA (SI)
CARTA DELLE MICROZONE OMOGENEE IN PROSPETTIVA SISMICA
1
2
2
A
A'
0
610
1.220
Meters
LEGENDA
ZONE SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI
Zona 1
Zona 2
1-4 m
12 - 15 m
Litologia dei terreni di copertura
Limi argillosi - Sabbie limose - Ghiaie sabbiose
Argille azzurre
A
A'
SEZIONE LITOSTRATIGRAFICA RAPPRESENTATIVA
T. Arbia
Università degli Studi di Siena
Dipartimento di Scienze della Terra

Altro esempio è lo studio dell'argine destro del Po

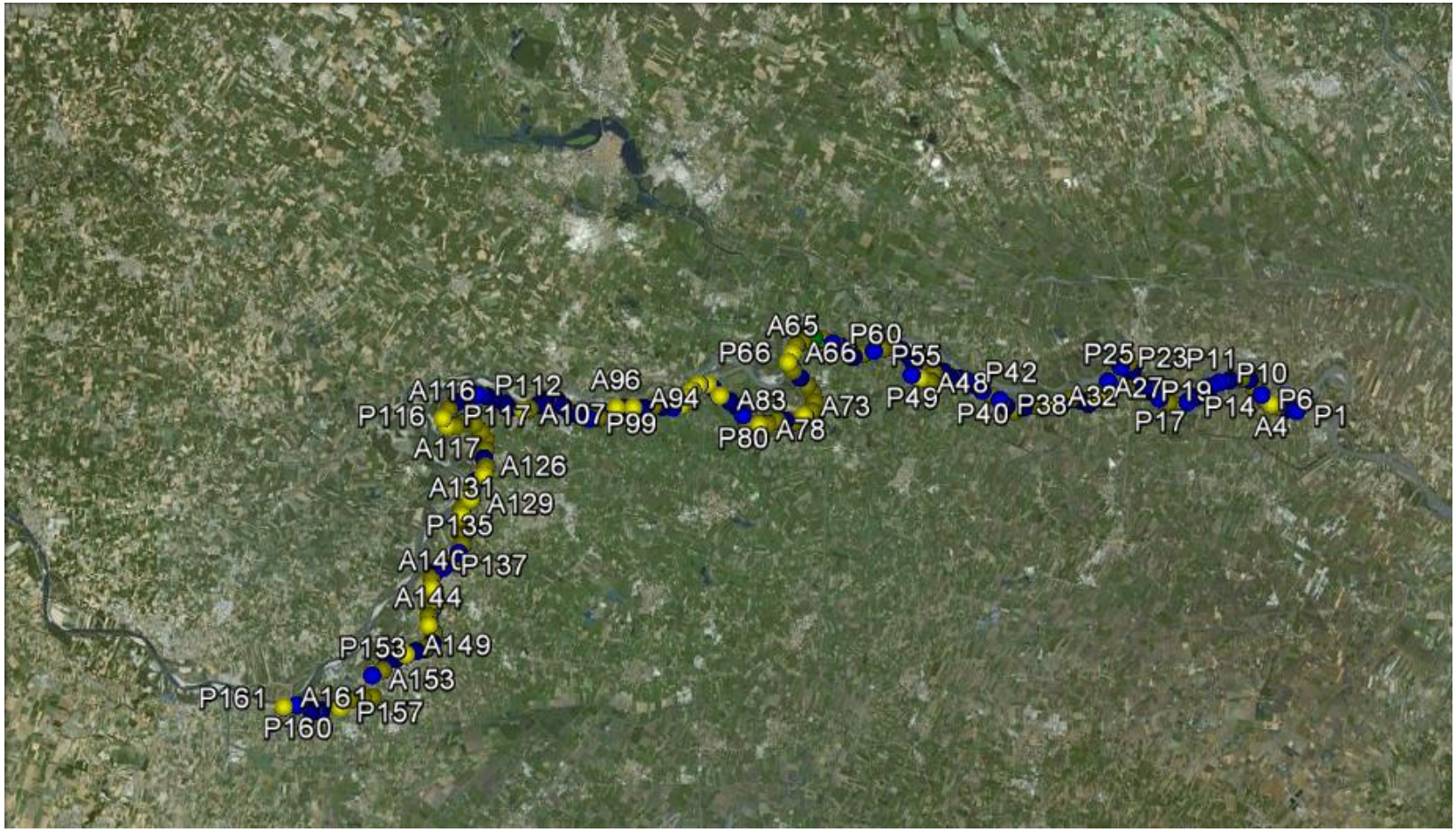
In una prima fase sono stati considerati complessivamente 160 punti di misura HVSR su vibrazioni ambientali lungo gli 80 km compresi fra Carbonara Po (RE) e Ro (FE)

Per ogni posizione sono state eseguite almeno due misure da 20 minuti: una sull'argine ed una ai piedi di quest'ultimo

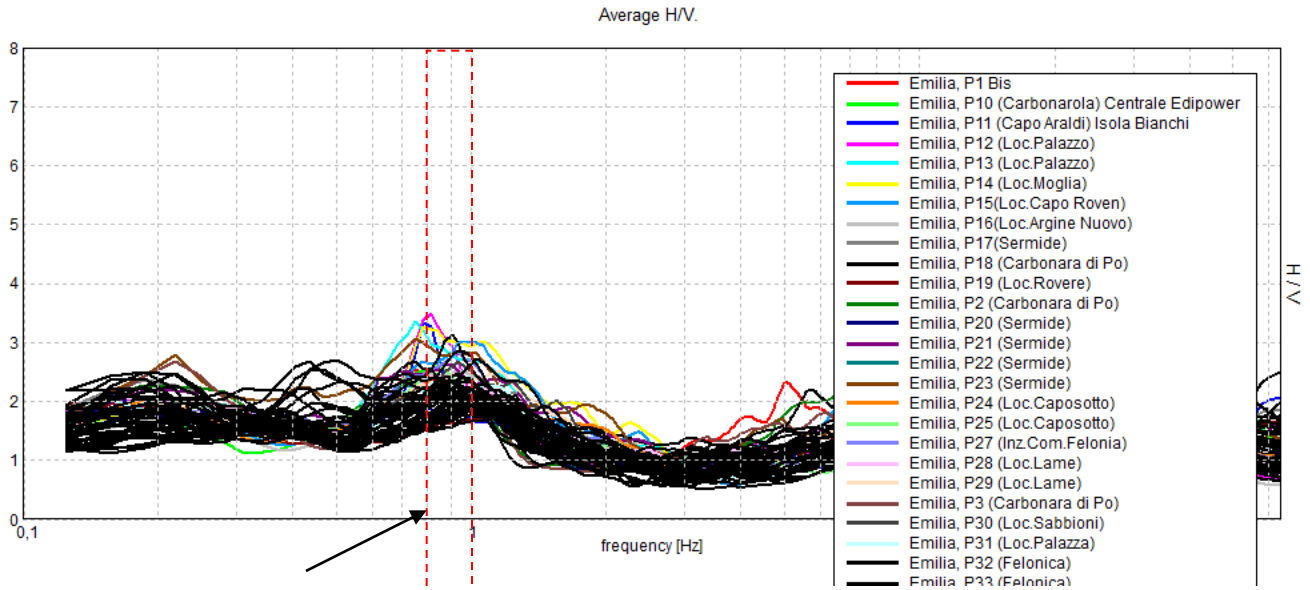


In una seconda fase sono stati considerati complessivamente altri 161 punti di misura HVSR su vibrazioni ambientali fra Carbonara Po (RE) e Boretto (RE)

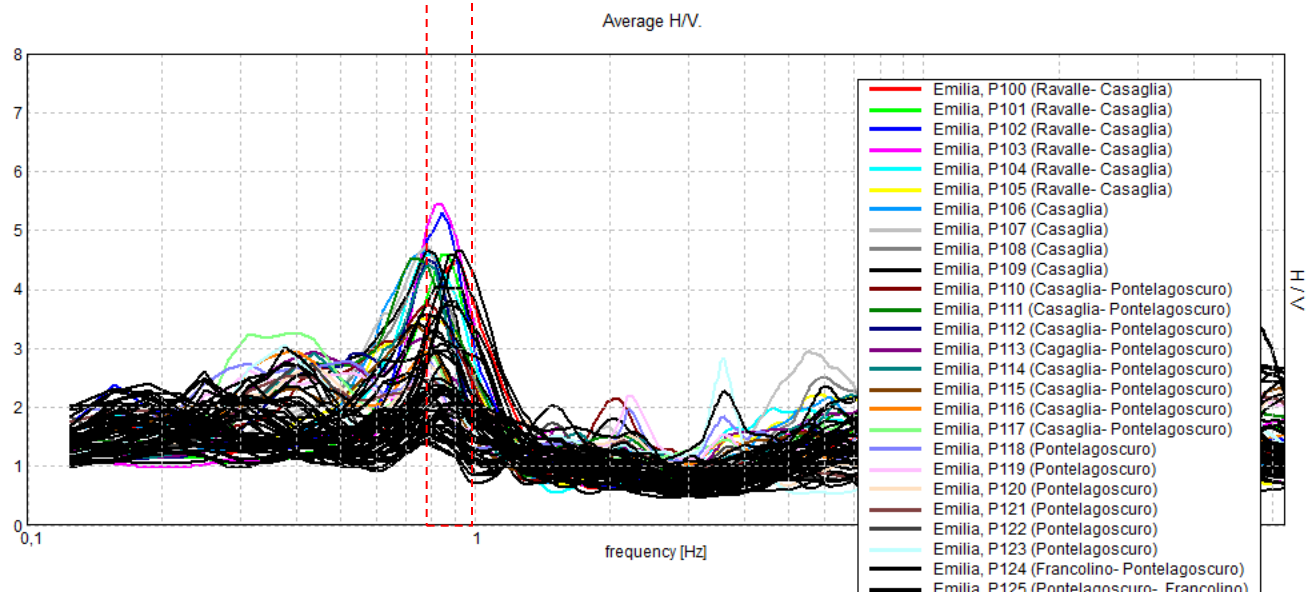
Per ogni posizione sono state eseguite almeno due misure da 20 minuti: una sull'argine ed una ai piedi di quest'ultimo



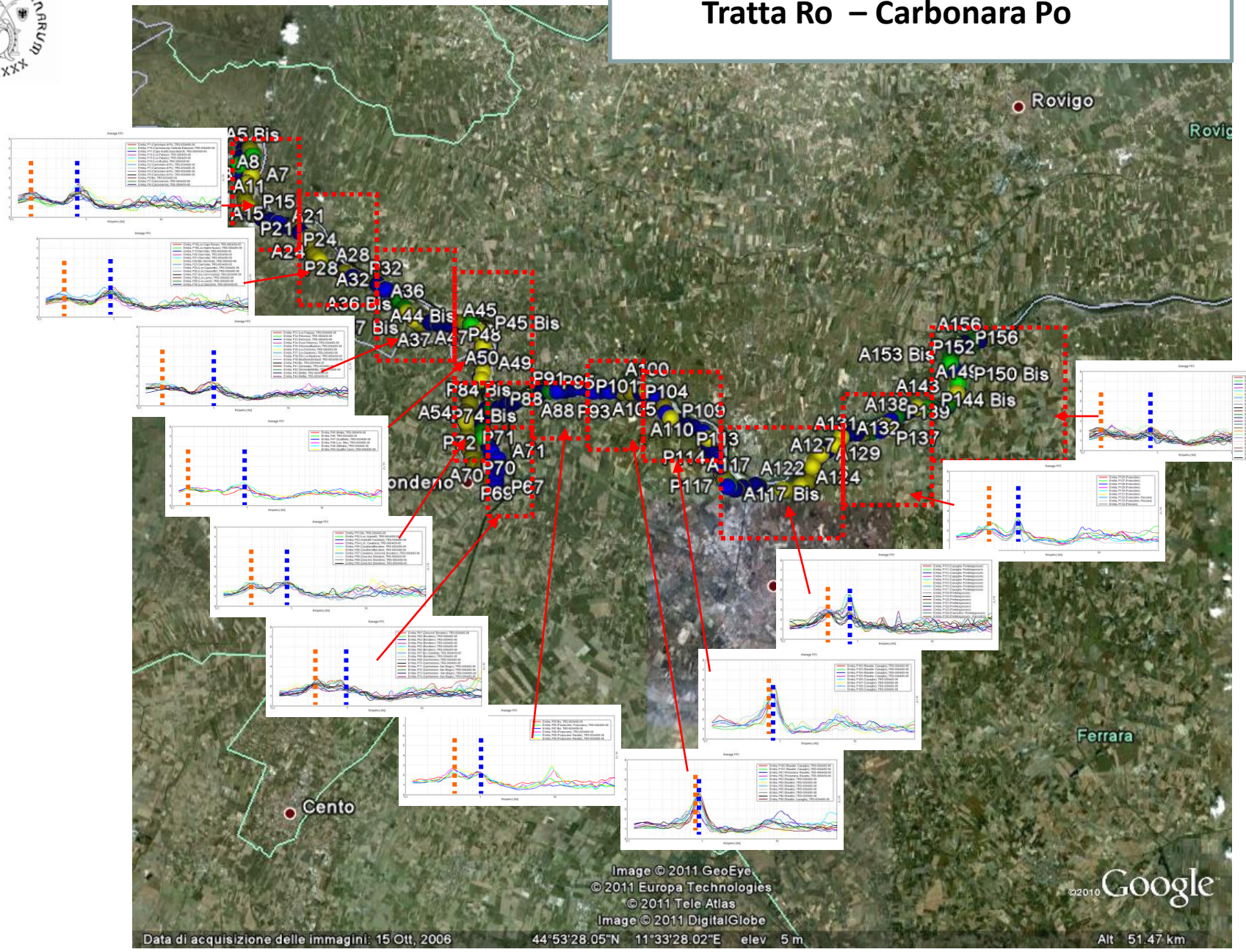
In tutte le misure è presente almeno un massimo della curva HVSR nell'intervallo 0.8-1.0 Hz

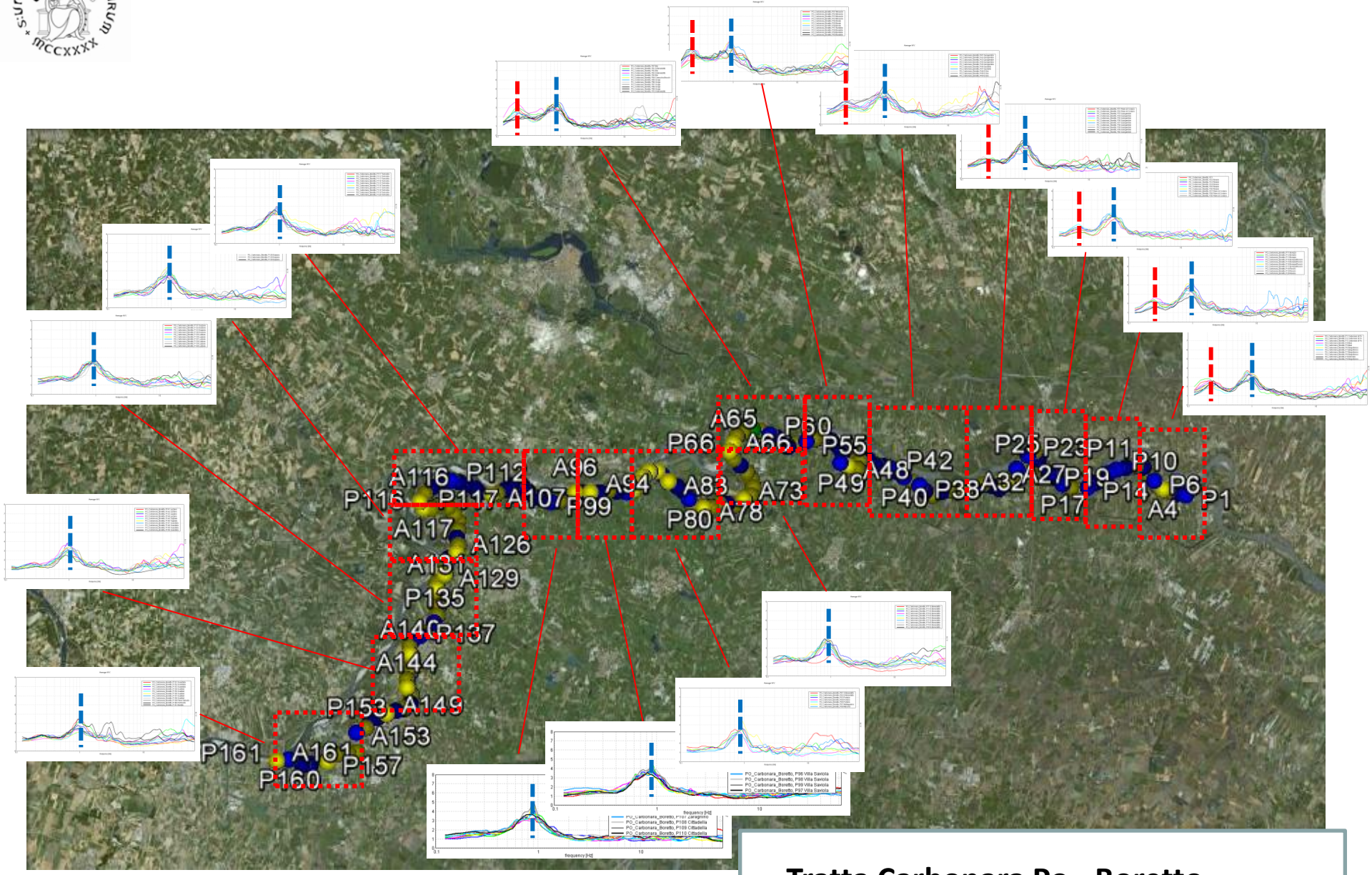


0.8-1.0 Hz



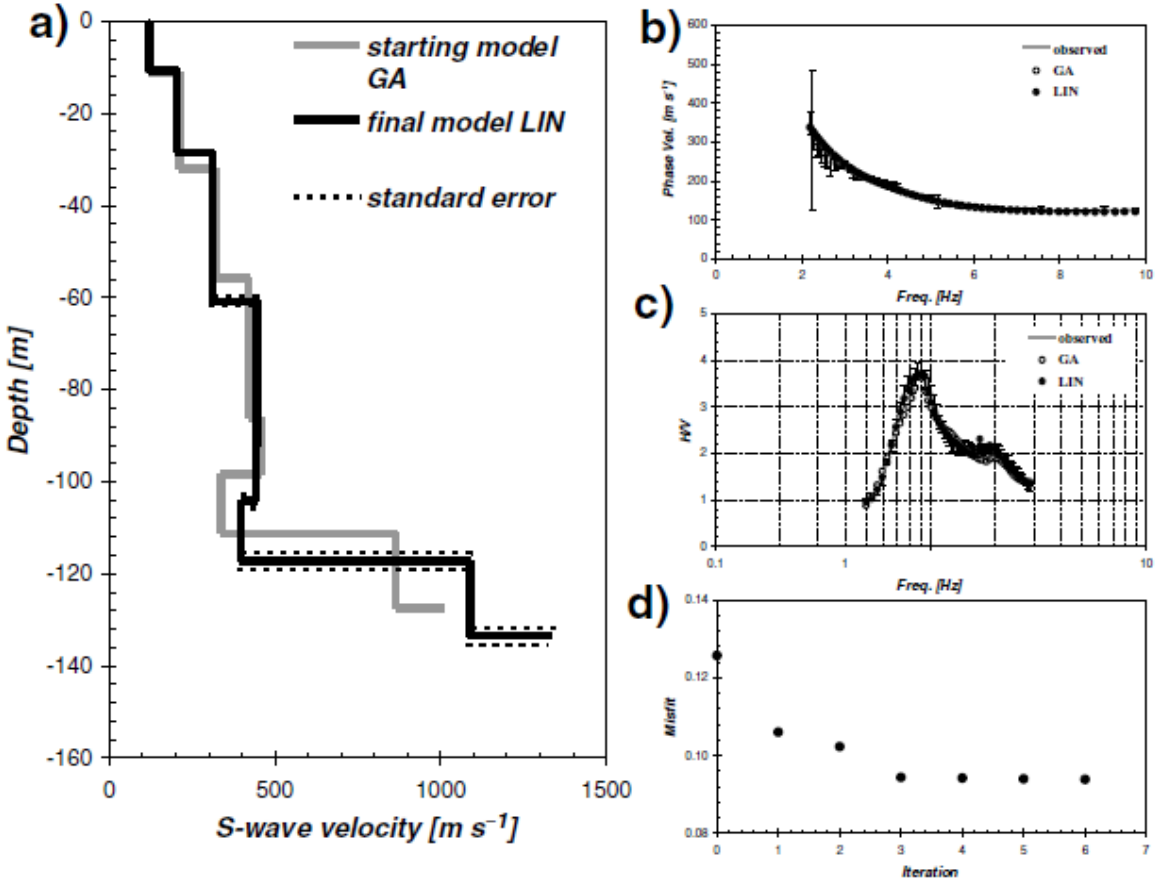
Tratta Ro – Carbonara Po





Tratta Carbonara Po - Boretto

Sono stati anche eseguite 6 misure su antenna sismica in corrispondenza di alcune misure down-hole disponibili (Canaro, Occhiobello, Ficarolo, Casaglia, Carbonara Po) e della stazione accelerometrica di Boretto



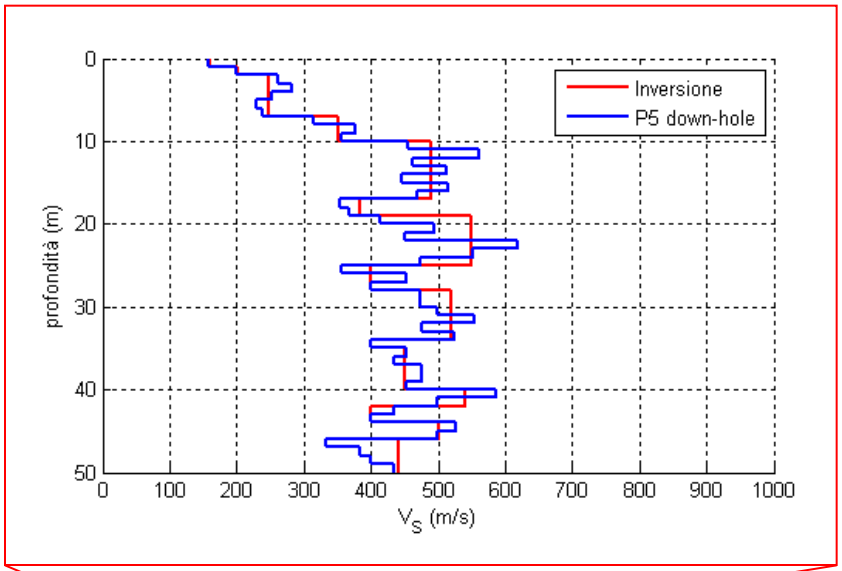
Soluzione vincolata ai

- **curva di dispersione delle onde superficiali da misure di vibrazioni ambientali su antenna sismica**
- **curva HVSR da vibrazioni ambientali**

La soluzione è compatibile con le misure C-H fino a circa 50 m disponibili al sito

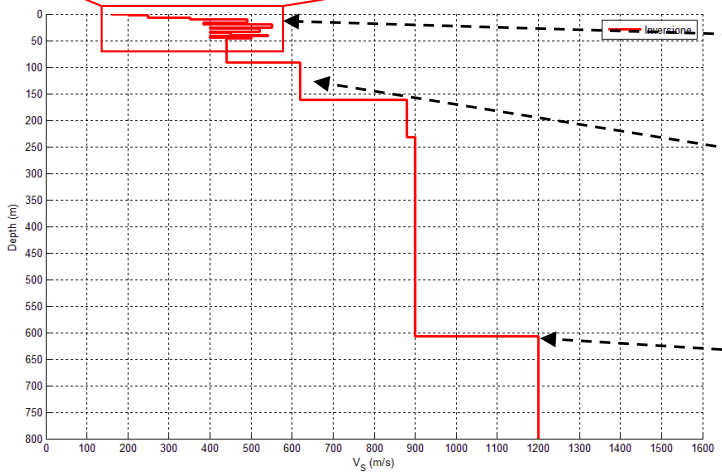
Casaglia

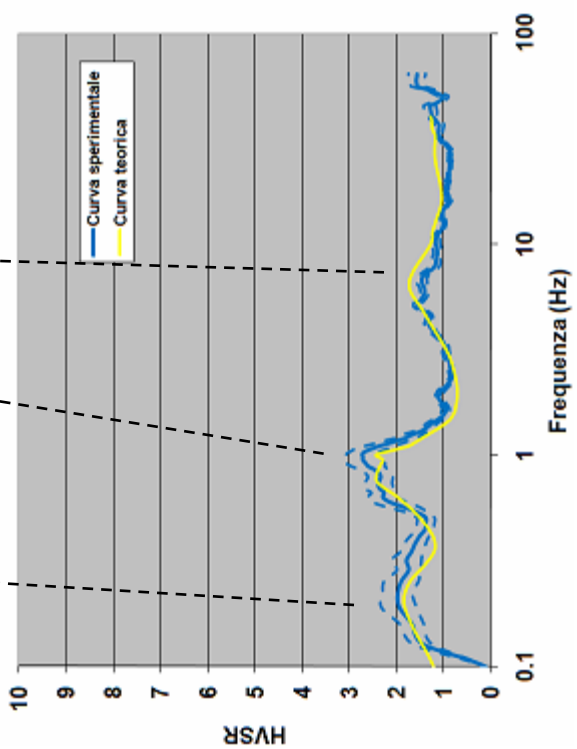
Carbonara Po



Soluzione vincolata ai

- **valori di V_s ricavati fino a 50 m di profondità dalle misure C-H disponibili**
- **curva HVSR da vibrazioni ambientali**



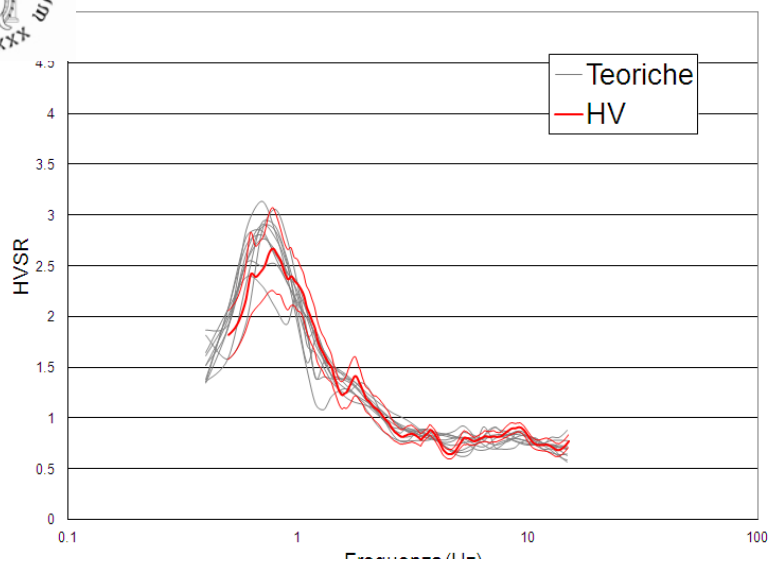


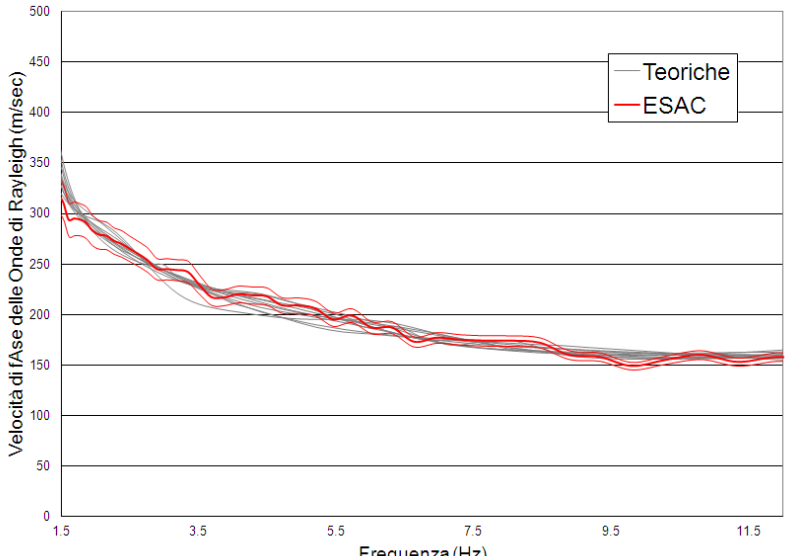
Boretto (RE)

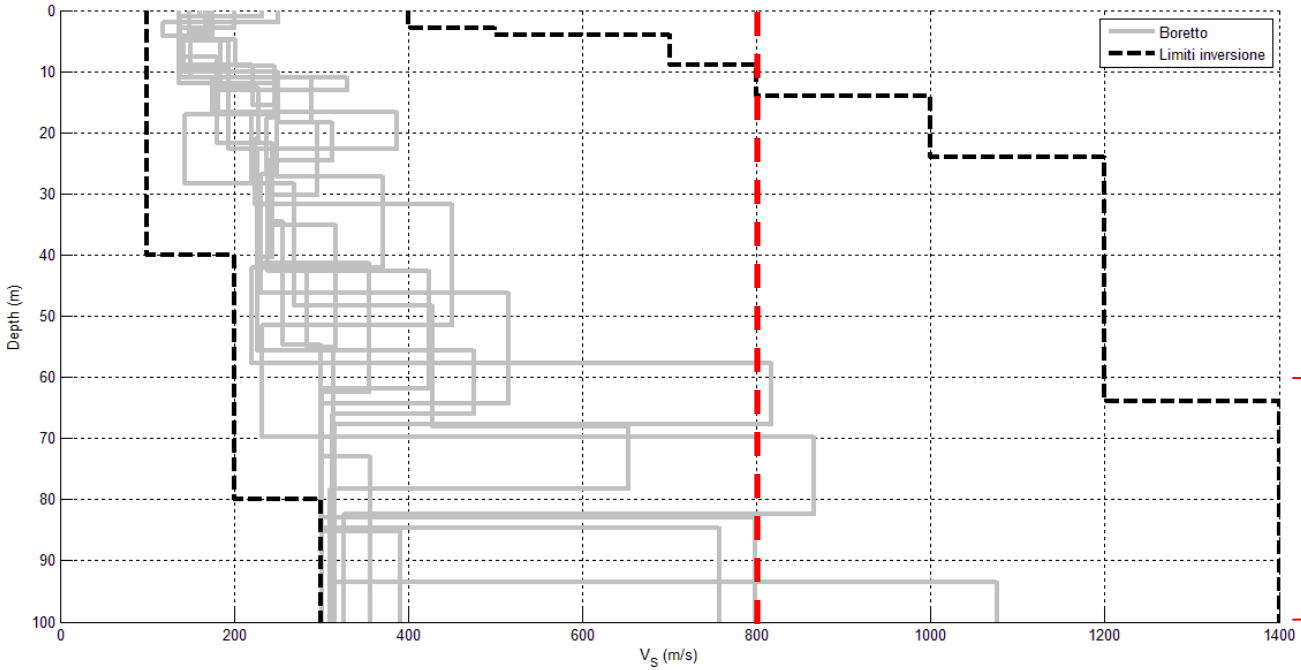
Stazione accelerometrica
© 2012 DigitalGlobe

Stazione accelerometrica

Risultati Inversione Boretto







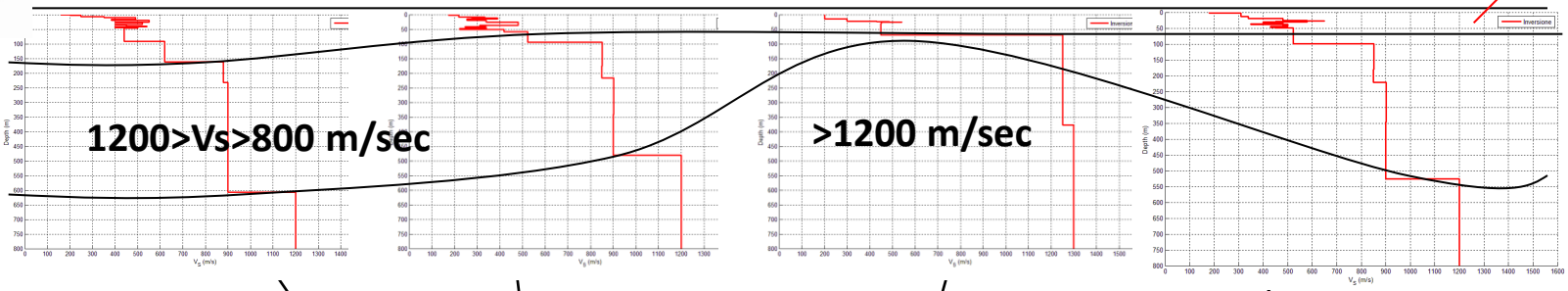
Possibile Bedrock

Carbonara Po

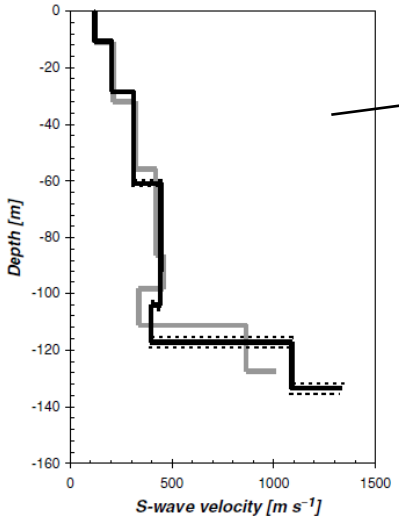
Ficarolo

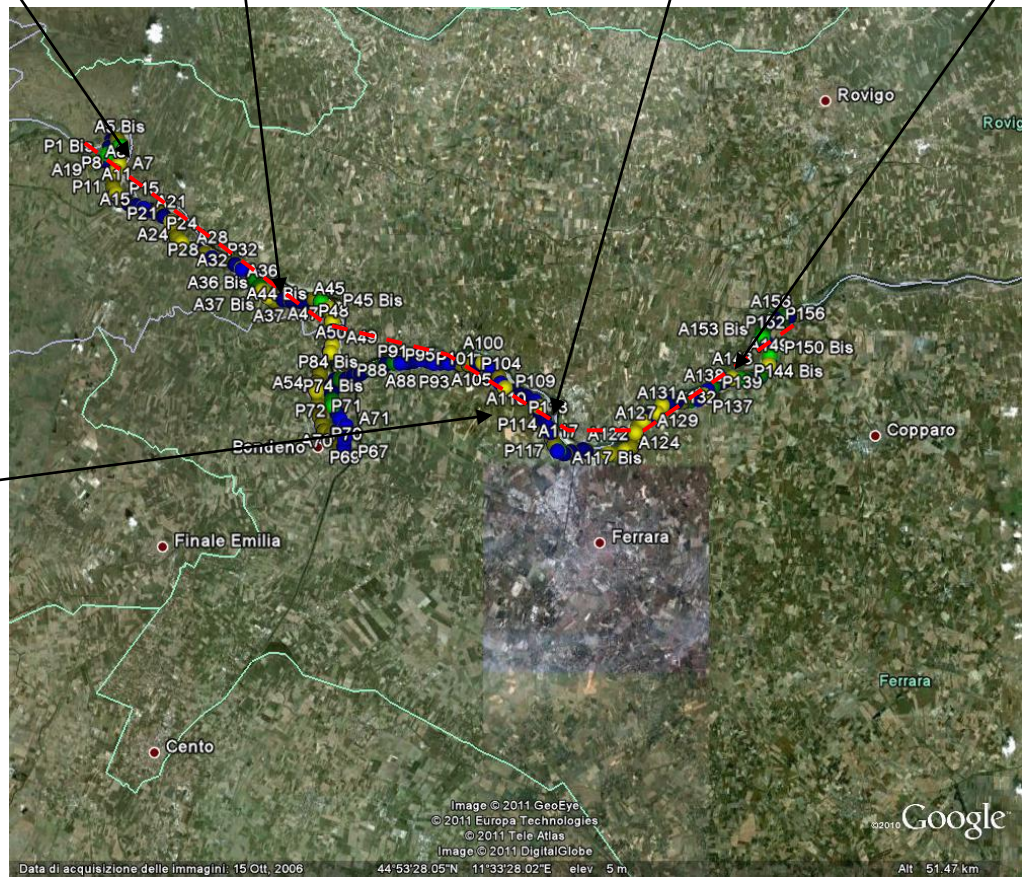
Occhiobello

Canaro

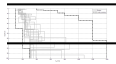


Casaglia

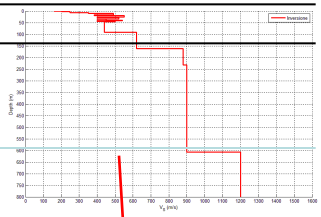




Boretto **Gorgo** **Carbonara Po**



<600 m/sec

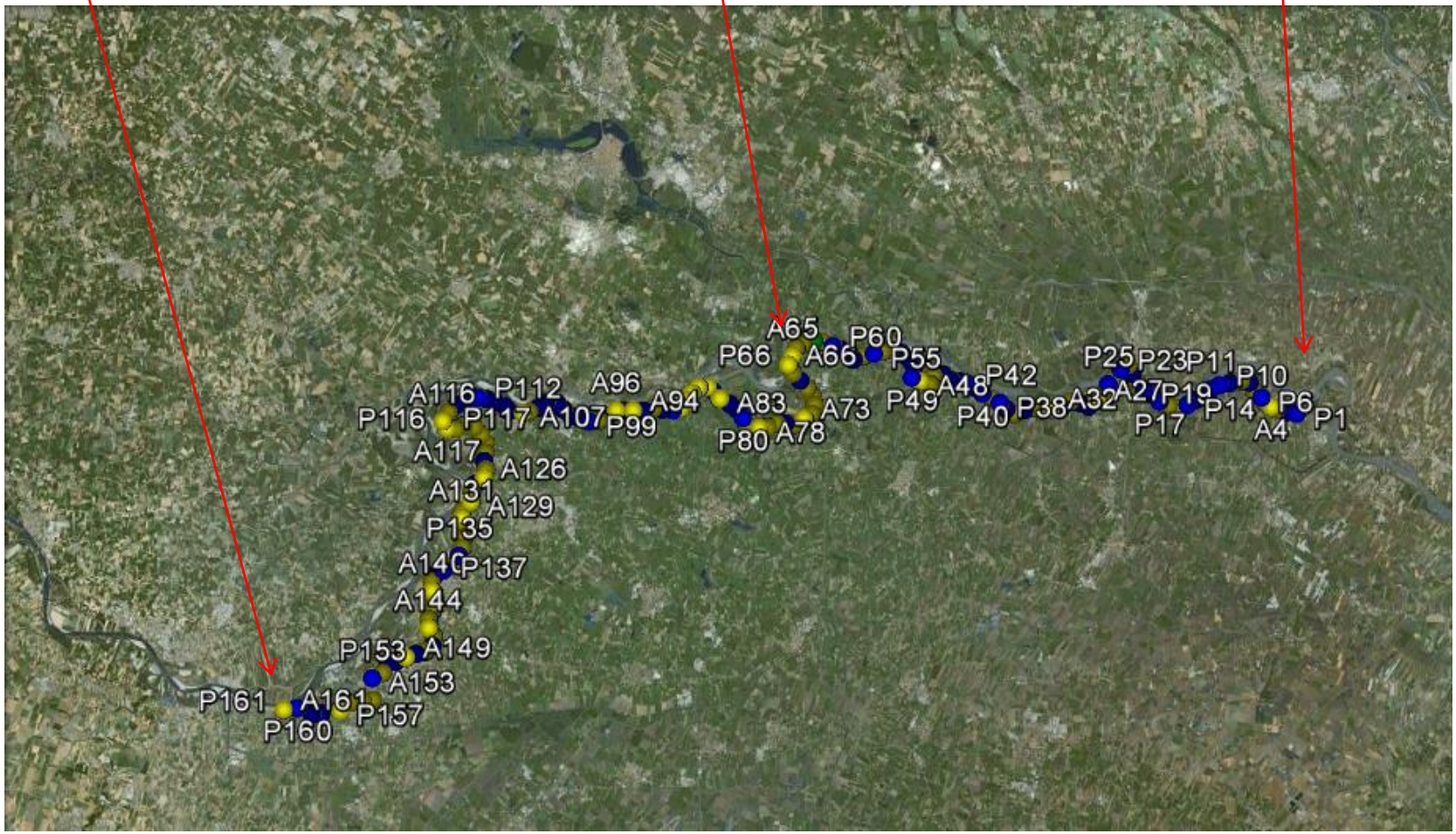


80 m

1200>Vs>800 m/sec

>500 m

>1200 m/sec



CONCLUSIONI

Le esperienze di microzonazione sismica condotte negli ultimi anni hanno mostrato l'importanza di una buona caratterizzazione geologica del territorio indagato

Tuttavia hanno anche mostrato che una lettura strettamente geologica non è sufficiente per l'elaborazione di carte utili alla MZS

Le tecniche di prospezione geofisica ed in particolare di sismica passiva si sono rivelati di grande utilità per identificare e caratterizzare i contatti geologici responsabili di possibili fenomeni di amplificazione sismica permettendo l'estrapolazione a aree estese di misure puntuali

Si tratta di tecniche "robuste" applicabili rapidamente nei diversi contesti (anche in presenza di forti disturbi antropici) ma richiedono una grande cura nella loro esecuzione