



Sismica passiva con tecniche a stazione singola e antenna

Dario Albarello

Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente

Università degli Studi di Siena

dario.albarello@unisi.it



Le tecniche di sismica passiva sono basate sulla misura e l'analisi delle vibrazioni del terreno indotte da sorgenti non controllate

In particolare, l'*ambient vibration seismology* è basata sullo studio del cosiddetto “rumore sismico ambientale” (ambient vibrations)

Il termine “rumore” è mutuato dalla sismologia nella quale costituiva un elemento di disturbo rispetto al “segnale” costituito dai cosiddetti “eventi sismici” o terremoti di origine tettonica



Ci si aspetta che le vibrazioni ambientali dipendano:

1. Dalla forma e dalla distribuzione delle sorgenti
2. Dal rapporto esistente fra le sorgenti
3. Dalle modalità di propagazione dell'energia dalle sorgenti e quindi dalle caratteristiche del sottosuolo

Quest'ultimo punto è del **massimo interesse**. Infatti se è possibile stabilire delle relazioni fra la forma dello spettro medio e la struttura del sottosuolo, allora è possibile utilizzare il campo di rumore ambientale per la **caratterizzazione dinamica (nel dominio delle piccole deformazioni)** dei terreni in posto



Questo seminario ha lo scopo di illustrare brevemente tre aspetti della prospezione sismica passiva

- 1. Definire le caratteristiche del campo di vibrazioni ambientali*
- 2. Descrivere alcune procedure per utilizzare le misure di vibrazioni ambientali per definire le modalità di propagazione delle onde sismiche nel primo sottosuolo*
- 3. Illustrare alcune procedure per estrarre da quest'ultimo dato informazioni utili per la caratterizzazione dinamica dei terreni (in piccole deformazioni)*



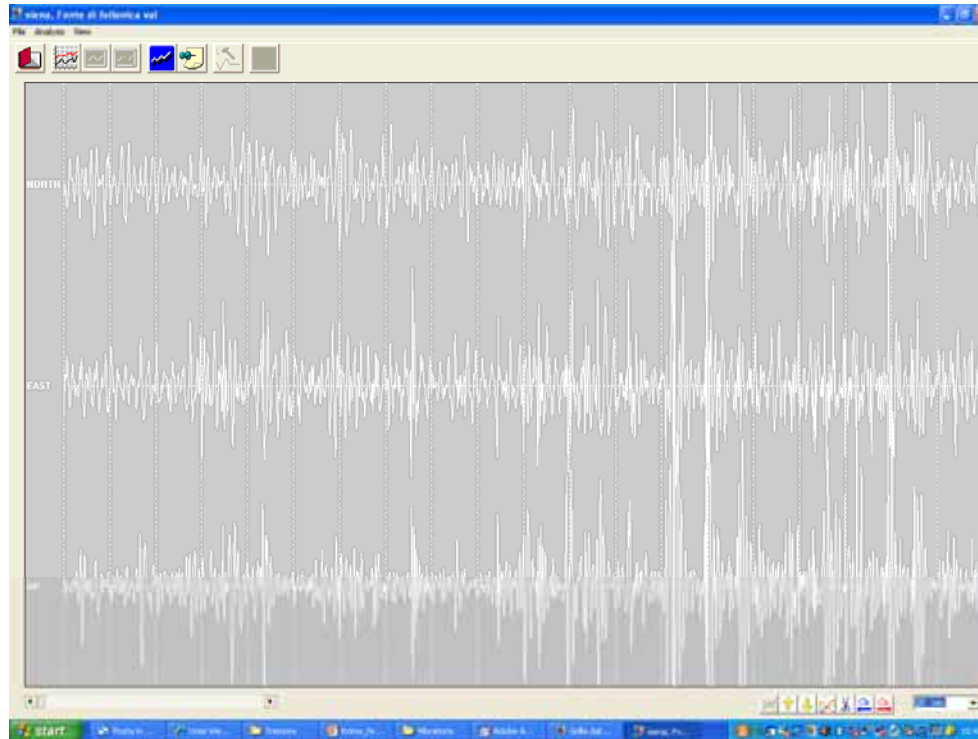
Le vibrazioni ambientali sono costituite da piccole vibrazioni del terreno (spostamenti dell'ordine di 10^{-4} - 10^{-3} cm, in un intervallo di frequenze molto al di sotto della soglia di percezione umana) che è possibile osservare sperimentalmente in qualunque punto della Terra

Viene di volta in volta anche designato con i termini di rumore sismico (*seismic noise*), microtremore (*microtremor*), microsismi (*microseisms*), rumore ambientale (*ambient vibrations*)

Questo tipo di fenomeno è stato indagato sin dai primordi della sismologia strumentale ma negli ultimi anni c'è stata una progressiva crescita interesse dei sismologi e degli ingegneri in vista delle sue potenziali applicazioni per la caratterizzazione dinamica del sottosuolo e delle strutture edilizie

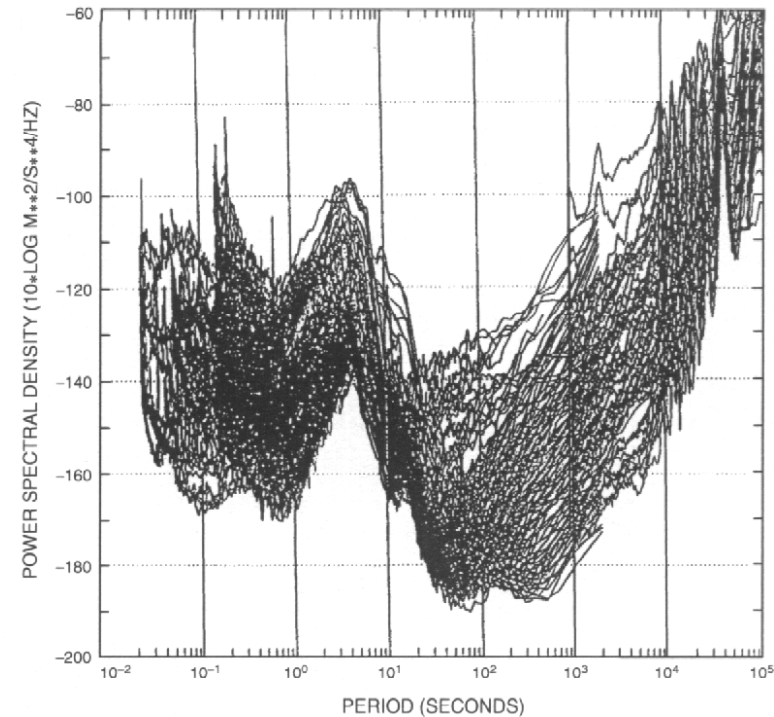
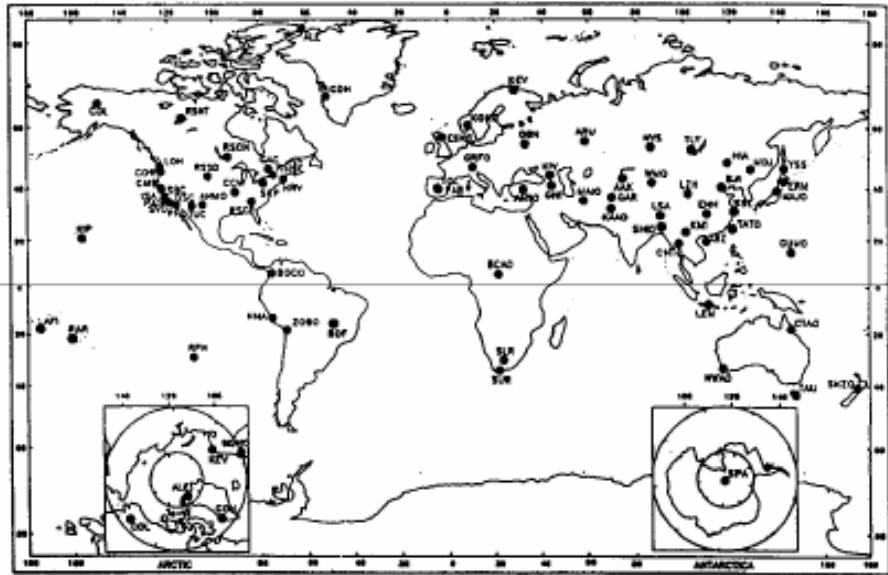


Quando sono misurate, le vibrazioni ambientali mostrano un andamento molto irregolare ed esibiscono quindi una natura *essenzialmente stocastica*



Questo implica che lo studio di questo tipo di fenomeno richiede un approccio sostanzialmente diverso da quello tipico della sismica, molto legato ad una visione “deterministica” del fenomeno: l’attenzione si sposta dallo studio delle singole fasi sismiche a quello delle proprietà medie del segnale

E dal punto di vista spettrale?



Le vibrazioni ambientali sono ubiquie

Se si considerano solo siti posti su roccia e lontano da centri urbani o siti industriali, le proprietà spettrali medie delle vibrazioni ambientali mostrano una forma spettrale largamente indipendente dalla posizione.

Quando ci si sposta però vicino ad aree urbane e su sedimenti la situazione cambia



E' importante farsi un'idea delle dimensioni delle onde alle diverse frequenze (o periodi) nel campo delle vibrazioni ambientali

Se immaginiamo velocità delle onde sismiche (onde S per esempio) dell'ordine di 500 e 1000 m/sec si avrà che

		Vs (m/sec)	Vs (m/sec)
Frequenza (Hz)	Periodo (sec)	500	1000
10	0.1	50	100
5	0.2	100	200
1	1	500	1000
0.5	2	1000	2000
0.1	10	5000	10000
0.05	20	10000	20000
0.01	100	50000	100000

Sotto 1 Hz, le lunghezze d'onda diventano rapidamente assai grandi

Ci si può aspettare che la scala dei fenomeni responsabili di queste perturbazioni cresca con la lunghezza d'onda



In generale, studi di questo genere nel corso degli anni hanno messo in evidenza che il rumore ambientale può essere differenziato in tre domini di frequenza

- Bassa frequenza (<0.5 Hz) - *Microsismi*

E' di origine **essenzialmente naturale** con sorgenti di grandi dimensioni spaziali (*onde oceaniche, grandi perturbazioni atmosferiche, ecc.*); ha un carattere stazionario (*ovvero le sue proprietà statistiche non cambiano nel tempo*) alla scala delle **ore** e dei **giorni**.

Alta frequenza (>1 Hz) – *Microtremore*

E' di origine **essenzialmente antropica** (*traffico veicolare e pedonale, attività industriale, ecc.*) e **talvolta naturale ma a scala locale** (*vento sugli edifici e le piante, ecc.*); mostra carattere significative variazioni alla scala delle attività antropiche (*giorno/notte, festivi/feriali, ecc.*).

- Frequenza intermedia (<1 Hz e >0.5 Hz)

A seconda delle caratteristiche del sottosuolo, **sia sorgenti naturali che antropiche** possono condizionare le vibrazioni ambientali, con un livello di stazionarietà variabile da caso a caso



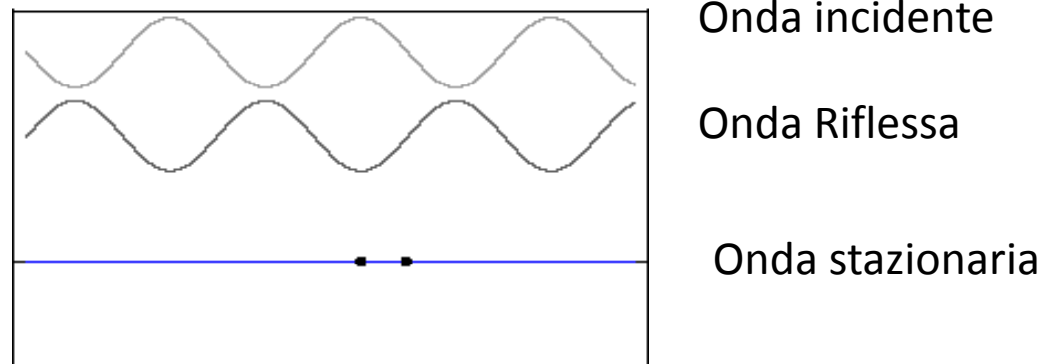
Fra le cause principali del rumore in bassa frequenza ci sono le perturbazioni atmosferiche e le onde marine

	Gutenberg (1958)	Asten (1978-1984)
Waves striking the coast	0.05-0.1 Hz	0.5-1.2 Hz
Monsoon / large scale meteorological perturbations	0.1-0.25 Hz	0.16-0.5 Hz
Cyclones over the ocean	0.3-1 Hz	0.5-3 Hz
Local meteorological conditions	1.4-5 Hz	
Volcanic tremor	2-10 Hz	
Urban	1-100 Hz	1.4-30hz

Si noti che in bassa frequenza le vibrazioni hanno grandi lunghezze d'onda (centinaia o migliaia di metri) e quindi devono essere generati da fenomeni a larga scala



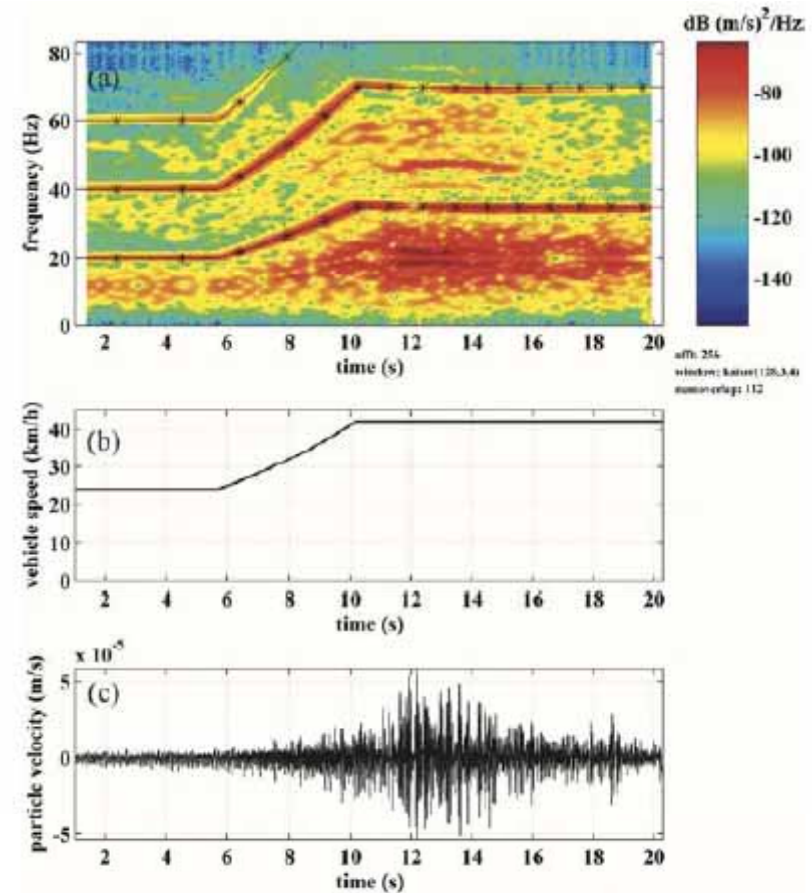
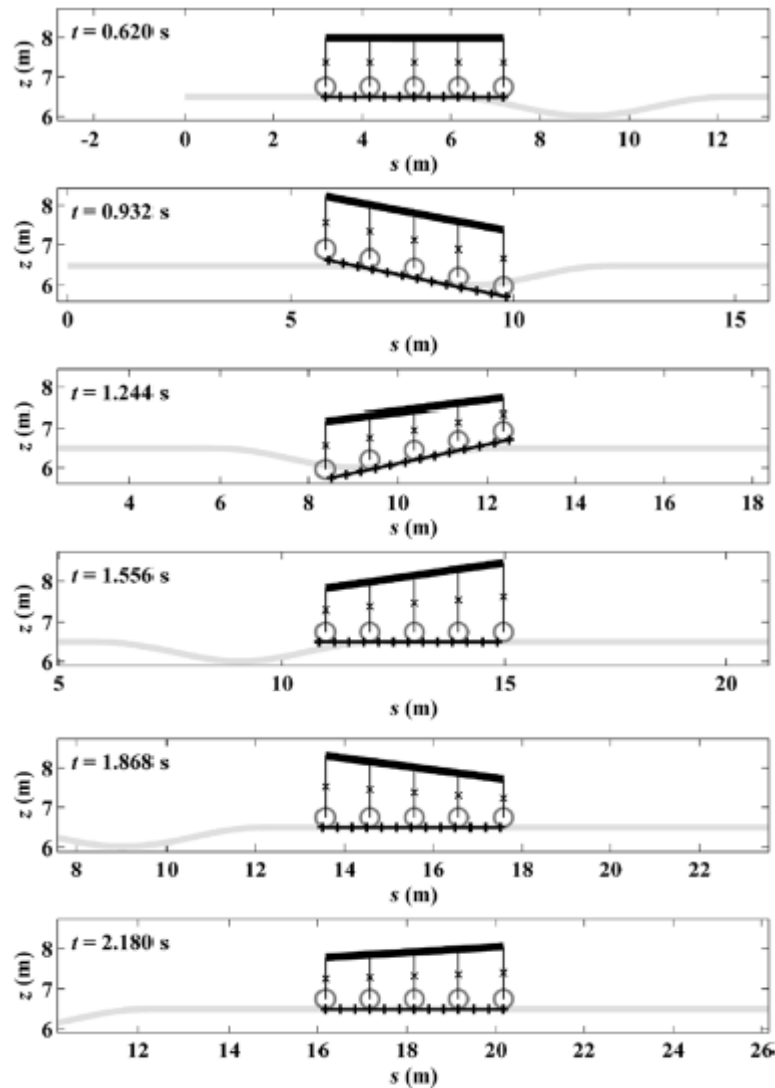
Mare
aperto



Secondo una teoria largamente condivisa, le onde marine di grande lunghezza d'onda generano vibrazioni ambientali a causa dei battimenti generati dall'interferenza di onde oceaniche riflesse dalla linea di costa

Questa onda stazionaria funge da percussore sul fondo marino generando treni di onde che si propagano all'interno della crosta

Cosa avviene per le alte frequenze? Per esempio ecco l'effetto di un veicolo in moto su una pavimentazione irregolare a velocità diverse





In sintesi

1. Il campo delle vibrazioni ambientali ha un carattere essenzialmente stocastico; pertanto, la sua analisi deve avere luogo con metodi di tipo statistico/probabilistico
2. Le vibrazioni ambientali sono presenti ovunque sulla superficie della Terra anche se con ampiezze e caratteristiche diverse
3. Nel campo delle basse frequenze (<0.5 Hz), le vibrazioni sono indotte da cause essenzialmente naturali (onde marine perturbazioni atmosferiche, ecc.); pertanto, in questo intervallo di frequenza, la forma dello spettro risulta con buona approssimazione stazionaria alla scale delle ore fino i giorni o mesi



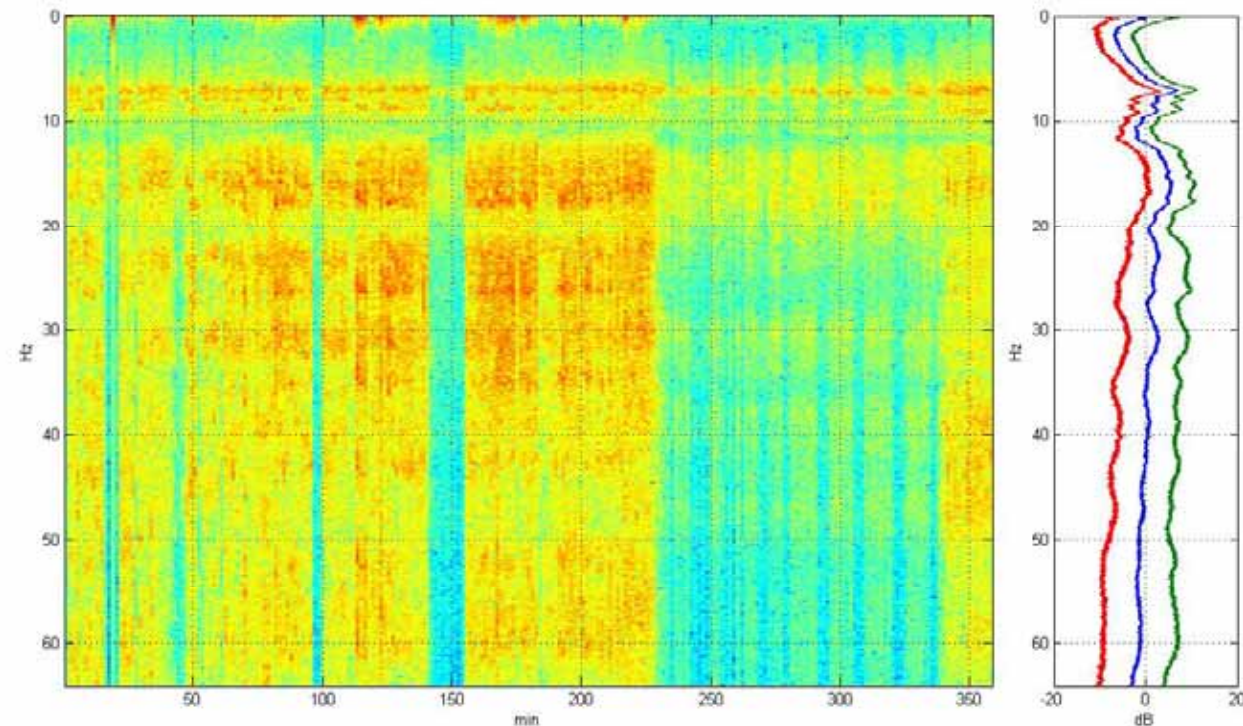
4. Nel campo delle alte frequenze ($>1\text{Hz}$), il campo è controllato da sorgenti antropiche (p.es. il traffico veicolare); quindi anche alla scala delle ore o delle decine di minuti, la variabilità è assai maggiore e maggiori sono le irregolarità presenti
5. La variabilità spaziale del campo di rumore dipende dalla frequenza (o dalla lunghezza d'onda): maggiore è la frequenza più piccola è la scala di delle variazioni laterali
6. Si mettono comunque in evidenza variazioni nella forma spettrale indotte dalle caratteristiche del sottosuolo

Come sfruttare questo ultimo aspetto per la caratterizzazione del sottosuolo?

Affinché queste vibrazioni possano essere efficacemente utilizzate per lo studio del sottosuolo è necessario

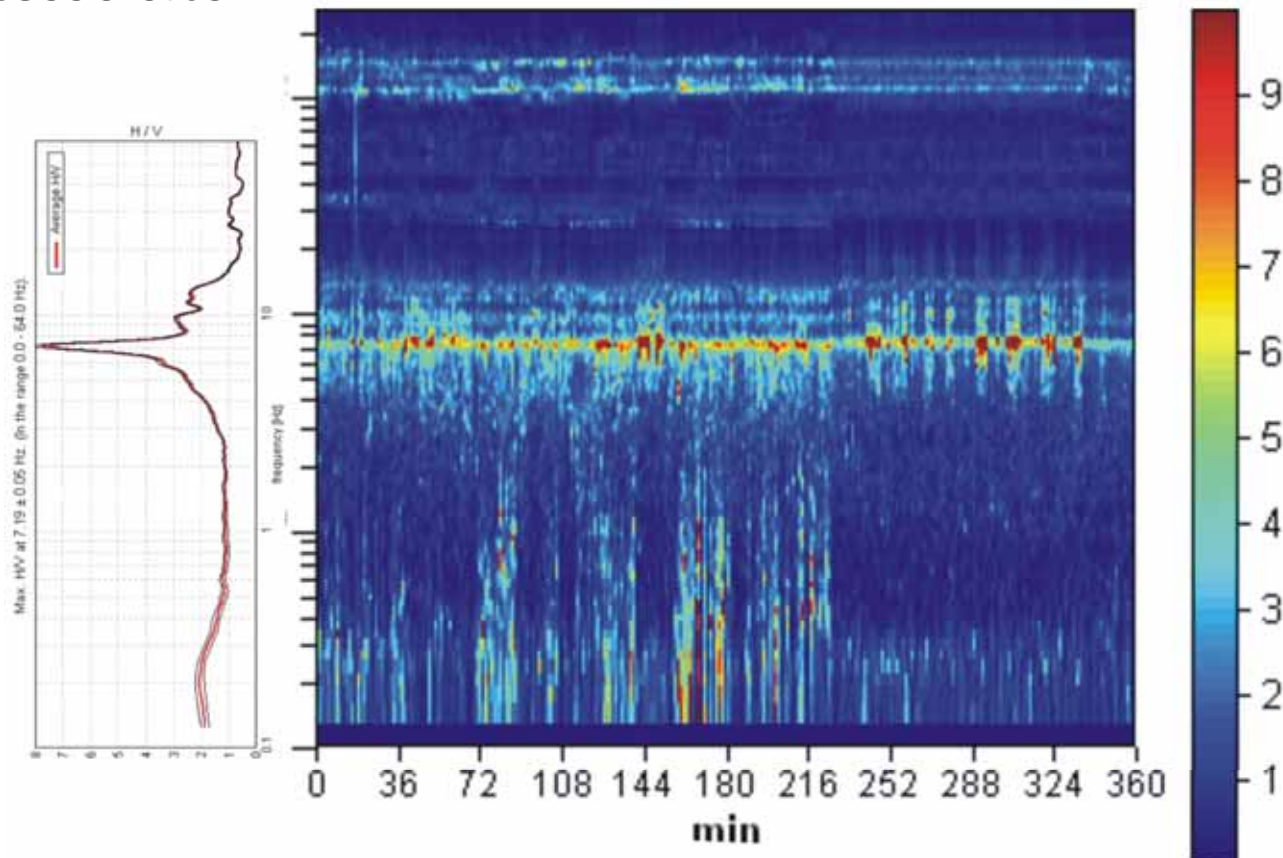
1. *Definire caratteristiche statistiche “persistenti” ovvero non dipendenti dallo specifico momento della misura: questo equivale a separare la parte “erratica” del segnale (ovvero quella legata alle diverse sorgenti attive) dalla parte “invariante” ovvero dalle caratteristiche del mezzo nel quale le vibrazioni si propagano*
2. *Determinare la struttura fisica del campo di vibrazioni (quali sono le fasi sismiche presenti? Quale è il peso relativo di ciascuna di queste?): solo in questo modo sarà possibile dedurre dalle proprietà del campo di rumore le proprietà fisiche del sottosuolo*

La forma dello spettro in un dato punto (ma non la sua ampiezza) sembra piuttosto costante almeno alla scala delle ore

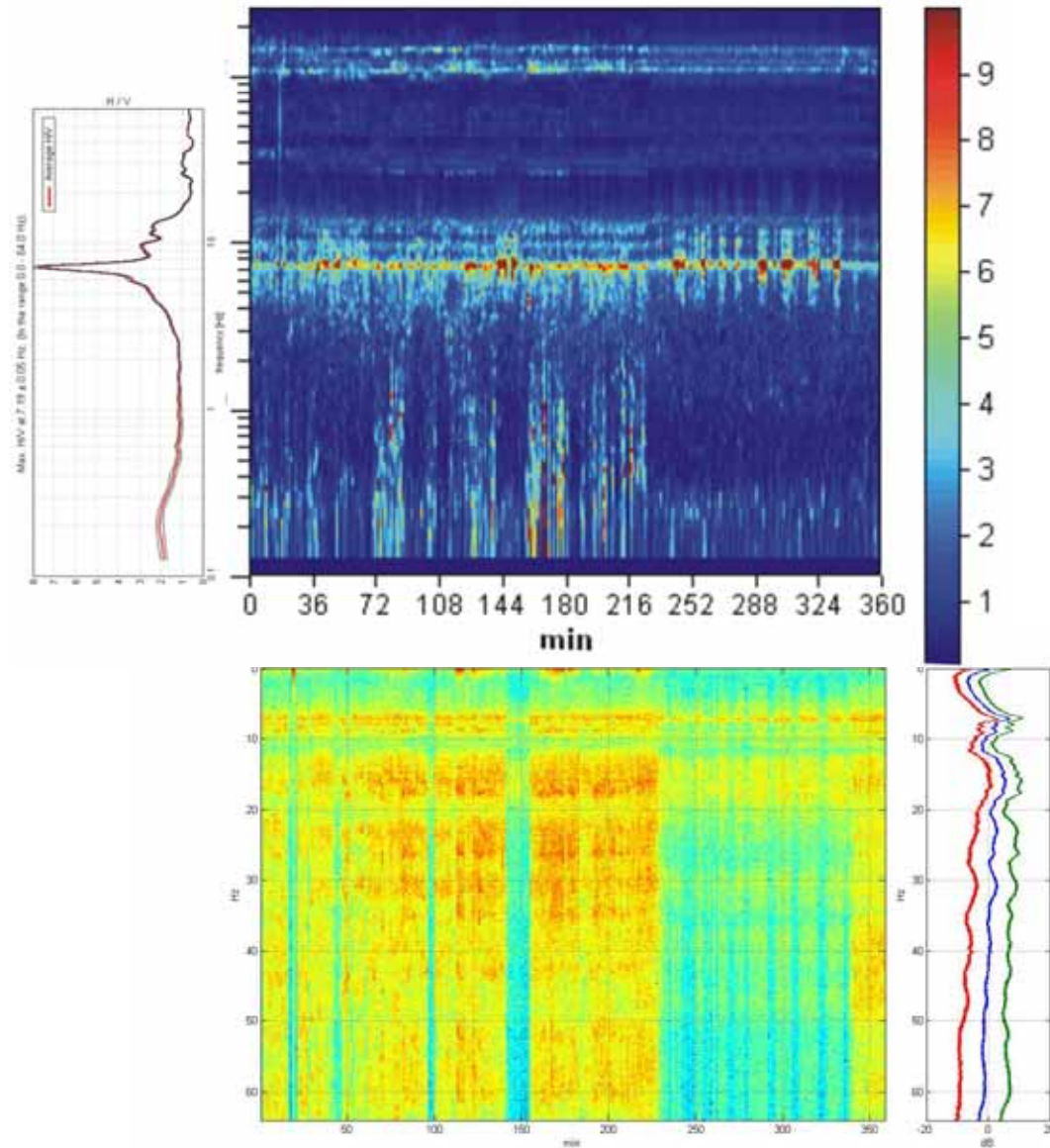


Ampiezze spettrali del rumore sismico misurato in un intervallo di 6 ore (dalle 7 alle 13 locali). Sulla sinistra il periodogramma calcolato su finestre temporali di 2 minuti sovrapposte di 30 sec ognuna. In ascissa è riportato il tempo in minuti, mentre in ordinata sono le frequenze in Hz. I colori sono proporzionali all'ampiezza del segnale in dB. Sulla destra è riportato il periodogramma medio (linea centrale) e relativa deviazione standard (le due linee a destra e sinistra).

Un aspetto interessante emerge se esaminiamo il rapporto fra gli spettri di ampiezza nelle direzioni orizzontali e verticali delle vibrazioni ambientali nello stesso sito



Andamento dei rapporti fra le ampiezze spettrali del rumore misurato sul piano orizzontale e quelle relative al moto verticale (rapporti H/V o HVSR) per le misure in figura 6. A sinistra i valori medi del rapporto spettrale per tutta la durata della misura mentre a destra le sue variazioni nel tempo



Si manifesta una forma assai più persistente nel tempo!



Quindi, se sono soddisfatte le assunzioni:

1. Se gli spettri medi delle vibrazioni ambientali sono calcolati per un intervallo di tempo sufficientemente lungo da includere una molteplicità di sorgenti distribuite uniformemente attorno al sito
2. Se queste sollecitano in modo statisticamente uguale le componenti orizzontali e verticali del moto

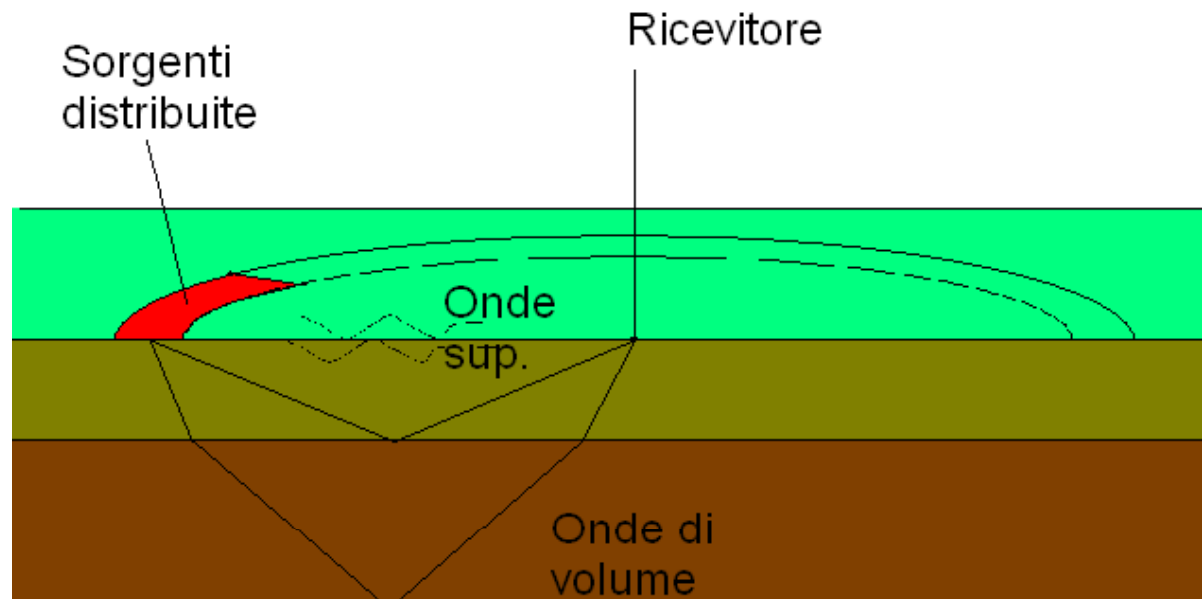
Allora i rapporti spettrali medi H/V (HVSR - Horizontal to Vertical Spectral Ratios) sono funzione solo delle caratteristiche medie (nelle diverse direzioni) del sottosuolo

Quindi da misure di rumore risulta possibile risalire alle proprietà del mezzo, al netto del contributo delle diverse sorgenti

Altre indicazioni in questo senso possono venire dalla modellazione numerica

Assumendo che

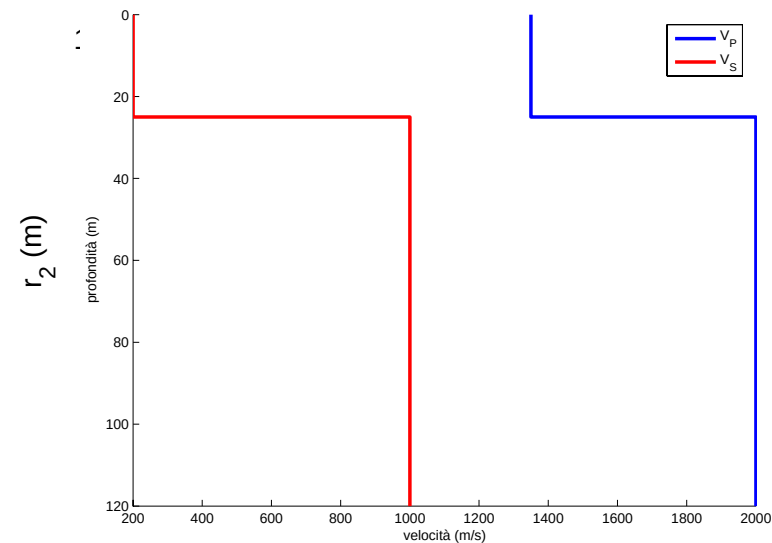
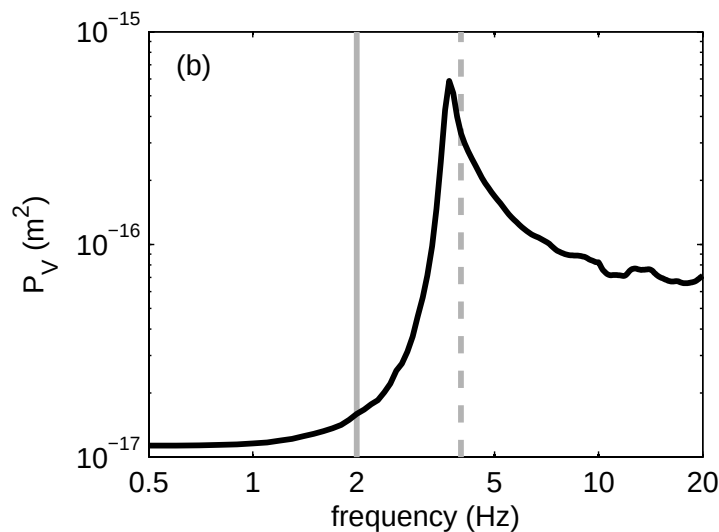
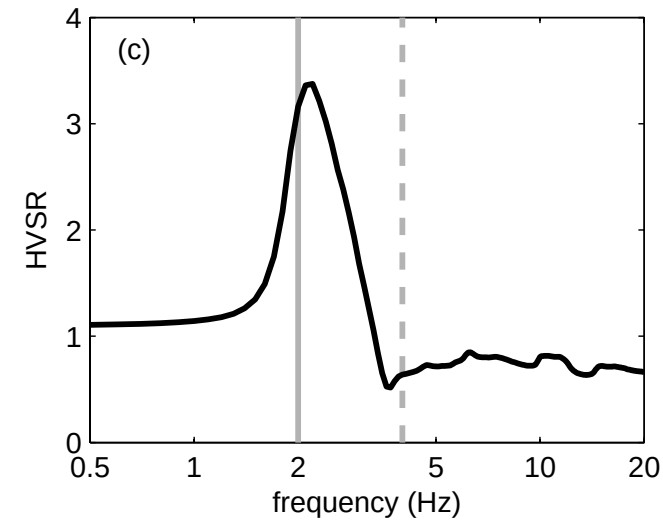
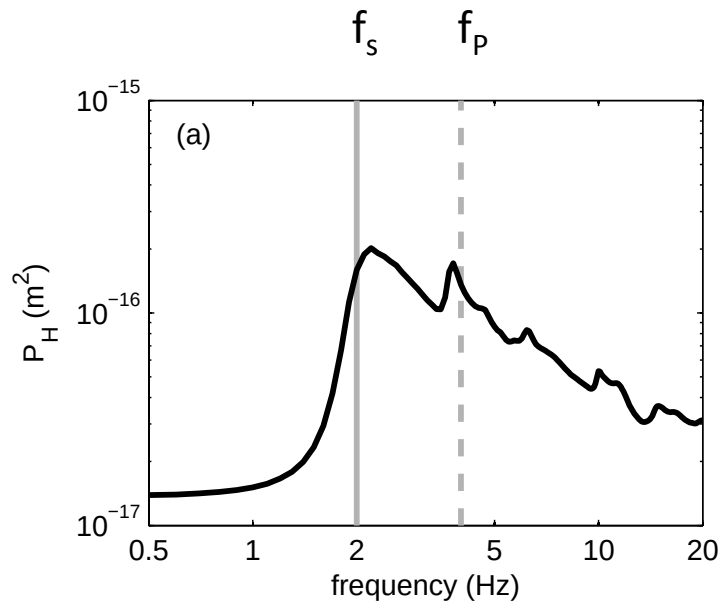
1. *attorno al sito esista una distribuzione uniforme di sorgenti puntuali con ampiezza casuale e indipendenti fra loro orientate con probabilità uniforme nello spazio*
2. *che il mezzo sia caratterizzato da eterogeneità di tipo 1D (almeno nelle vicinanze del sito per le lunghezze d'onda relative a ciascuna frequenza)*





Simulazioni numeriche

La posizione dei massimi dei rapporti
spettrali mostra una buona correlazione
con le frequenze di risonanza delle onde
S ($f_s = V_s/4H$, $f_p = V_p/4H$)

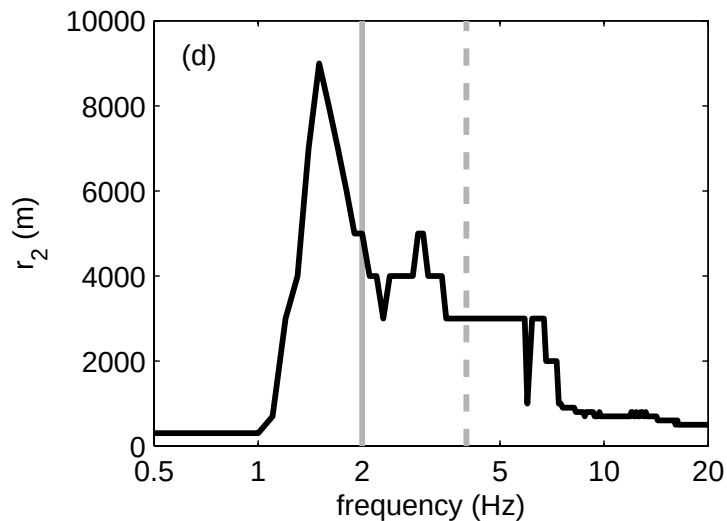
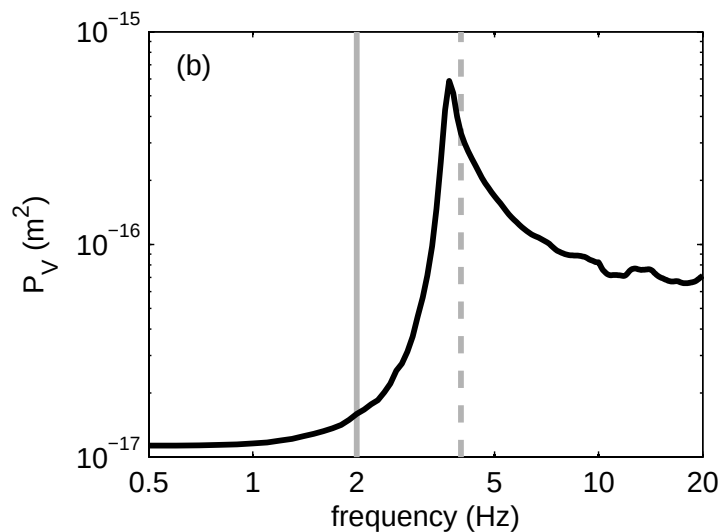
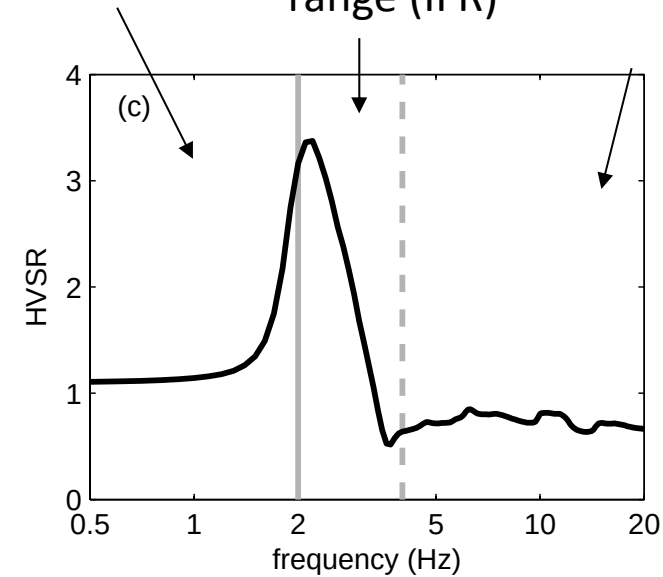
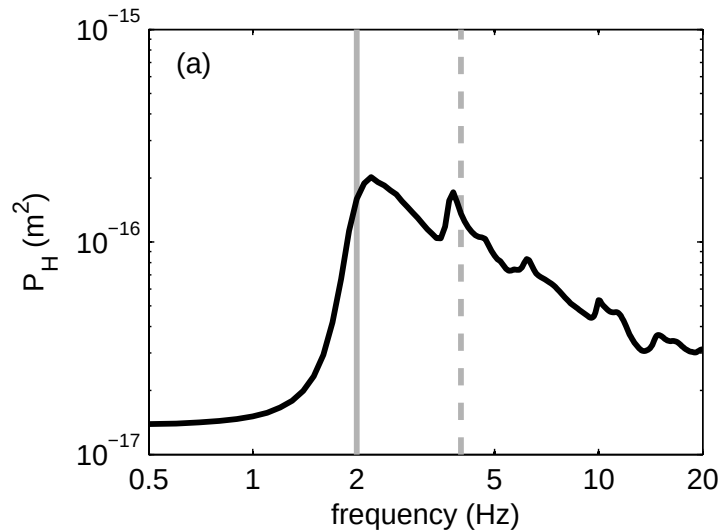


Campo completo

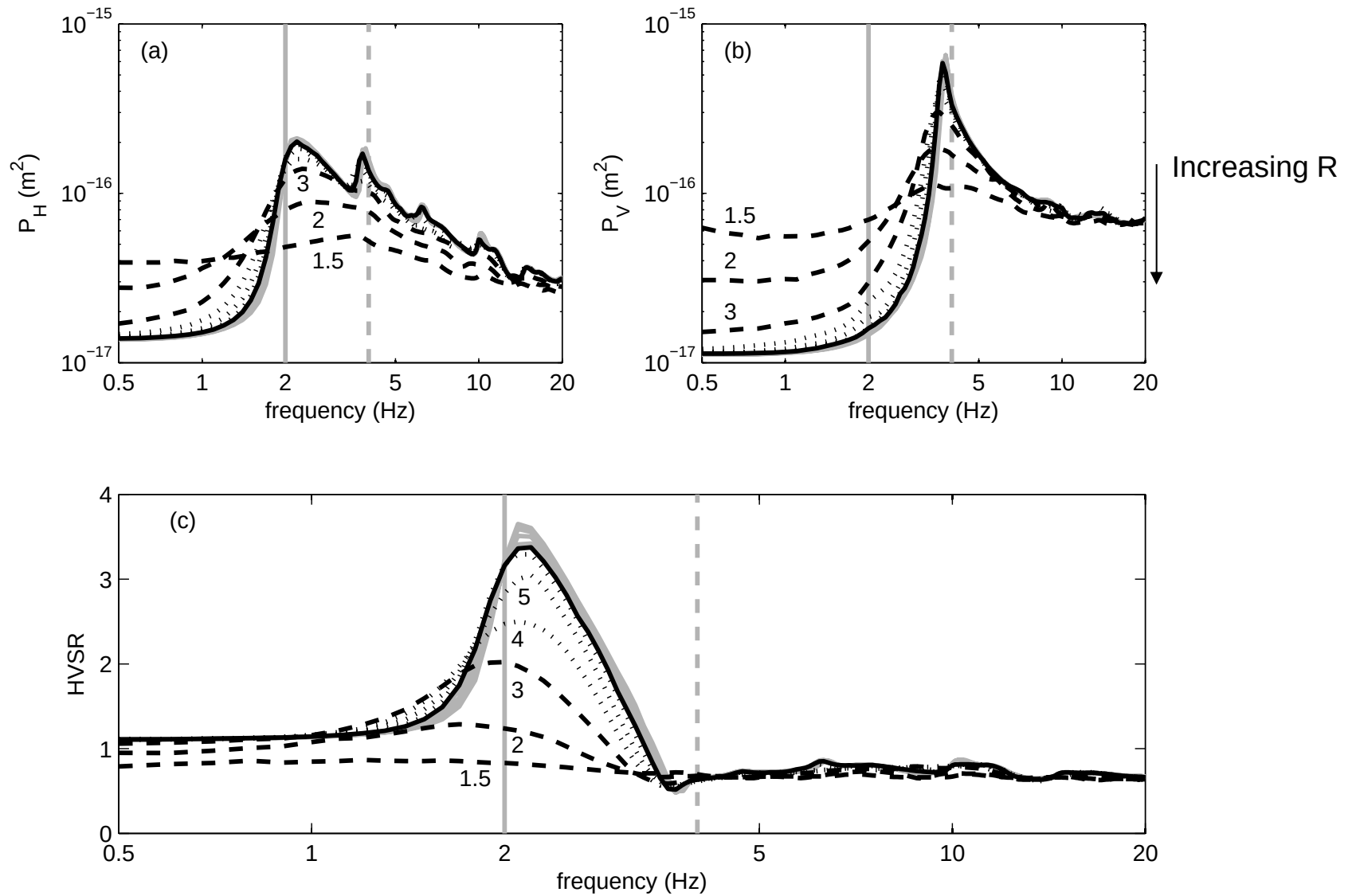
Low frequency
range (LFR)

Intermediate
frequency
range (IFR)

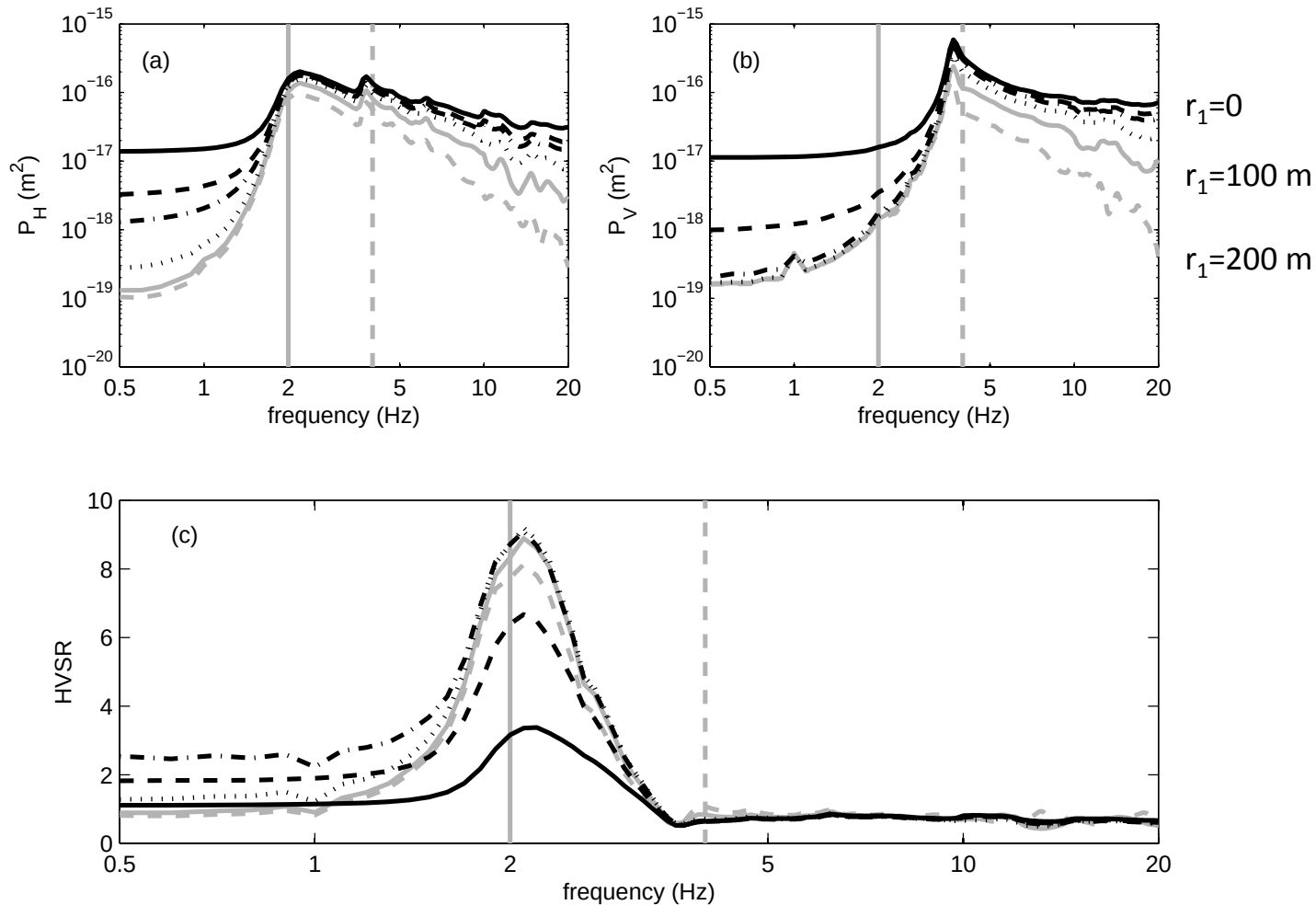
High
frequency
range (HFR)



Effetto del contrasto di impedenza sismica

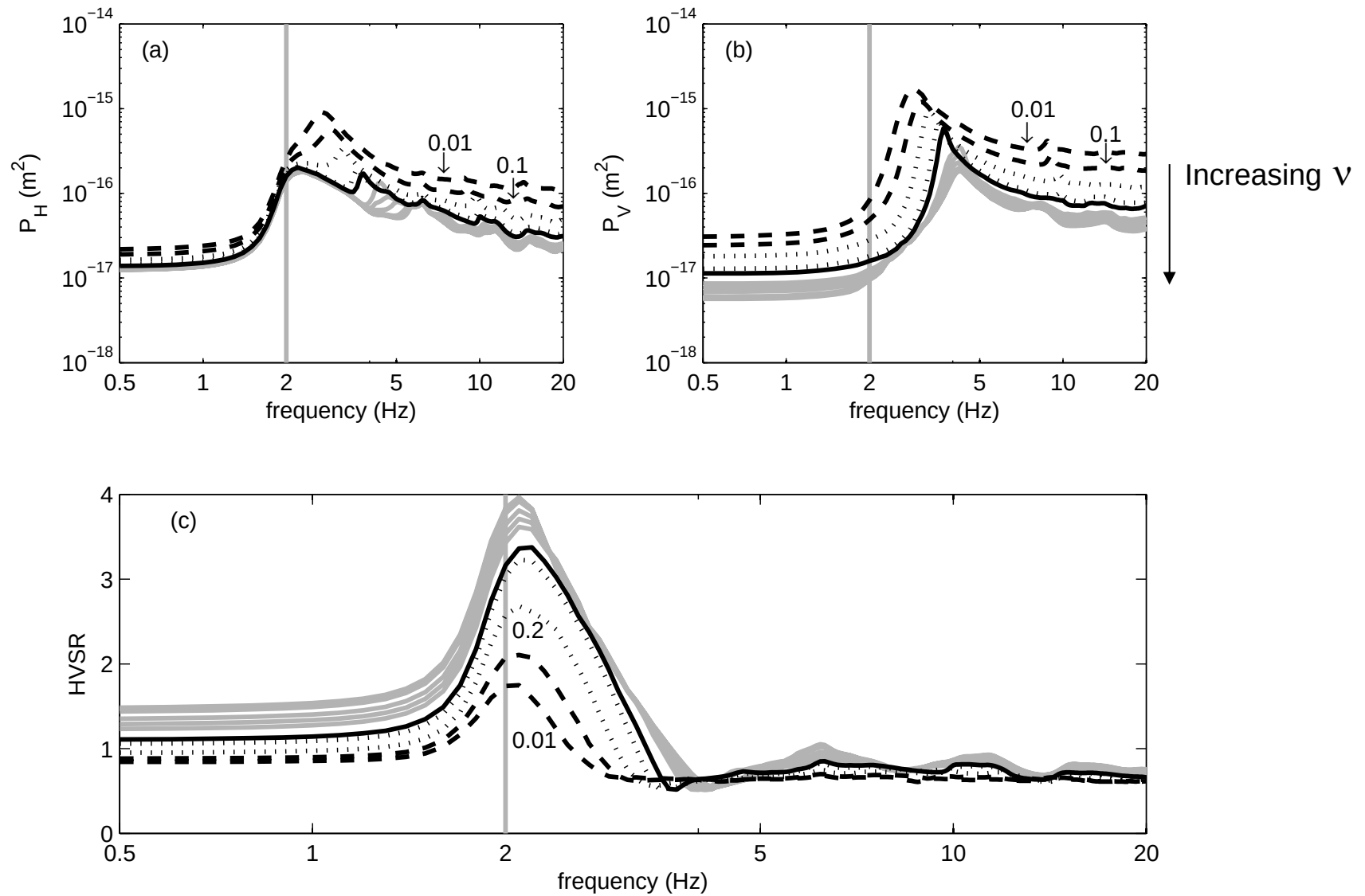


Effetto delle dimensioni dell'area libera da sorgenti



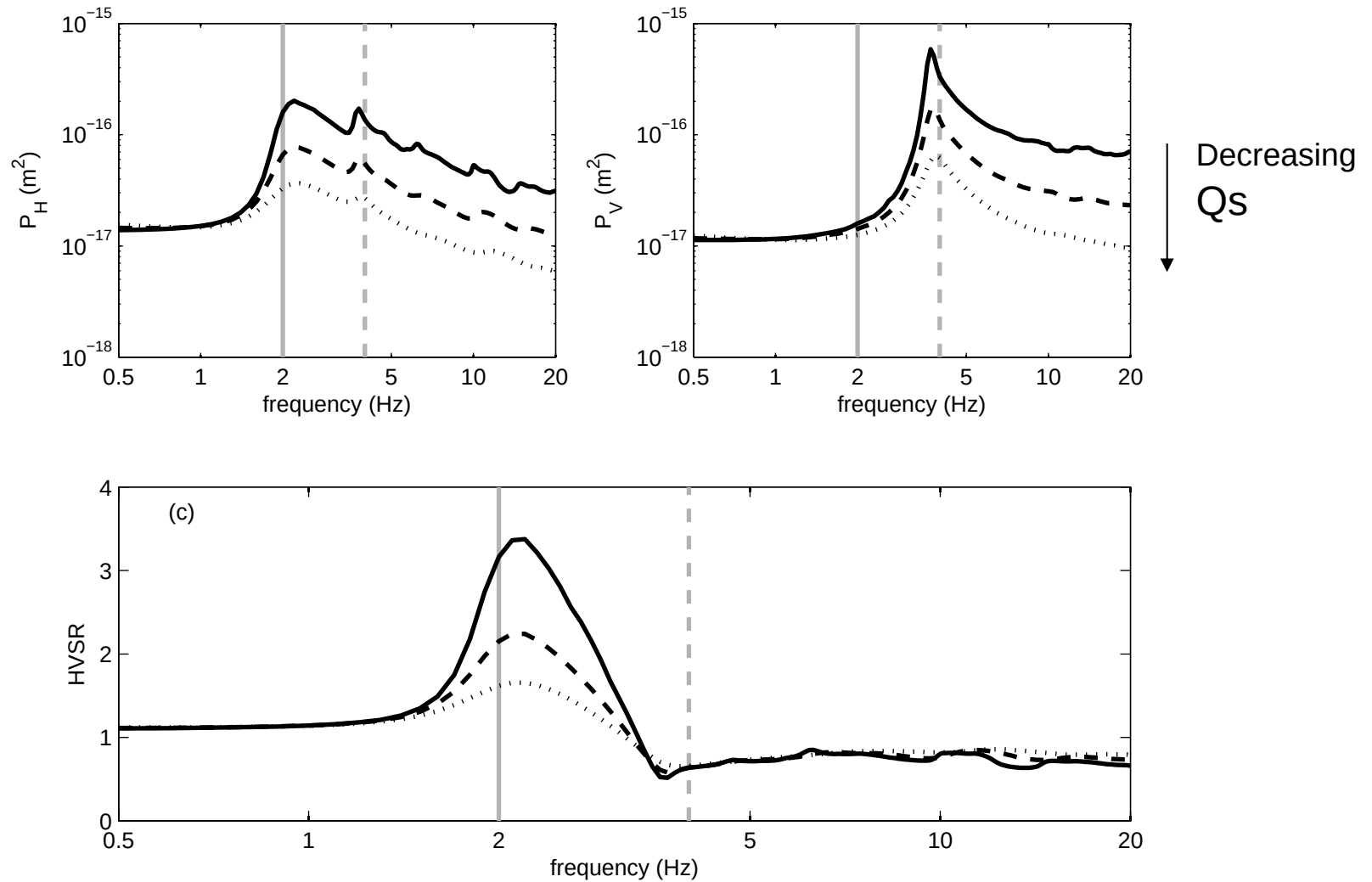
Le sorgenti vicine (<100 m) dominano le basse frequenze e influenzano la zona a frequenze intermedie (Vert.): La forma della curva HVSR dipende dalle dimensioni dell'area libera

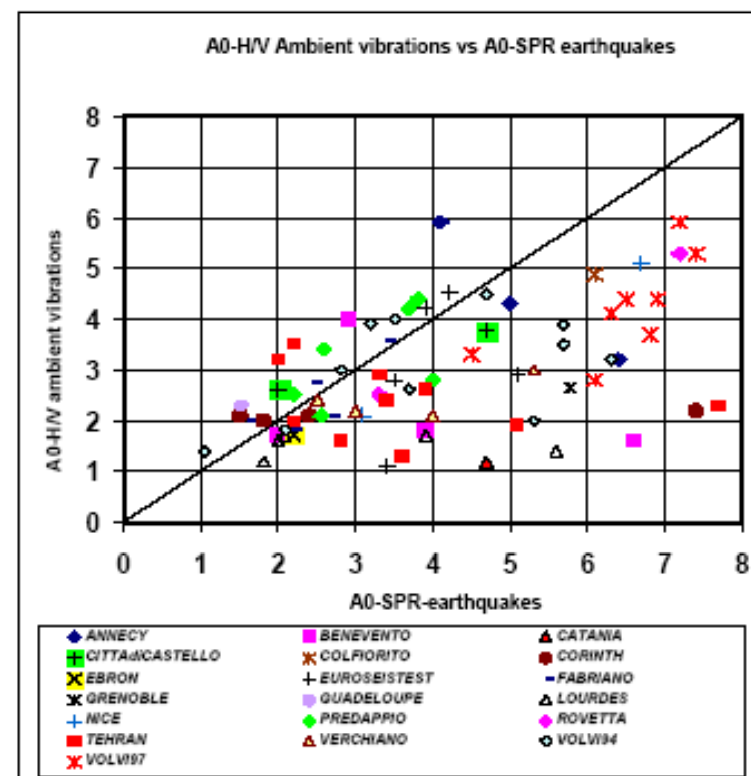
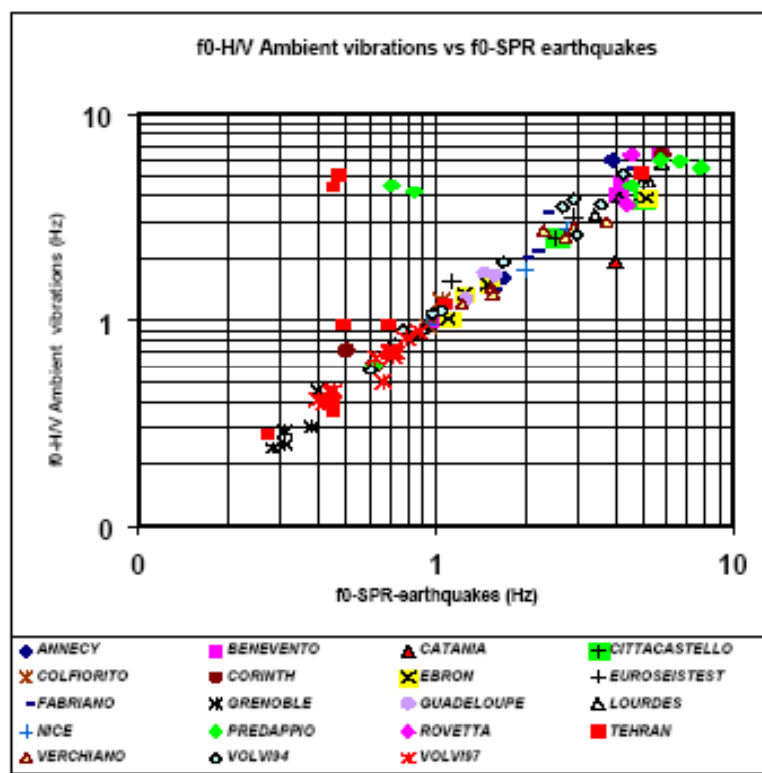
Effetto del rapporto di Poisson nello strato soffice





Effetto dello smorzamento ($Q_p = 1/2\xi_S$ and $Q_s = 1/2\xi_P$ factors)





I risultati sperimentali confermano queste indicazioni: è stato possibile appurare che il massimo della funzione HVSR permette in generale di identificare correttamente la presenza di fenomeni di risonanza e la frequenza cui il fenomeno avviene. Tuttavia non sembra in grado di definire l'entità dell'amplificazione indotta sul moto sismico



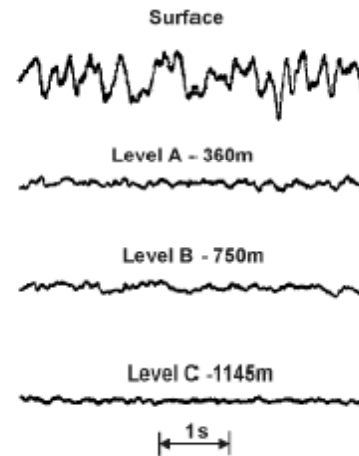
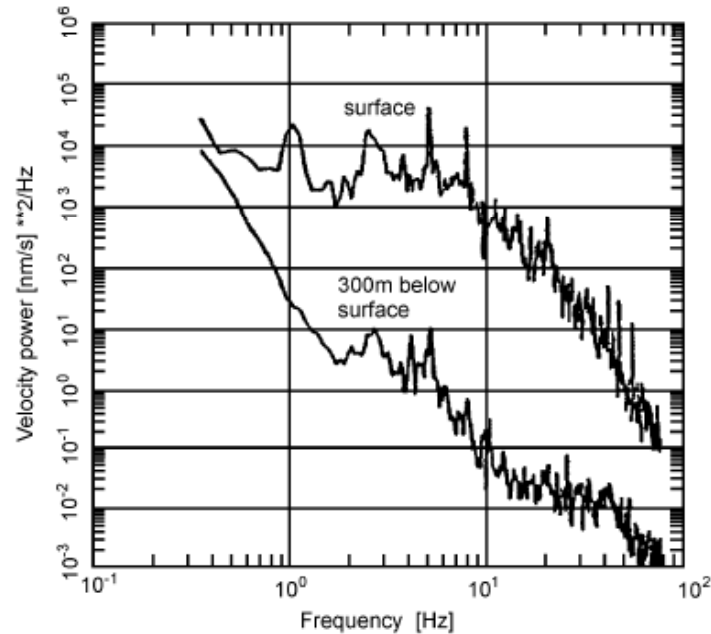
Ma quali sono le fasi presenti nel campo d'onde?

In linea di principio, ci si può aspettare che nel campo di vibrazioni siano presenti tutte le diverse fasi sismiche (onde P, onde S, onde di Rayleigh, Love e relativi modi superiori).

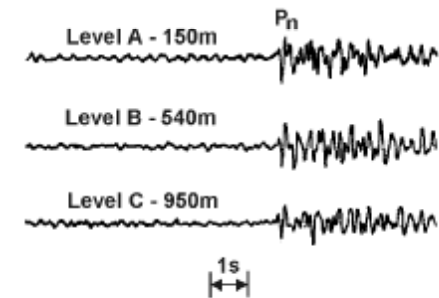
Il problema è quello di valutare il peso relativo delle diverse fasi nei diversi casi, ovvero in funzione della tipologia (media) delle sorgenti e delle caratteristiche meccaniche del mezzo attraverso cui si propagano le perturbazioni elastiche

Dato che, in generale, le onde di volume si attenuano più rapidamente e che la maggior parte delle possibili sorgenti si trovano alla superficie, ci si può aspettare che un ruolo dominante sia giocato dalle onde superficiali

In molti casi, quest'ultima congettura sembra confermata dalle osservazioni soprattutto per quanto riguarda le frequenze più basse



Vibrazioni
ambientali



Terremoto

Per esempio, confrontando le ampiezze dei segnali misurati in superficie ed in profondità

Julian Day	Hour (TU)	Proportion of Rayleigh waves (%)
076	01-02	63 +/- 7
	15-16	59 +/- 10
085	01-02	61 +/- 12
	15-16	63 +/- 9
090	01-02	65 +/- 12
	05-06	63 +/- 15
	15-16	65 +/- 10
105	01-02	63 +/- 8
	05-06	65 +/- 7
	15-16	65 +/- 7

Altri studi sembrano confermare la forte e persistente presenza di onde superficiali nelle vibrazioni ambientali

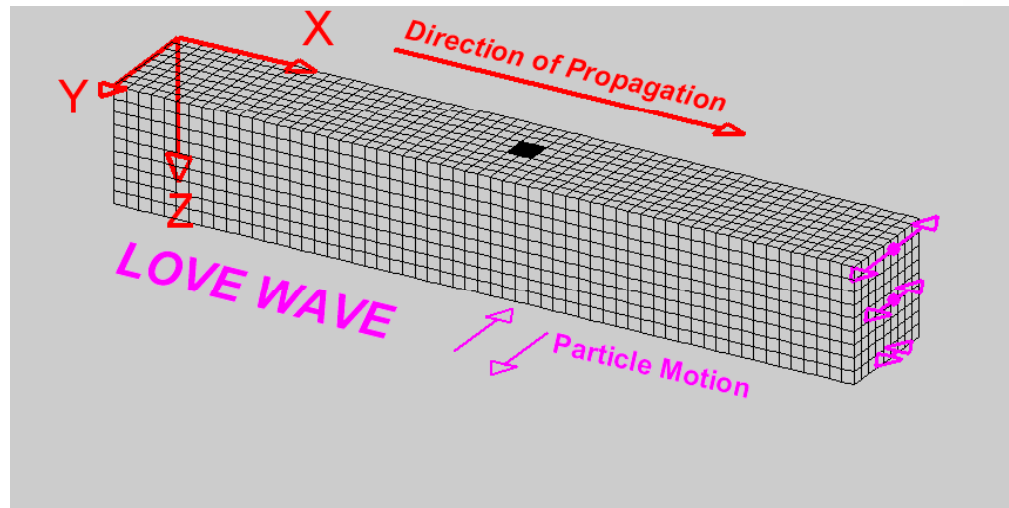
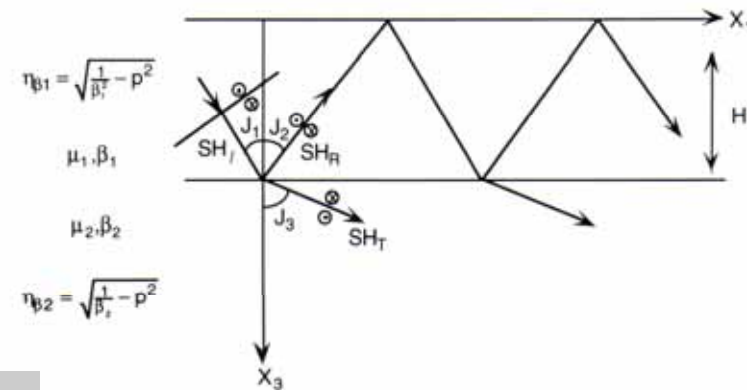
	Frequenze	Onde R (%)	Onde L (%)
Chouet et al. [1998]	> 2 Hz	30 %	> 50 %
Arai et al. [1998]	1 - 12 Hz	30 %	70 %
Yamamoto [2000]	3 - 10 Hz	< 50%	> 50 %
Cornou [2002]	< 1 Hz	60%	40%

Tabella 1.3. Sintesi delle conclusioni di alcuni autori [Chouet et al., 1998; Yamamoto, 2000; Arai e Tokimatsu, 1998; Cornou, 2002] riguardo la proporzione tra onde di Rayleigh e di Love nei microtremori [da Sesame WP08, 2004].

Onde di Love

Sono generate dall'interferenza costruttiva di onde S (SH ovvero onde S polarizzate orizzontalmente) soggette a riflessioni multiple fra la superficie del suolo e una superficie in profondità che separa due materiali a diversa velocità

Sono onde polarizzate linearmente sul piano orizzontale lungo una direzione trasversale a quella di propagazione

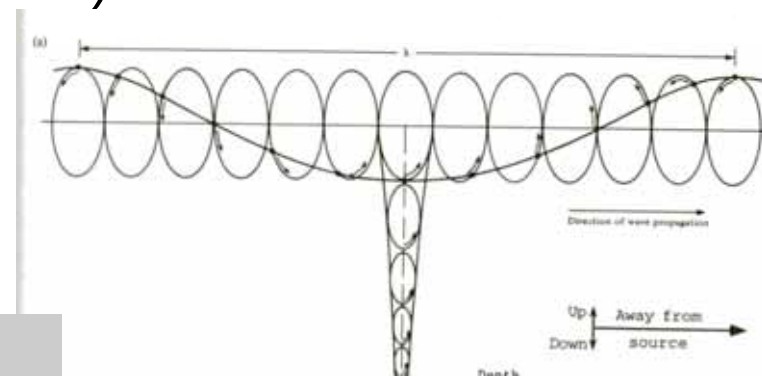
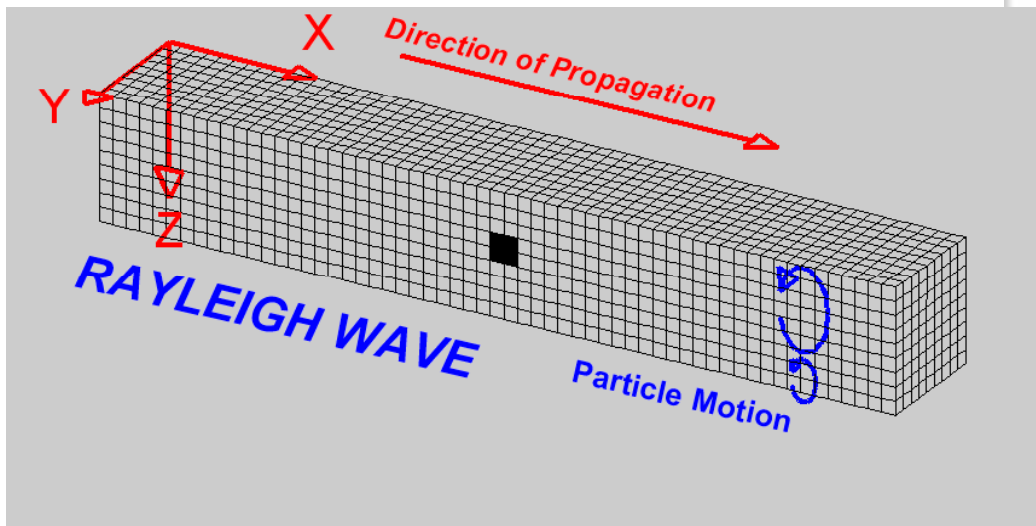


La loro presenza è condizionata dall'esistenza in profondità di una superficie di separazione fra due mezzi con diverse velocità di propagazione

Onde di Rayleigh

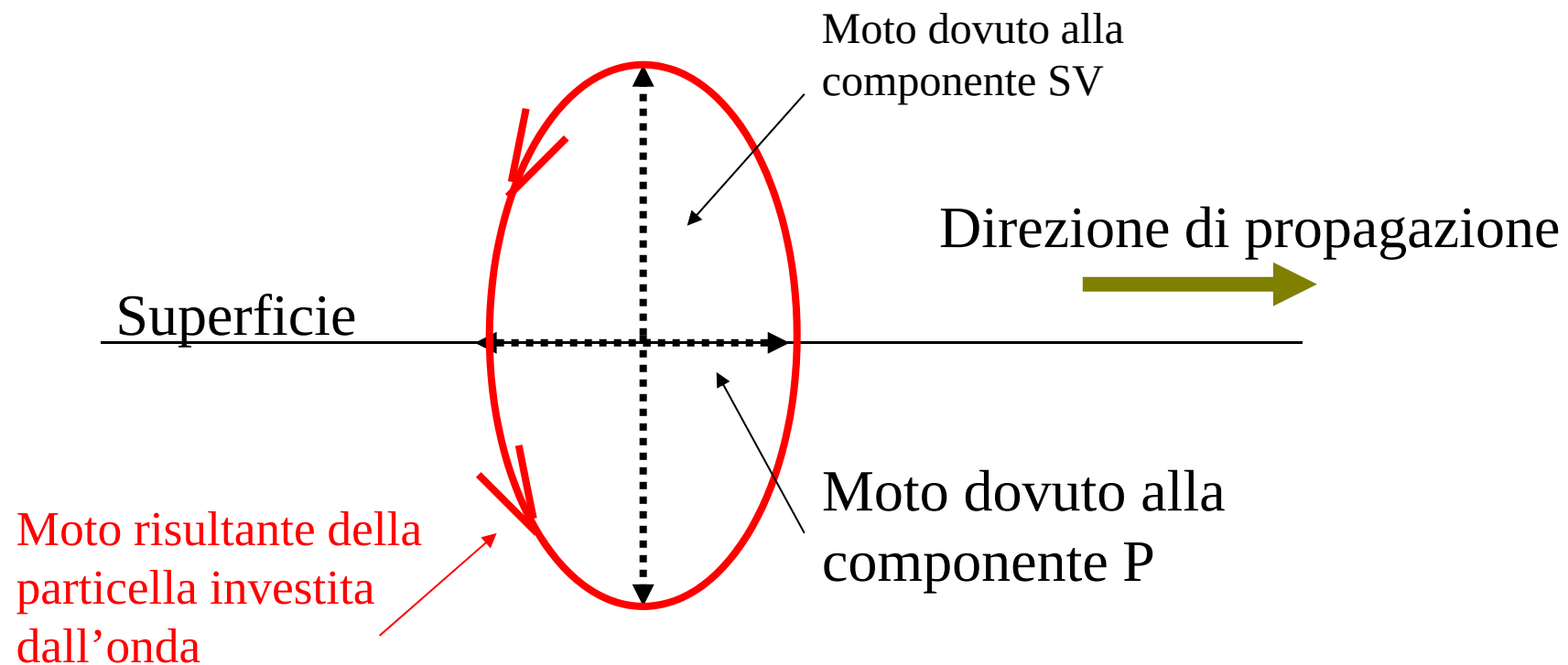
Sono generate dall'interferenza costruttiva di onde P e onde S_v (onde S polarizzate sul piano verticale) incidenti sulla superficie libera del terreno

Sono onde con polarizzazione ellittica su un piano verticale parallelo alla direzione di propagazione (ground roll)



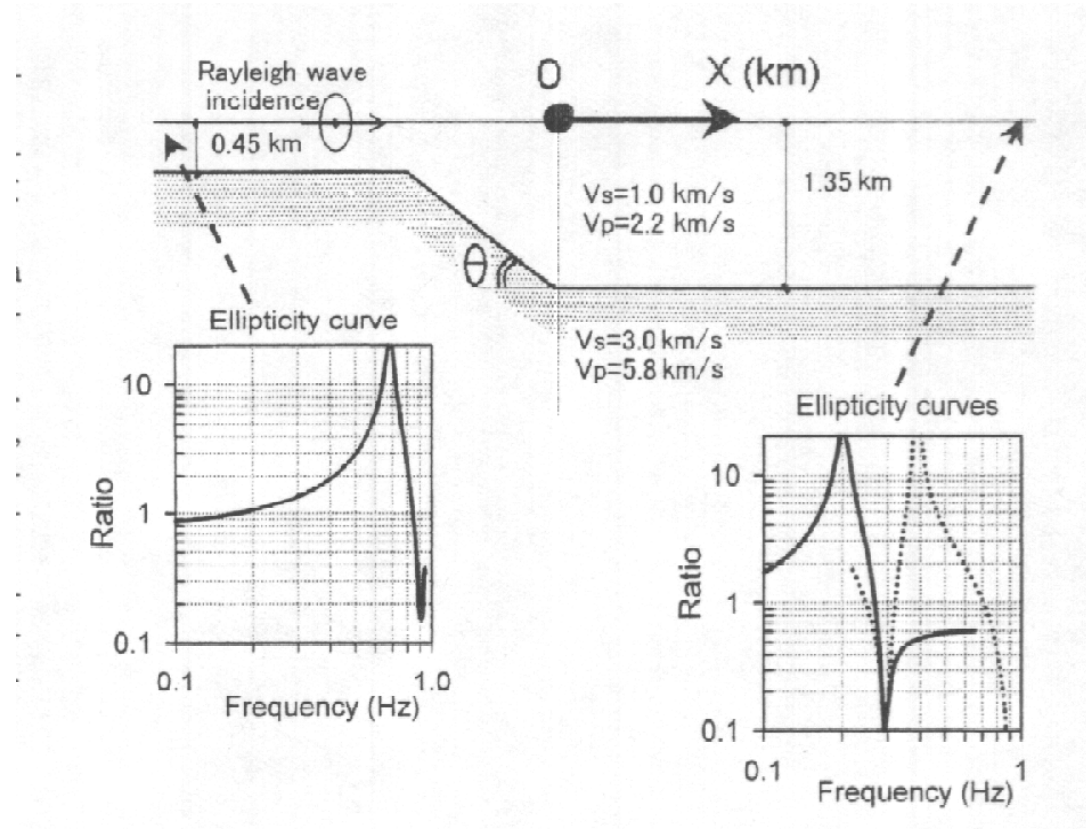
Se il moto avviene alla superficie di un semispazio, il moto della particella è retrogrado. In tutto gli altri casi, il moto è retrogrado o progrado a seconda della profondità e della configurazione del sottosuolo

Mentre le onde di Love provocano solo movimenti orizzontali, (sono essenzialmente delle onde SH canalizzate) le particelle investite da un'onda di Rayleigh, si muovono sia in direzione verticale che orizzontale seguendo una traiettoria ellittica (polarizzazione ellittica)



Il rapporto fra le componenti orizzontale e verticali del moto (rapporto H/V o ellitticità) dipende dalle caratteristiche della sorgente e da quelle del sottosuolo, inoltre varia con la frequenza di vibrazione

L'ellitticità delle onde di Rayleigh cambia con la lunghezza d'onda (o con la frequenza) in rapporto alla struttura del sottosuolo ed in particolare dal profilo di velocità delle onde S

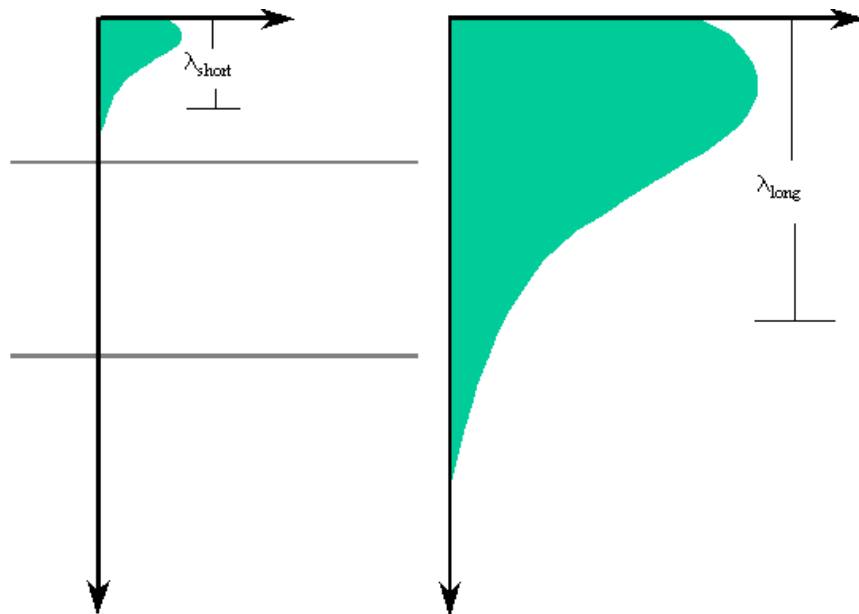


Per esempio, si vede che nel caso di uno strato soffice sovrapposto ad un semispazio, in corrispondenza della frequenza fondamentale di risonanza (periodo proprio) per le onde S ($V_s/4H$), la componente verticale del moto si annulla rendendo molto grande il rapporto fra componente orizzontale del moto e componente verticale (rapporto H/V)



Si è detto che l'ampiezza delle onde superficiali (sia Love che Rayleigh) diminuisce esponenzialmente con la profondità. In realtà la rapidità di questa attenuazione dipende dalla lunghezza d'onda associata

In particolare, all'aumentare della lunghezza d'onda λ , aumenta la profondità della parte interessata dalla perturbazione



Ma la lunghezza d'onda è legata al periodo T dell'onda mediante la relazione

$$\lambda = V \cdot T$$

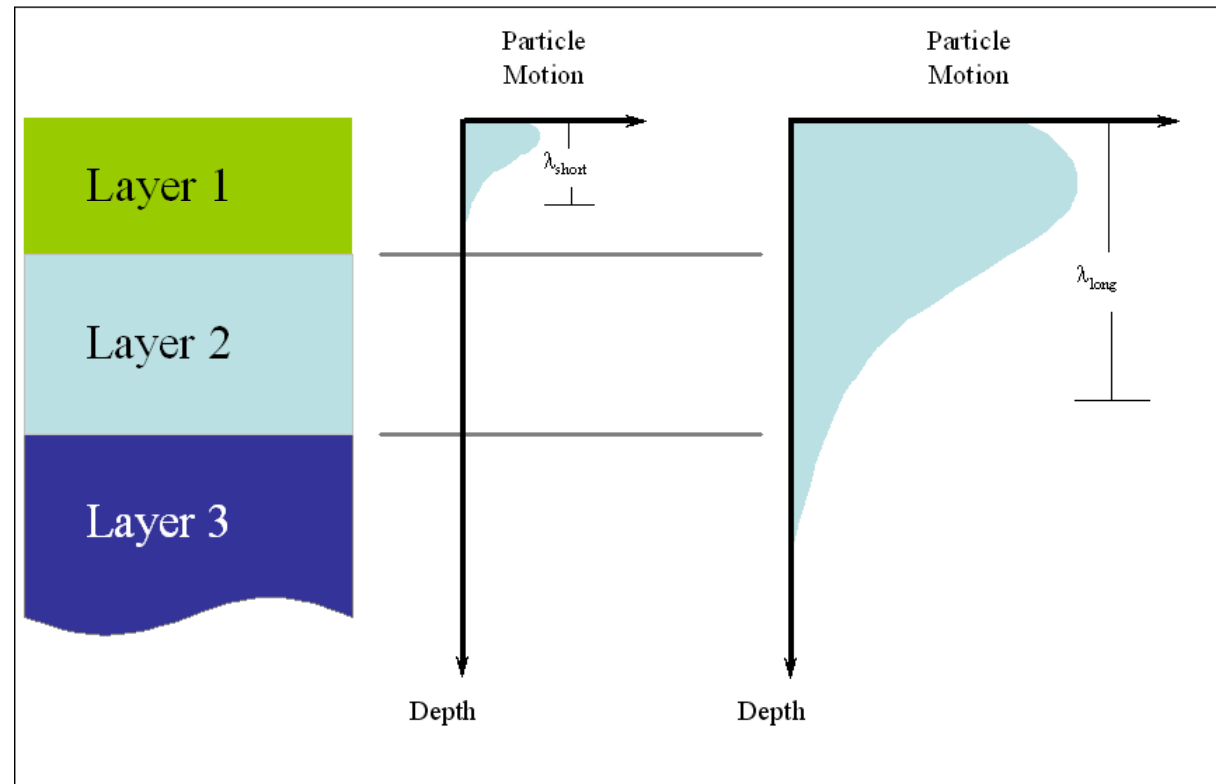
Quindi, a parità di velocità (V), la profondità cresce all'aumentare del periodo e al diminuire della frequenza

In pratica, al crescere del periodo, aumenta la sensibilità dell'onda a caratteristiche del terreno sempre più profonde



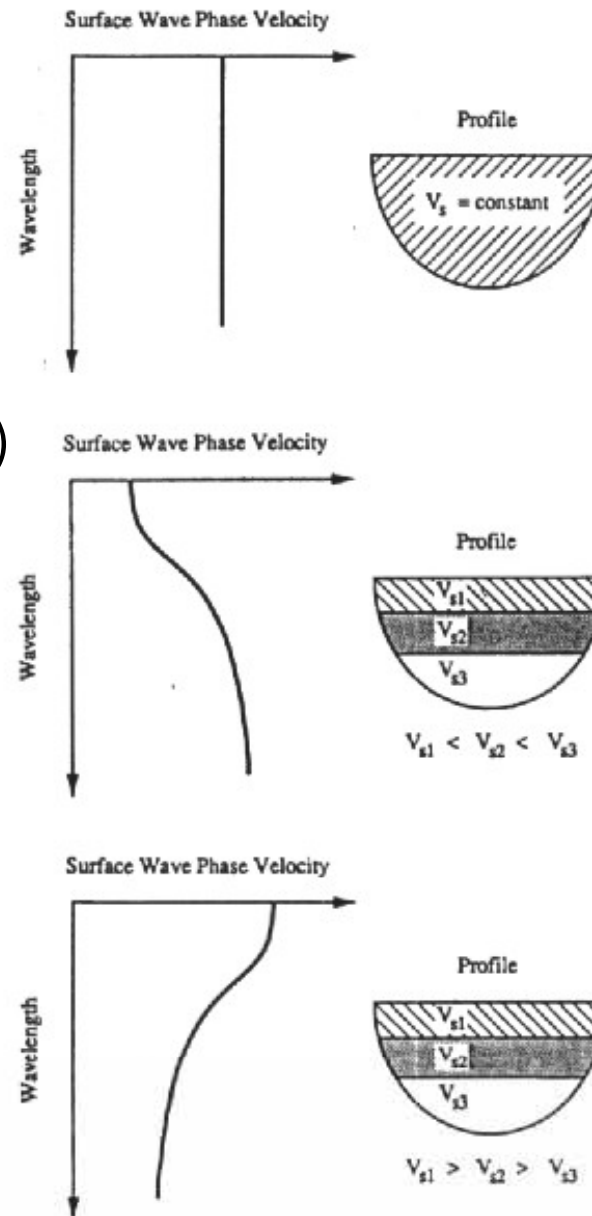
Nel caso delle onde di Rayleigh, lo strato coinvolto nella propagazione delle ha uno spessore dell'ordine di $0.3-0.7\lambda$

Quindi è ragionevole aspettarsi che, in presenza di variazioni delle velocità di propagazione che cambiano con la profondità, le velocità di propagazione delle onde superficiali cambino in funzione della relativa lunghezza d'onda o del loro periodo o frequenza (*Dispersione*)



L'andamento delle velocità di fase (ma anche delle velocità di gruppo) in funzione della lunghezza d'onda o della frequenza (o del periodo) è detta **curva di dispersione**

L'andamento della curva di dispersione fornisce informazioni sul profilo di velocità nel sottosuolo



Utilizzando i modelli diretti disponibili si vede che le caratteristiche del sottosuolo che maggiormente influenzano che nel caso della curva di dispersione, sono il valore di V_s e lo spessore del singolo strato

Parametri per ciascuno strato:

❖ Spessore

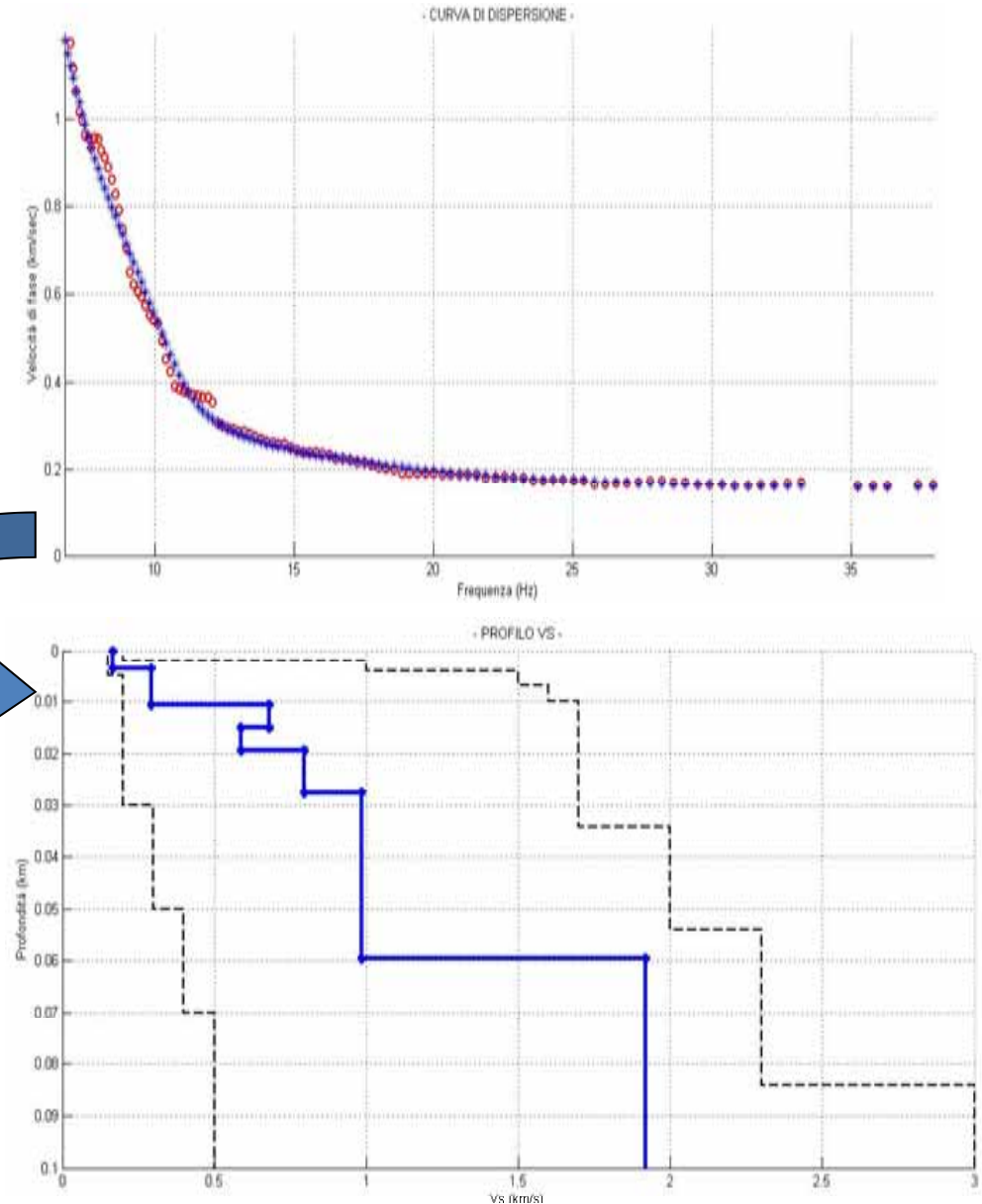
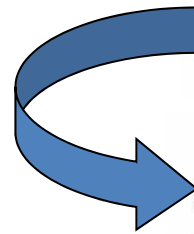
❖ V_s

❖ V_P

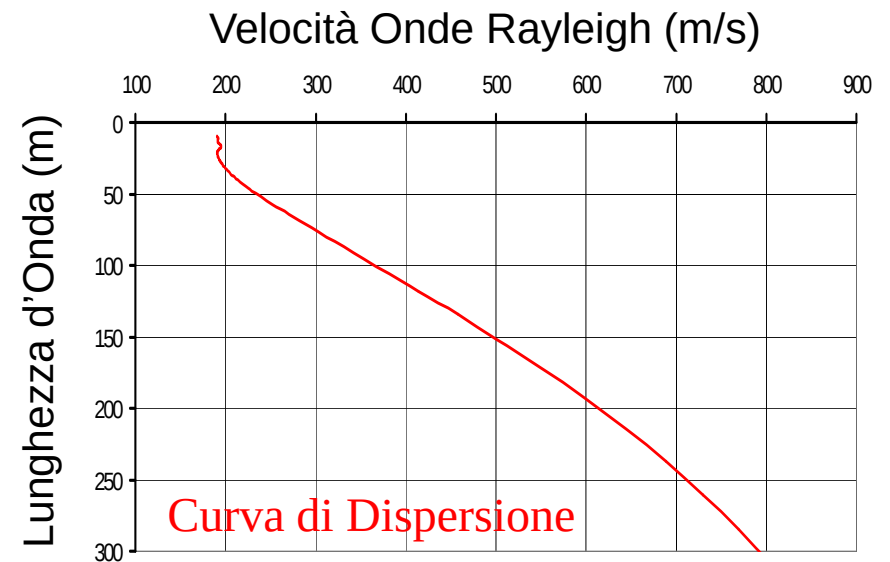
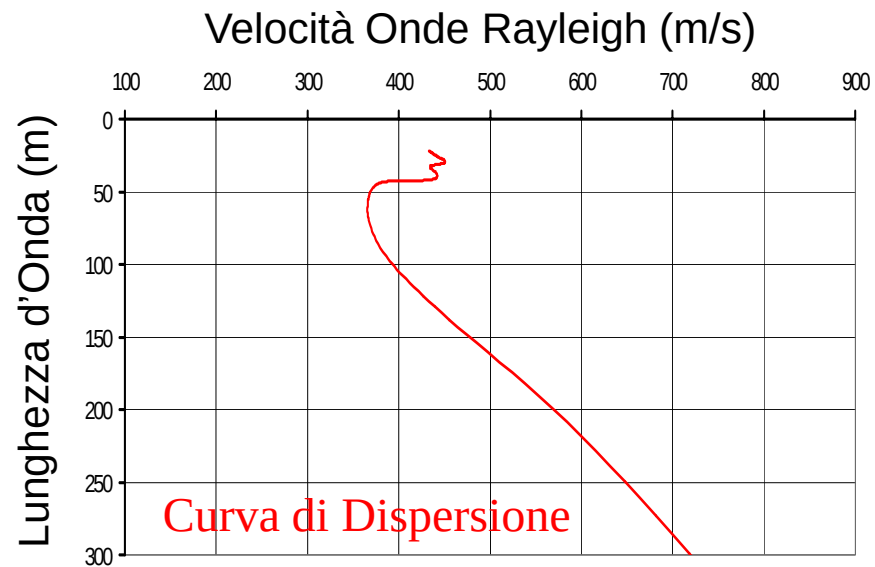
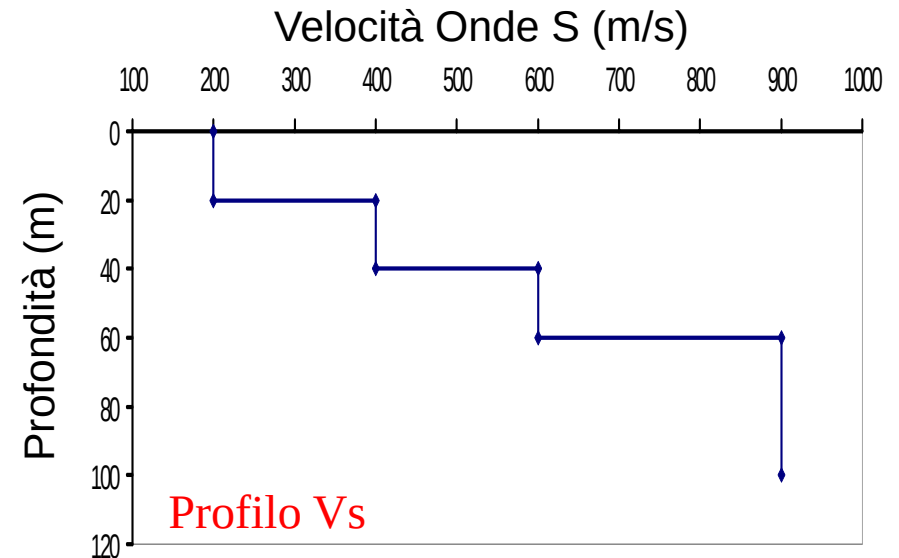
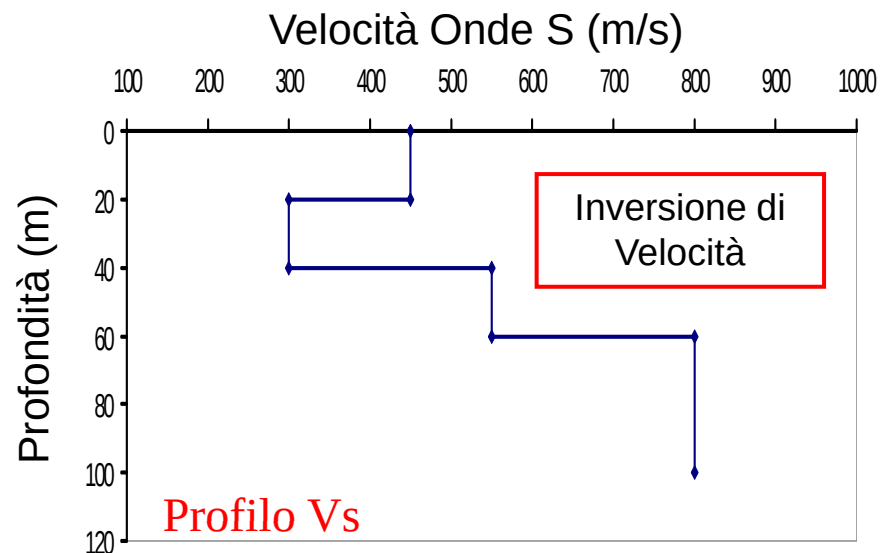
❖ Densità



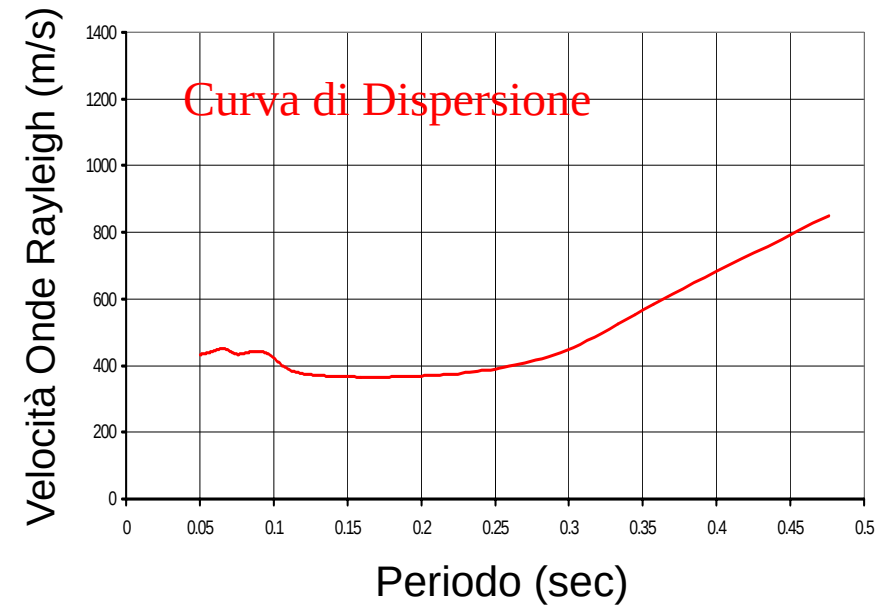
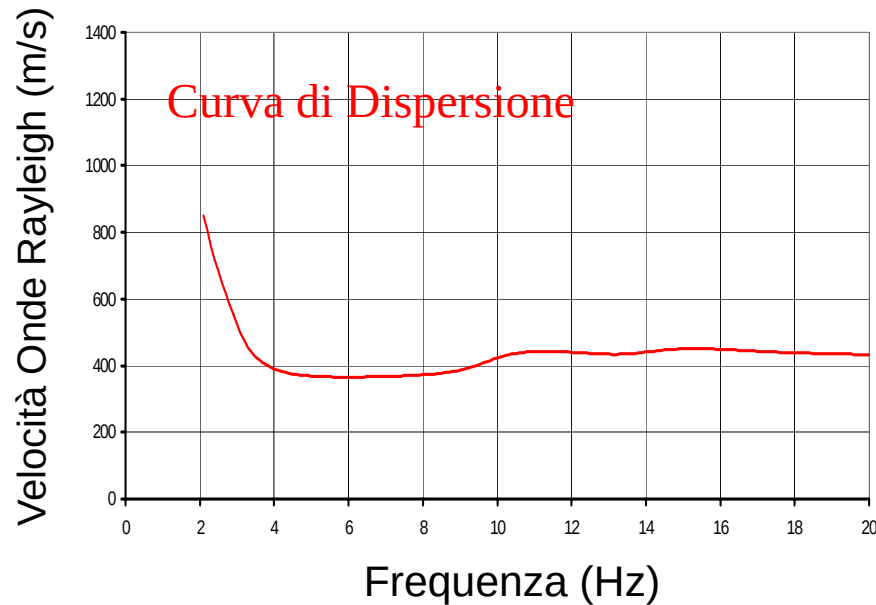
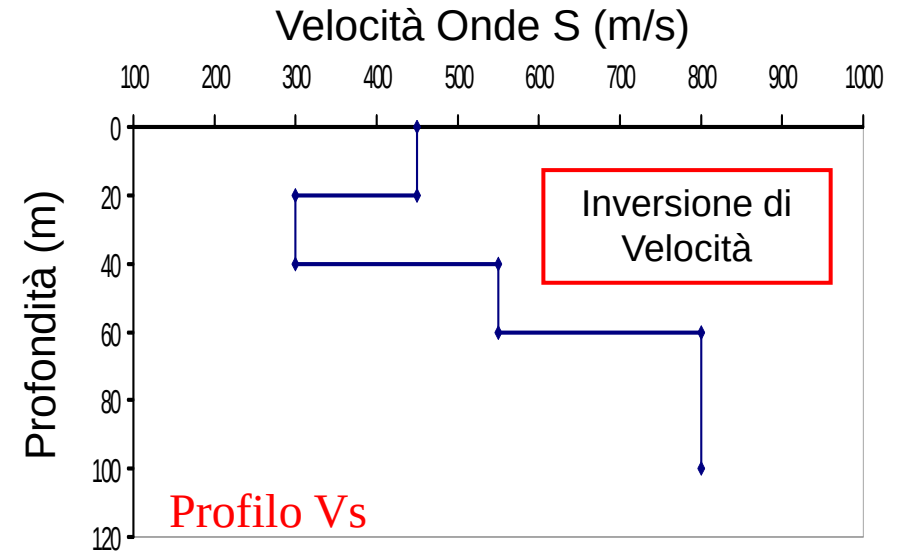
Più influenti



L'effetto della stratigrafia sull'andamento della curva di dispersione può essere studiato mediante procedure di tipo numerico



Naturalmente, rappresentazioni della curva di dispersione in termini funzione del periodo o della frequenza sono del tutto equivalenti

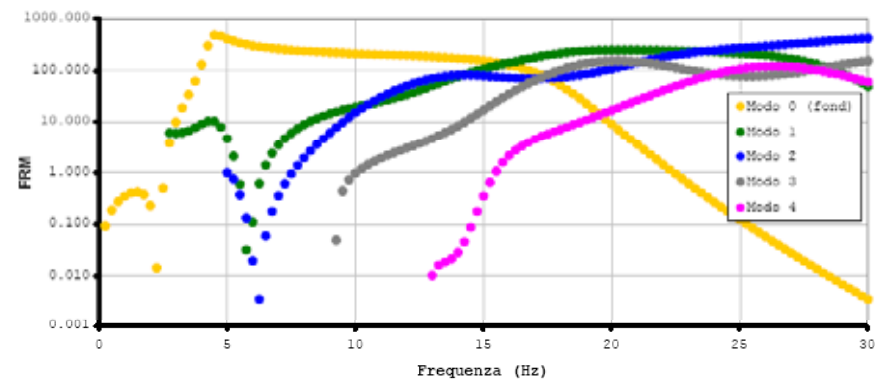
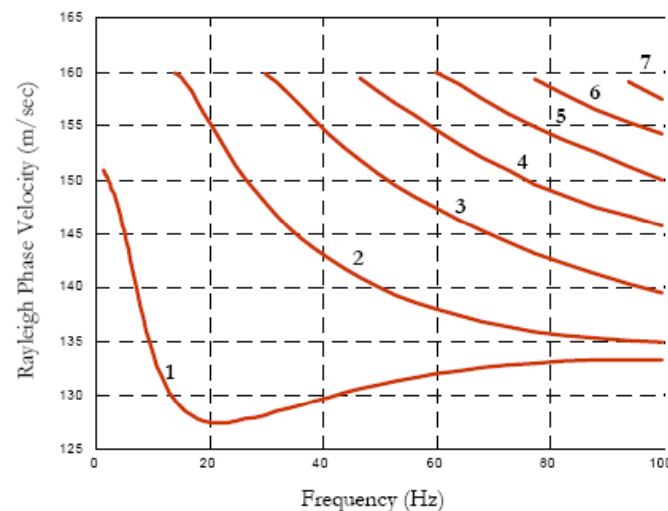


In mezzi stratificati l'interferenza delle onde di volume alla superficie può essere più articolata: le onde Superficiali possono presentare diversi Modi di propagazione

Questi, a parità di frequenza di vibrazione, hanno maggiori profondità di esplorazione e quindi sarà influenzato da valori diversi delle velocità di propagazione

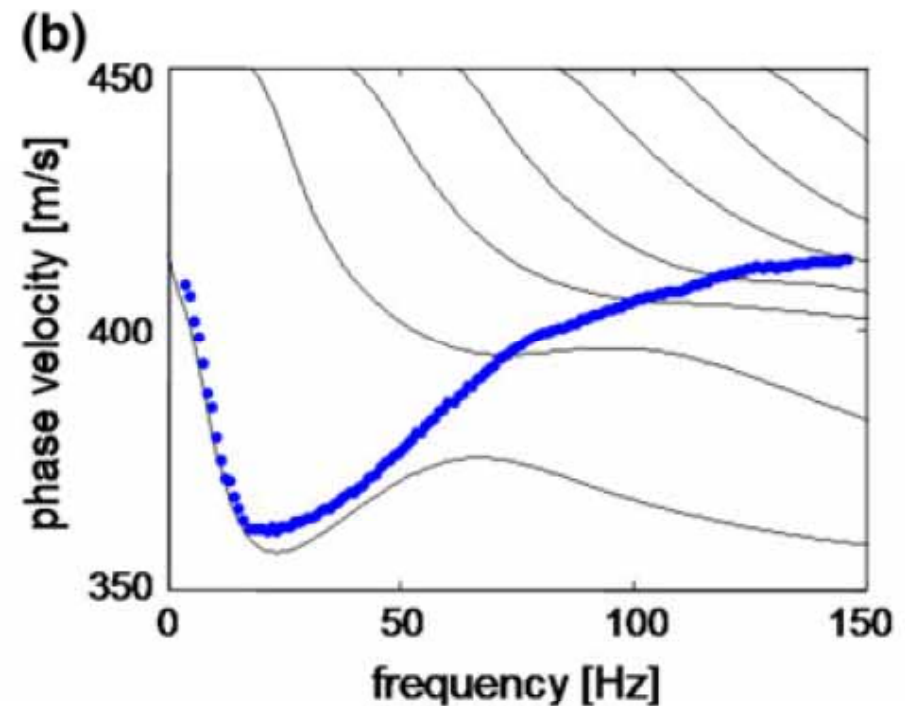
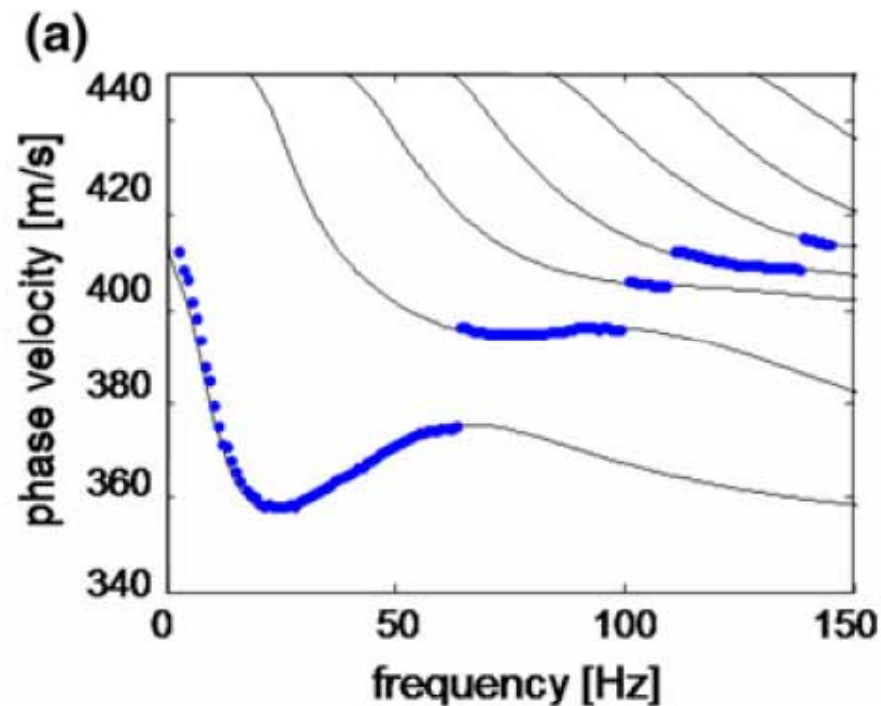
Ciascun modo darà quindi origine ad una propria curva di dispersione ed una propria energia

Nei mezzi con velocità crescenti, il modo fondamentale solitamente è quello dominante, ma questo non è vero negli altri casi



I modi superiori possono giocare un ruolo importante in molte situazioni (per esempio in presenza di inversioni di velocità o di forti contrasti di impedenza sismica)

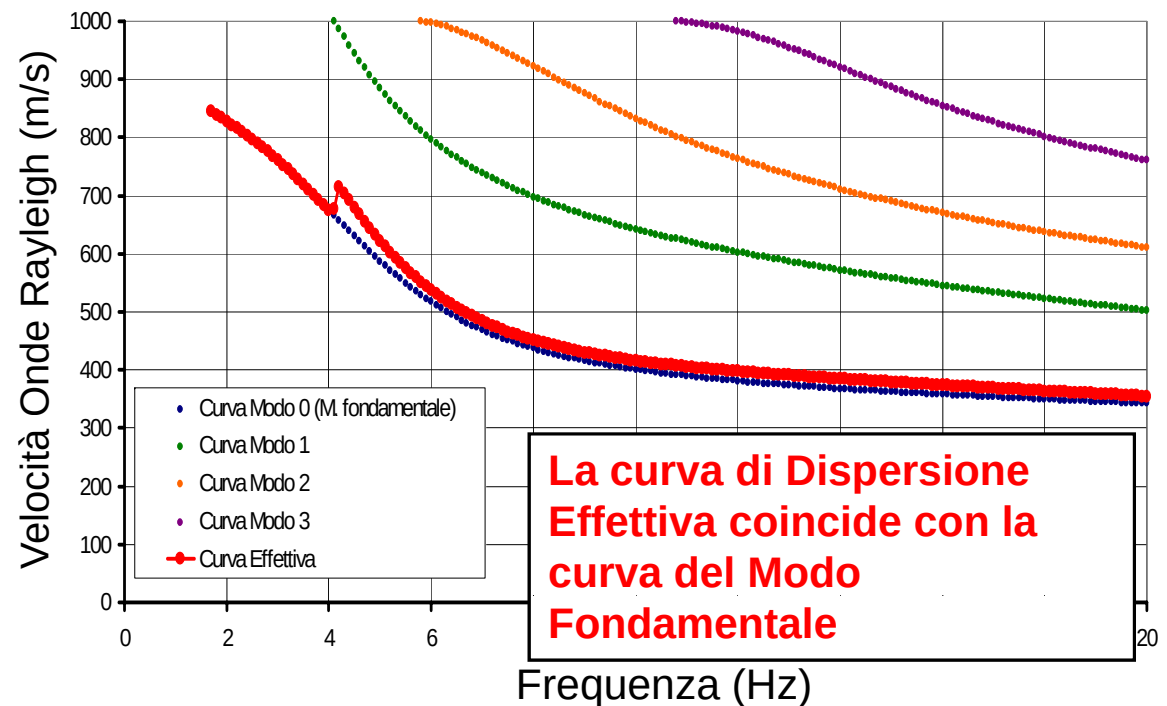
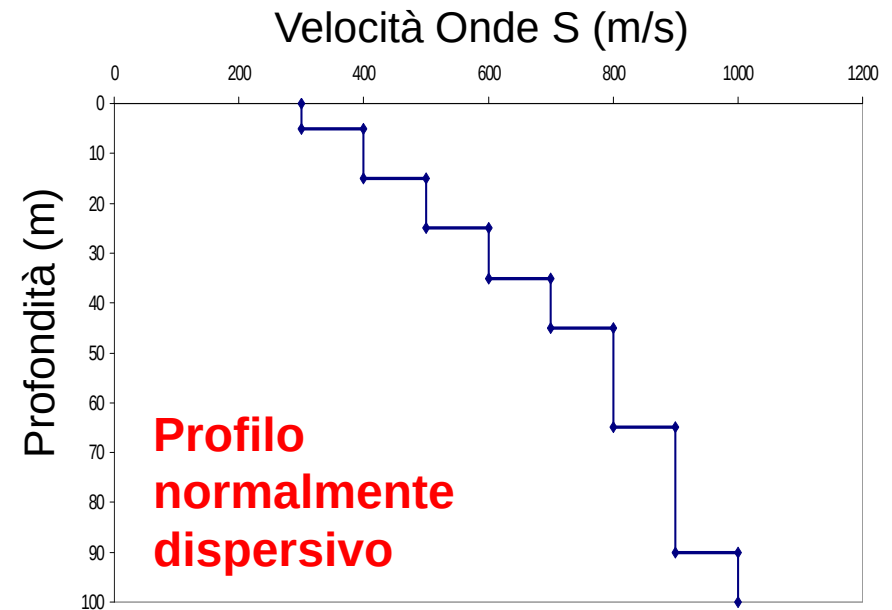
Una scorretta identificazione dei modi può indurre gravi errori interpretativi!!



In realtà, è possibile definire una **curva di dispersione effettiva** che rappresenta la velocità “apparente” delle onde superficiali ovvero la velocità equivalente ad un’onda rappresentativa dell’insieme delle onde dei diversi modi.

In pratica, la curva effettiva è una combinazione delle diverse curve modali “pesate” in base al loro specifico contenuto energetico nel sito

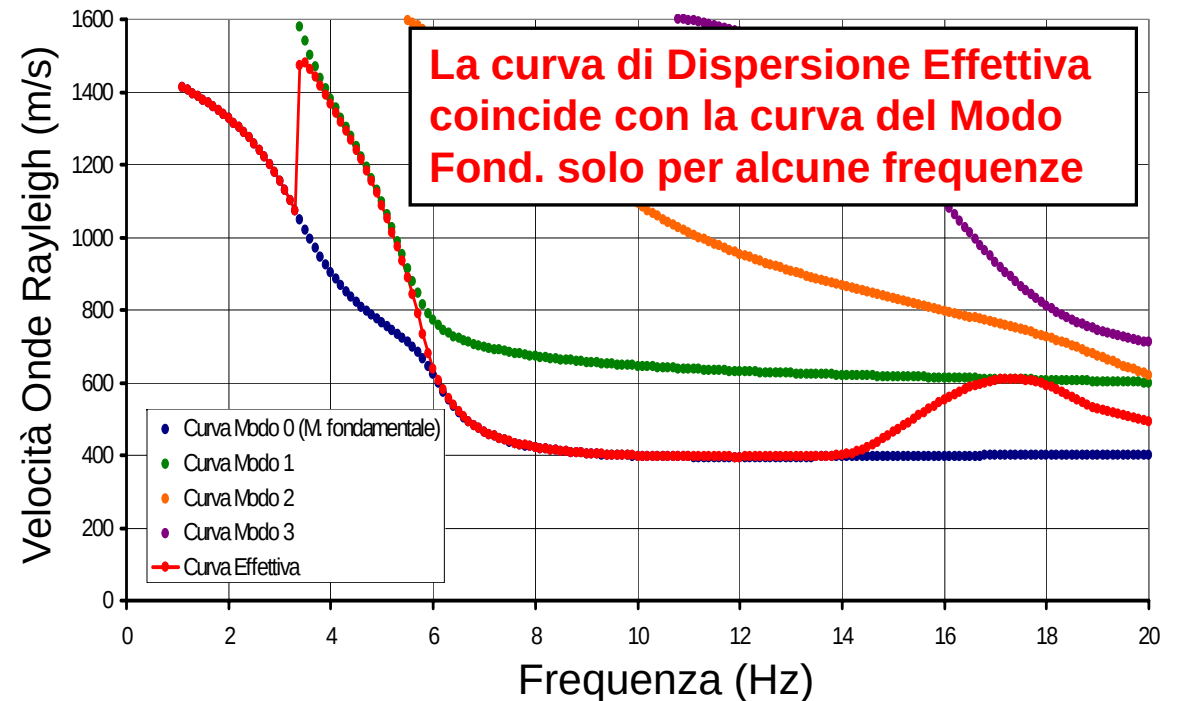
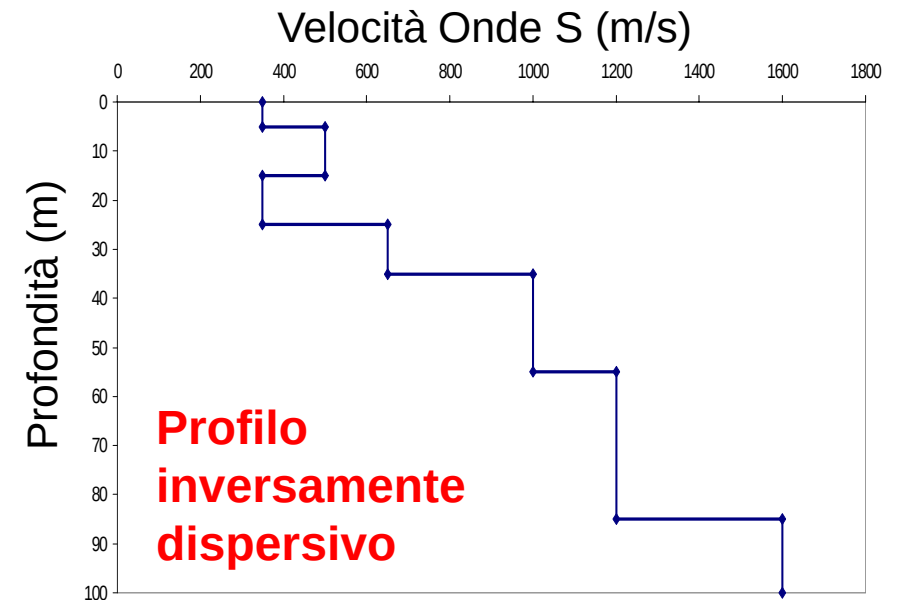
Nel caso di profili normalmente dispersivi la curva di dispersione effettiva coincide con la curva relativa al modo fondamentale (quello in questo caso più energetico)



In altri casi, per esempio in presenza di inversioni di velocità o di forti contrasti di impedenza sismica, la **curva di dispersione effettiva** risulta frutto di una combinazione dei diversi modi in funzione della relativa energia

Un vantaggio è che la curva effettiva può essere modellata teoricamente

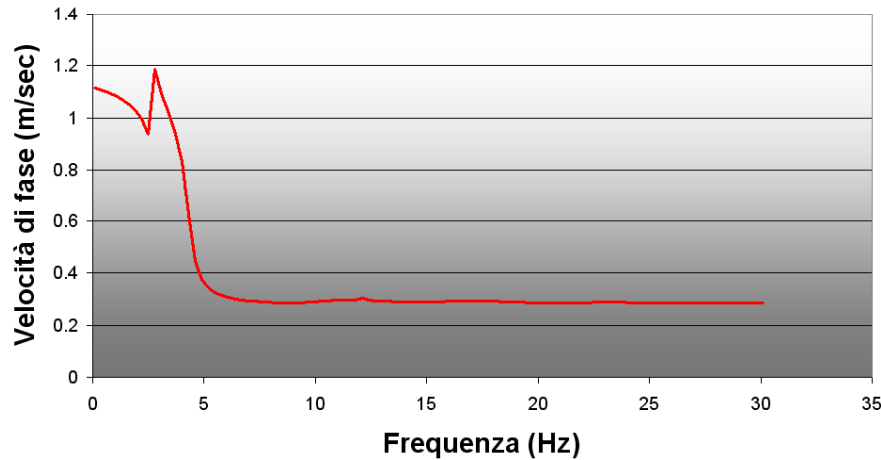
Se applicata per l'interpretazione di curve sperimentali rende inutile il riconoscimento dei singoli modi





Con adeguate procedure numeriche (p.es. <http://nato.gfz.hr/>) è quindi possibile studiare l'effetto della stratigrafia sulla forma dell'ellitticità e della curva di dispersione effettiva alle diverse frequenze tenendo conto del contributo dei diversi modi

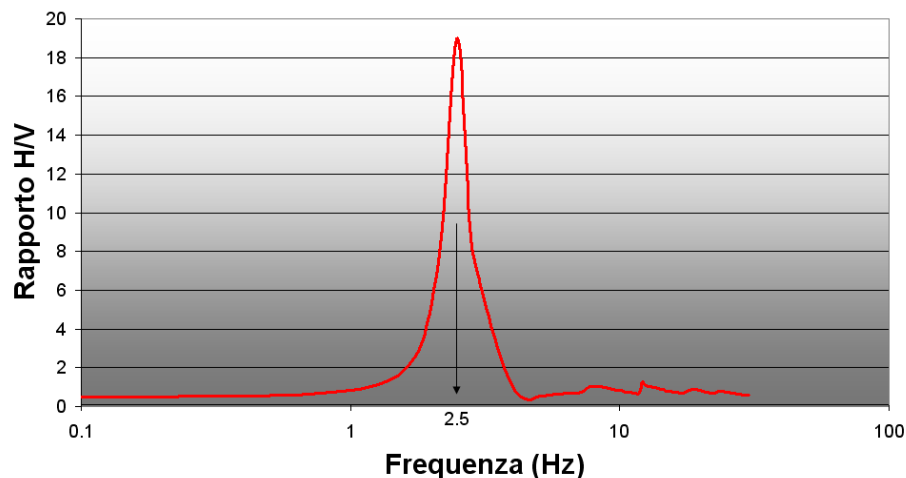
Curva di dispersione (Rayleigh)



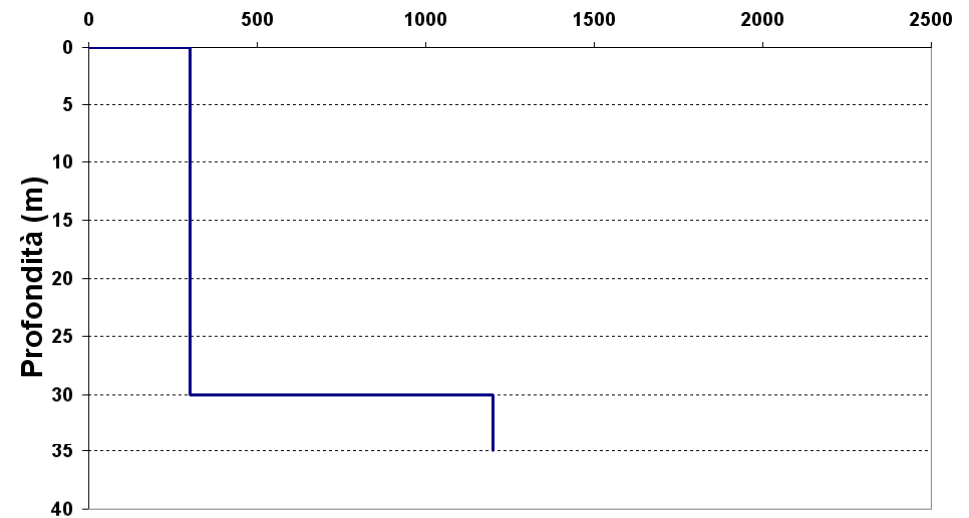
Copertura soffice ($V_s=300$ m/s) di spessore 30 m su substrato rigido ($V_s=1200$ m/s)

$$v_1 = \frac{v_s}{4H} = 2.5 \text{ Hz}$$

Ellitticità (H/V)



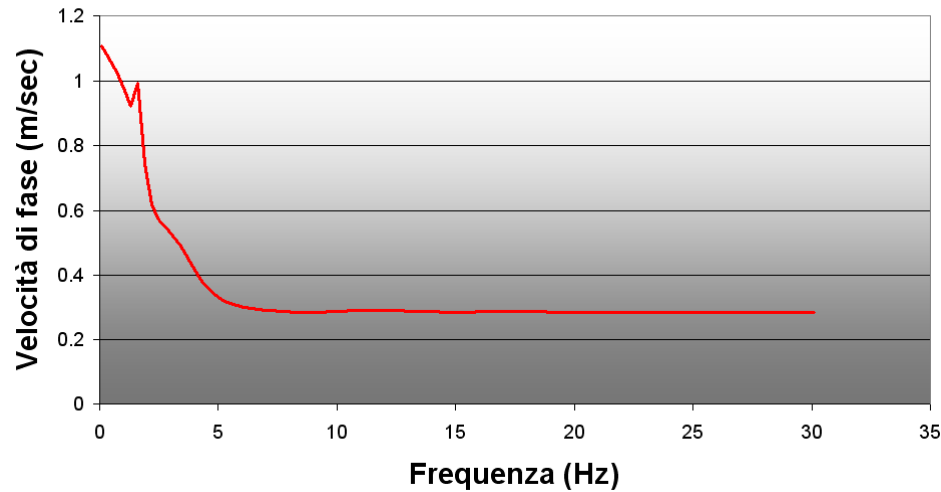
Velocità delle onde S (m/sec)





Esempio 2

Curva di dispersione (Rayleigh)



Strato 1: $H=30$, $V_s=300$

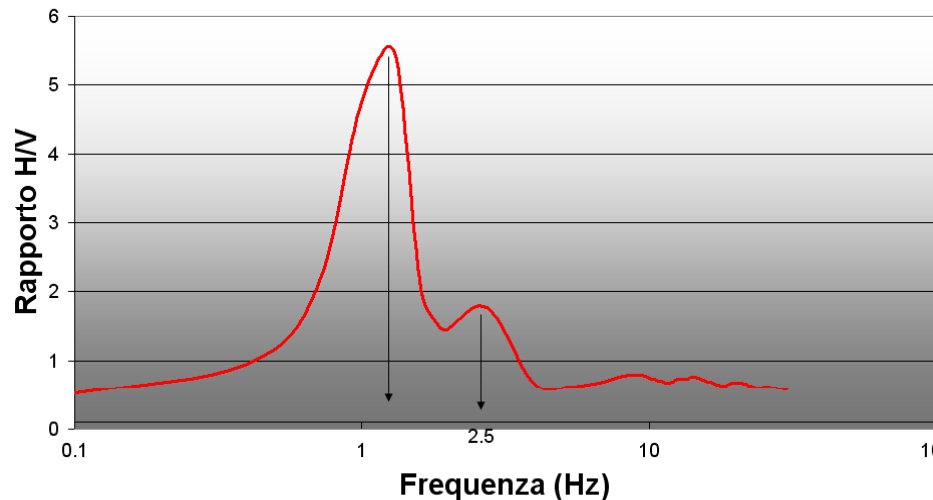
Strato 2: $H=70$, $V_s=600$

Substrato : $V_s=1200$

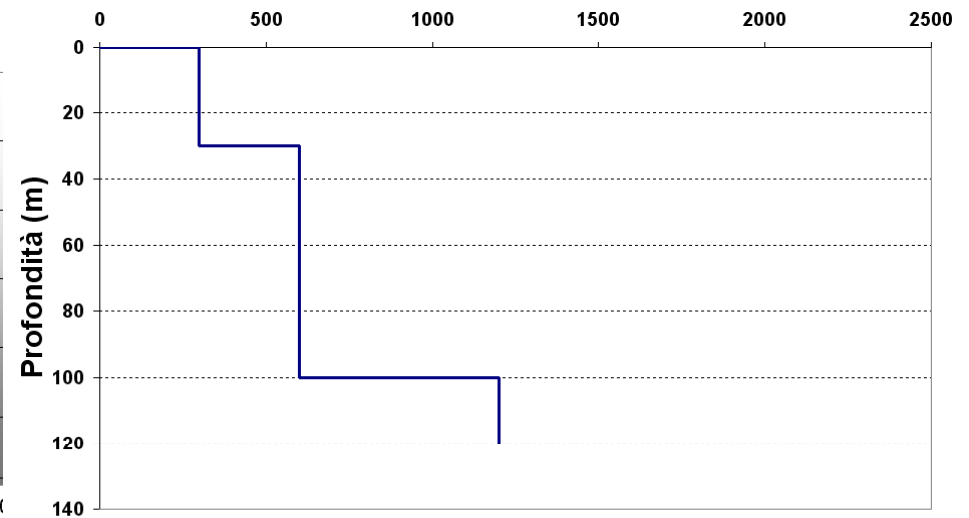
$$v_1 = \frac{v_s}{4H} = 2.5 \text{ Hz}$$

$$v_2 = \frac{\bar{v}_s}{4H} = 1.15 \text{ Hz}$$

Ellitticità (H/V)

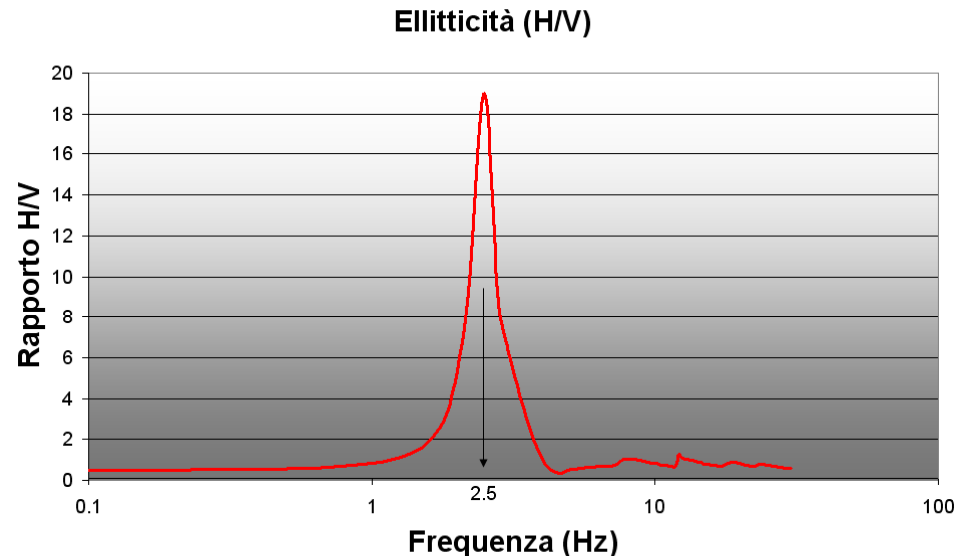


Velocità delle onde S (m/sec)



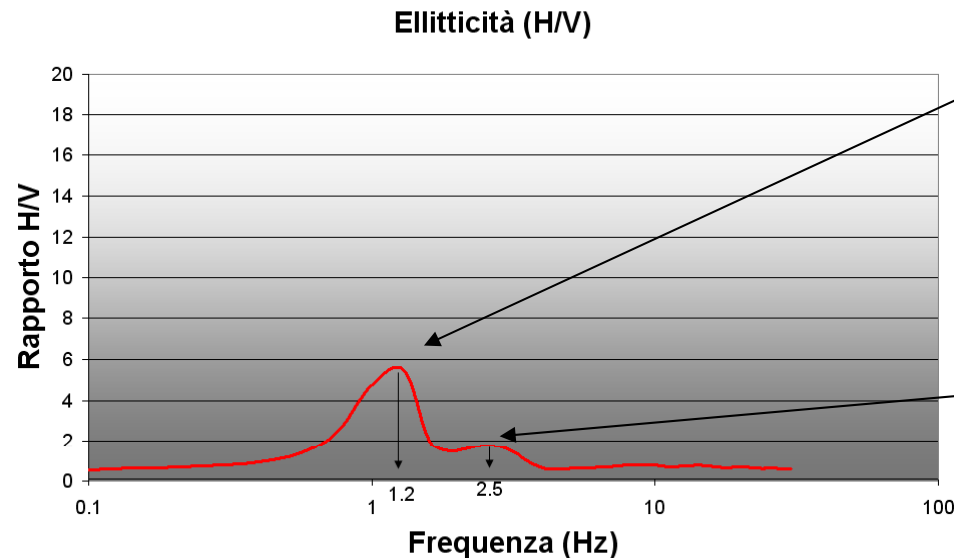


Si noti che esiste una certa proporzionalità (tutt'altro che lineare) fra l'entità del rapporto di impedenza sismica fra strato risonante e substrato e l'ampiezza massima della funzione di ellitticità



$$v_1 = \frac{v_s}{4H} = \frac{300}{4 \cdot 30} = 2.5 \text{ Hz}$$

$$FA_{\max} = \left(\frac{\rho_b v_b}{\rho_s v_s} \right) = \left(\frac{2000 \cdot 1200}{1800 \cdot 300} \right) = 4.4$$



$$v_2 = \frac{\bar{v}_s}{4H} = 1.2 \text{ Hz}$$

$$FA_{\max} = \left(\frac{\rho_b v_b}{\bar{\rho}_s \bar{v}_s} \right) = \left(\frac{2000 \cdot 1200}{1900 \cdot 480} \right) = 2.6$$

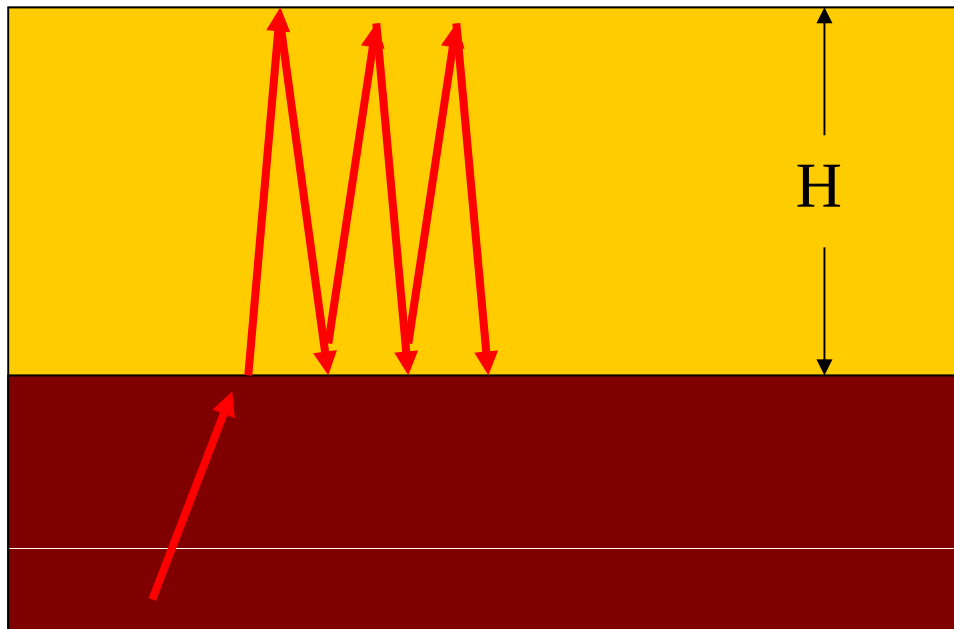
$$v_1 = \frac{v_s}{4H} = \frac{300}{4 \cdot 30} = 2.5 \text{ Hz}$$

$$FA_{\max} = \left(\frac{\rho_b v_b}{\rho_s v_s} \right) = \left(\frac{1900 \cdot 600}{1800 \cdot 300} \right) = 2.1$$



Quando si analizzano le onde superficiali è necessario tenere conto di un importante fenomeno spesso sottovalutato.

In generale, i forti contrasti di impedenza sismica tendono a produrre effetti di intrappolamento dell'energia fra le interfacce dove questi contrasti sono presenti (per esempio alla superficie e alla base delle coperture) dando origine al fenomeno della **risonanza sismica**

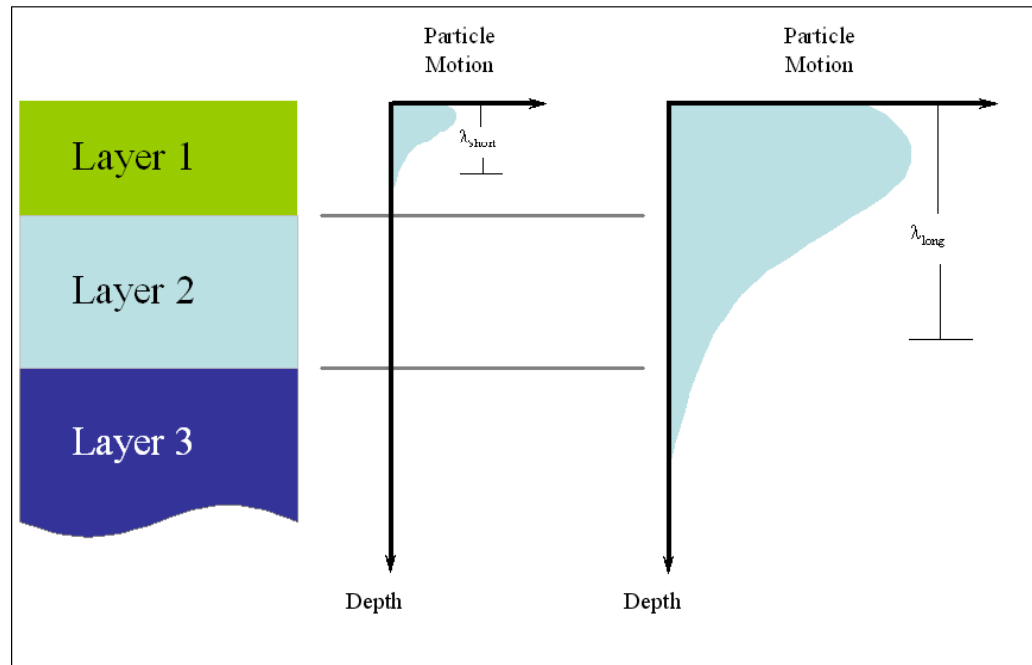


Un altro fenomeno indotto dalla stessa situazione è quella della **canalizzazione** delle onde superficiali all'interno dello strato soffic

In pratica, l'energia trasportata tende a concentrarsi all'interno del "canale" fra le due interfacce



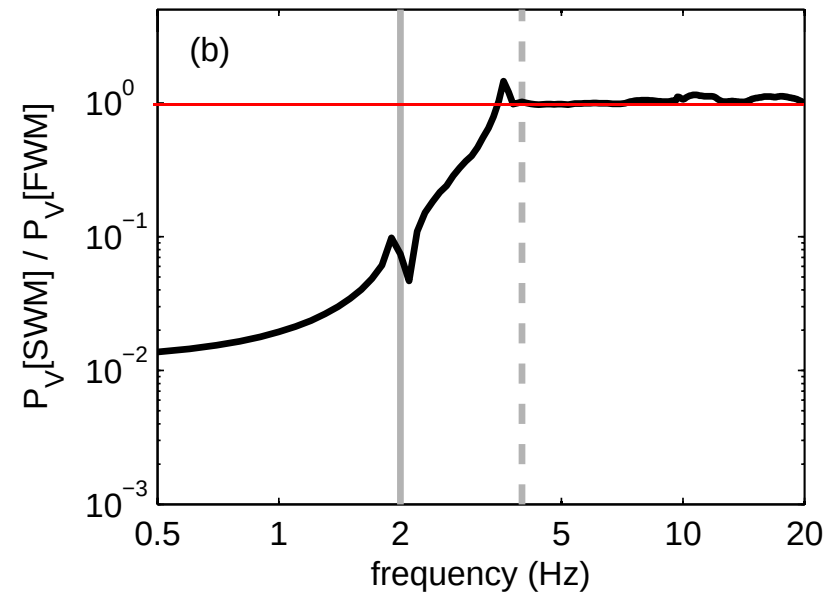
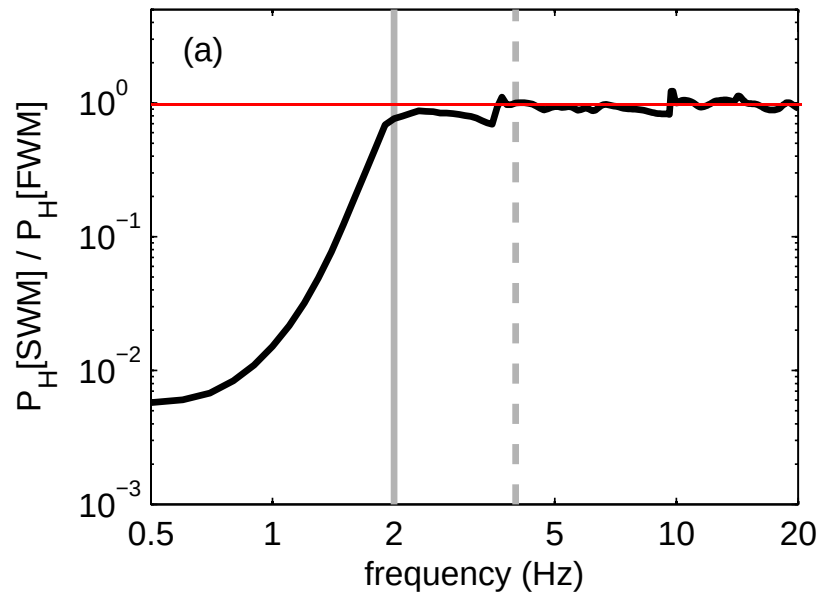
Ma la profondità interessata dalla propagazione delle onde superficiali dipende dalla loro lunghezza d'onda. Se questa profondità è limitata dalla presenza di forti contrasti di impedenza, si produrrà anche una limitazione delle lunghezze d'onda che trasportano l'energia: quelle più lunghe saranno “inibite” a favore di quelle più “corte”



Dato che esiste una relazione diretta fra periodo di oscillazione dell'onda e lunghezza d'onda, i periodi più lunghi (e le frequenze più corte) saranno meno energetici degli altri fino a scomparire nel caso di contrasti di impedenza particolarmente intensi

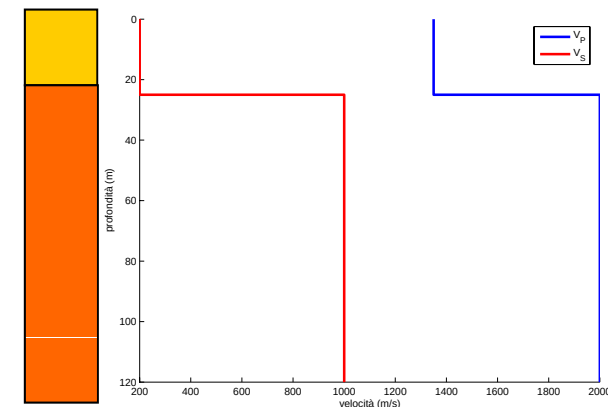
Il questo caso, la situazione stratigrafica agisce come un filtro “passa-alto”

La modellazione mette in evidenza questa situazione

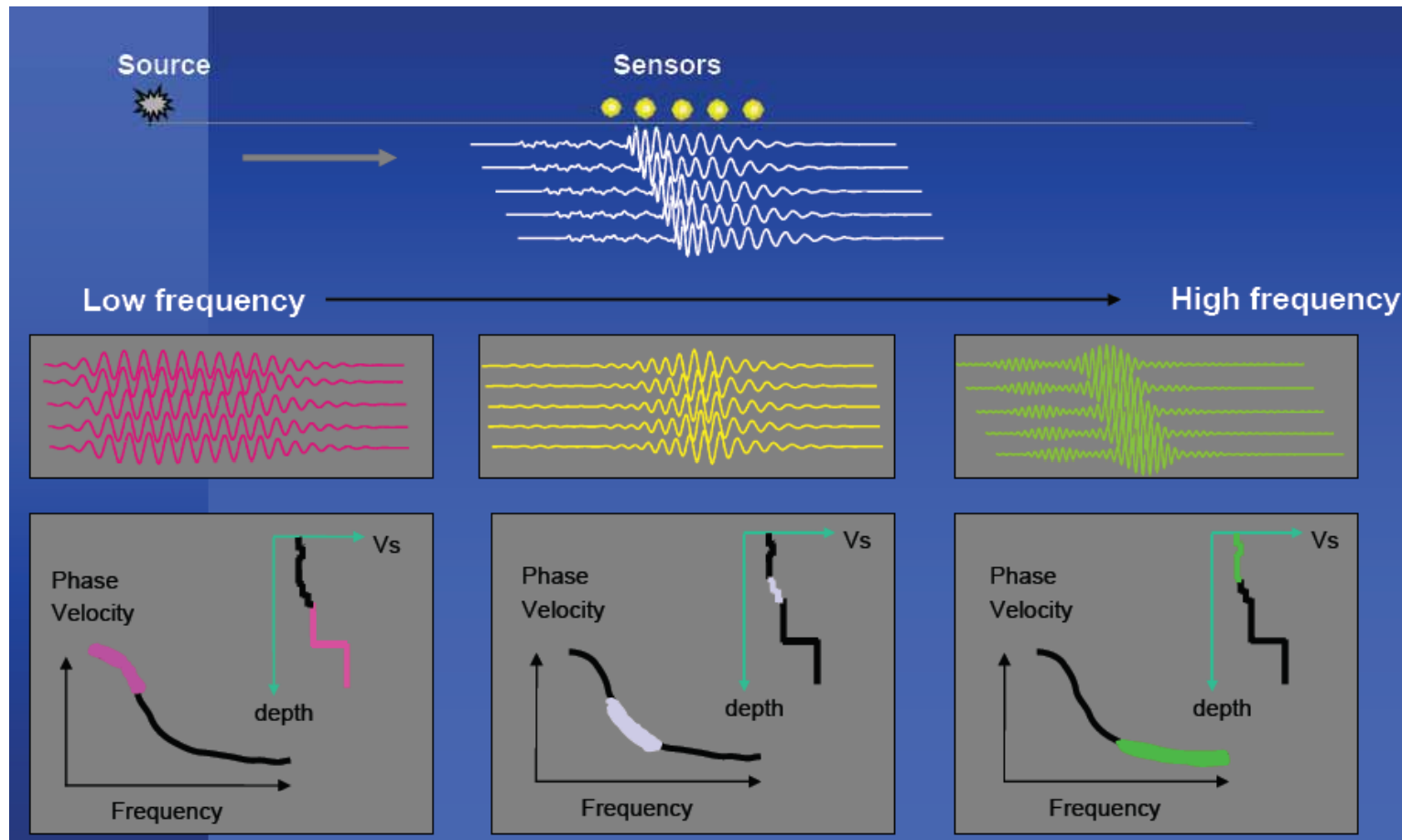


Rapporto fra contributo delle onde superficiali e il campo totale nelle componenti orizzontali (sin) e verticale (ds): valori inferiori a 1 indicano un contenuto scarso di onde superficiali

Si vede che con grandi contrasti di impedenza, le Onde superficiali risultano quasi assenti al di sotto della frequenza di risonanza delle onde S, mentre dominano le alte frequenze



In sintesi: in presenza di forti contrasti di impedenza sismica l'analisi della curva di dispersione al di sopra della frequenza di risonanza, fornisce informazioni sul profilo di velocità delle onde S al di sopra del basamento risonante





Questa situazione ha un'altra importante implicazione

In generale, risulta piuttosto agevole (in senso relativo) simulare numericamente il campo d'onde stocastico relativo alle vibrazioni ambientali relativamente alla componente in onde superficiali

Tenere conto nella modellazione anche del campo delle onde di volume è assai più oneroso dal punto di vista computazionale (da pochi secondi and alcune ore di tempo macchina)

Come si vedrà in seguito, la possibilità di modellare efficacemente (dal punto di vista numerico) il campo d'onde è un elemento essenziale delle procedure di interpretazione delle misure di sismica passiva

Pertanto, nella maggior parte dei casi la modellazione si limita alle sole onde superficiali e questo rende le interpretazioni valide solo in maniera approssimata

Ma quanto approssimata?

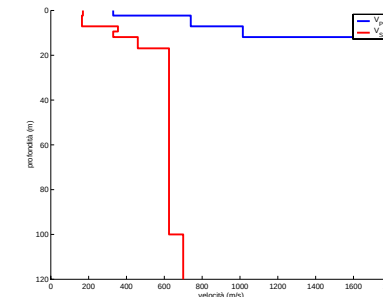
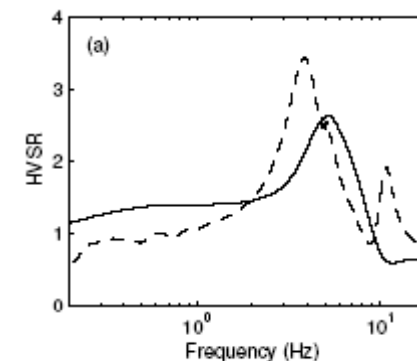
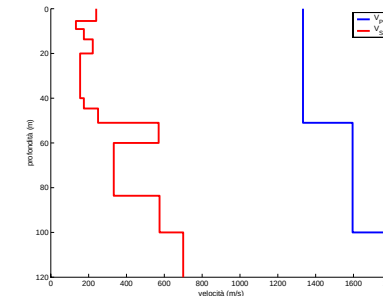
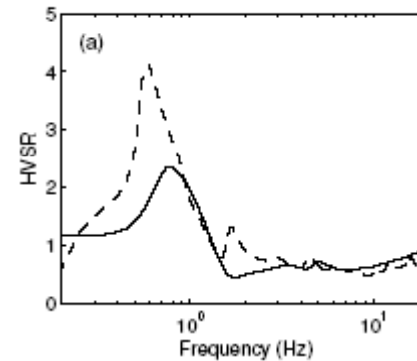
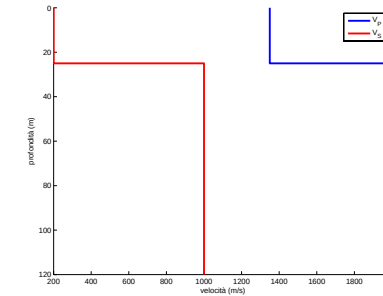
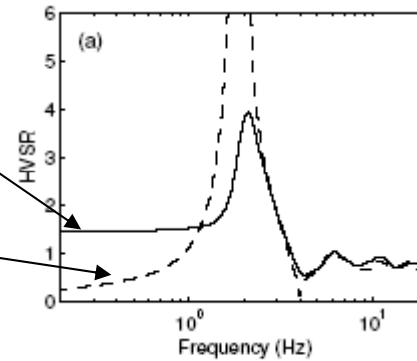


Che errore si commette usando le **sole** onde superficiali per modellare il campo d'onde?

Campo completo

Approssimazione
onde superficiali

In generale,
considerare il campo
come composto dalle
sole onde superficiali
rappresenta
comunque una buona
approssimazione del
campo completo
almeno al di sopra
della sequenza di
risonanza delle
coperture





PAUSA



Il problema è ora quello di utilizzare le misure di vibrazioni ambientali per definire le modalità di propagazione delle onde sismiche nel primo sottosuolo

Esistono sostanzialmente due metodi

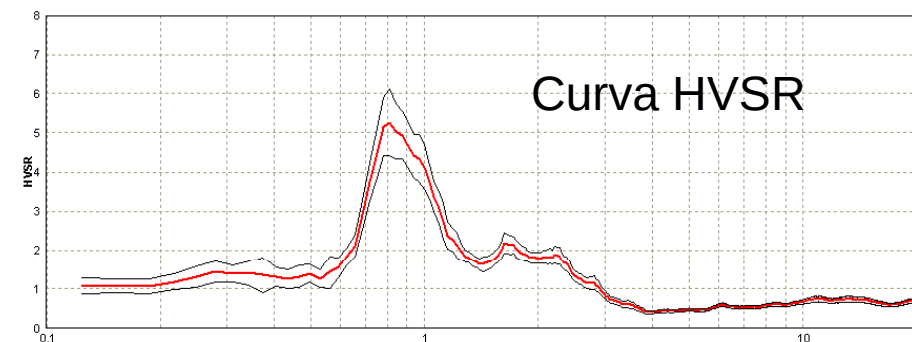
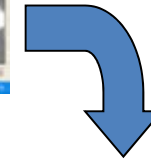
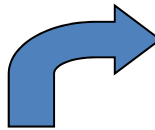
1. **Metodi a stazione singola** : sono basati sulla misura delle ampiezze spettrali medie nella tre direzioni dello spazio
2. **Metodi su antenna**: sono basati sullo studio del livello di correlazione fra gli andamenti delle vibrazioni ambientali registrate in diversi punti della superficie



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

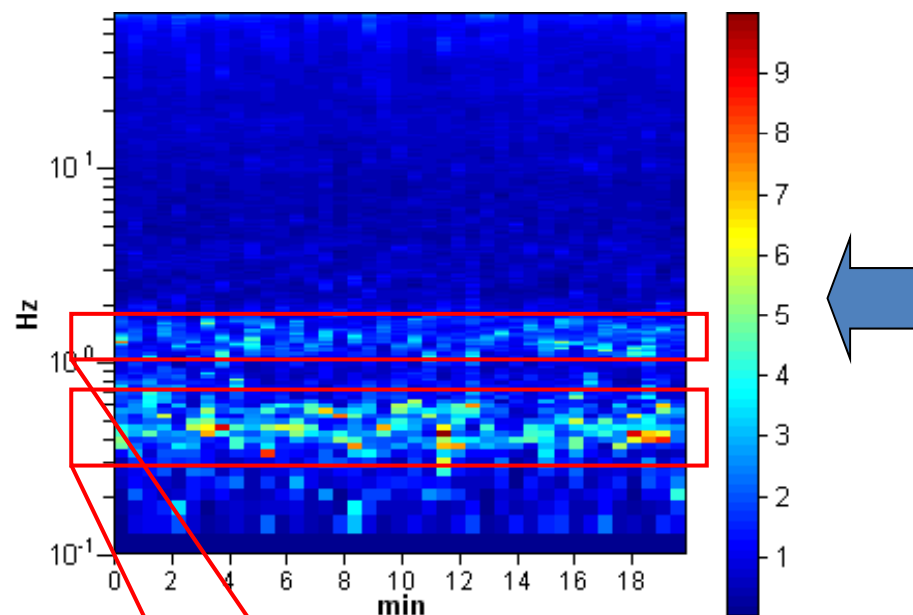
Si tratta infatti di misurare con un sismometro a tre componenti le vibrazioni ambientali presenti in un punto e quindi costruire una curva rappresentativa dei rapporti spettrali (H/V) in funzione della frequenza di vibrazione

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

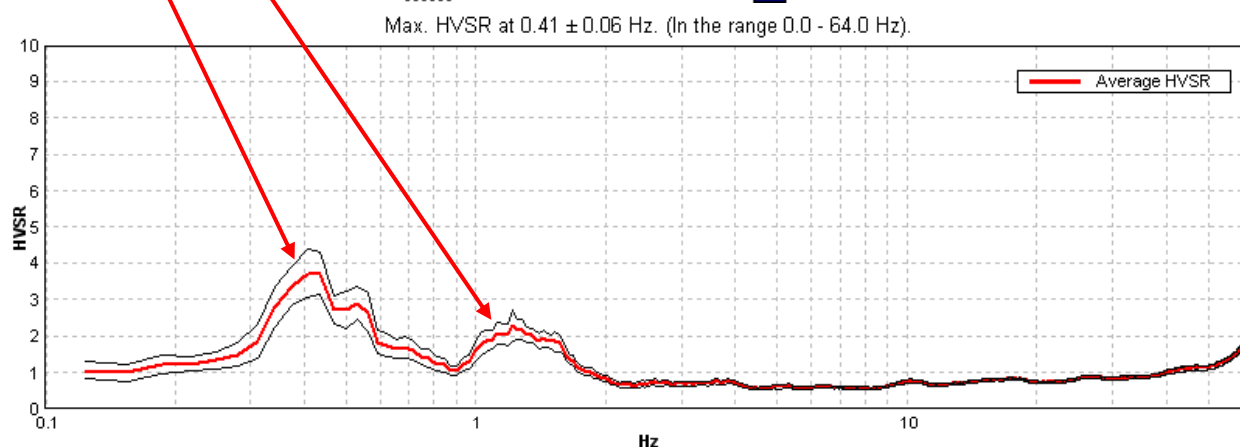
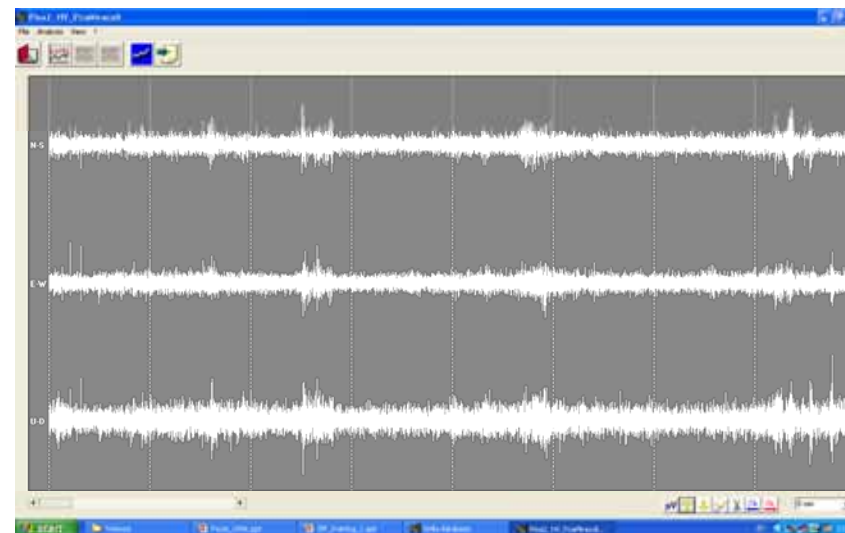


Il metodo HVSR o “di Nakamura”

Andamento nel tempo dei rapporti
spettrali:



Registrazioni tridirezionale delle vibrazioni ambientali
(misure velocimetriche)



Curva HVSR

Rapporti Spettrali H/V medi



Un elemento chiave è la corretta esecuzione della misura

L'esecuzione della misura presenta due ordini di problemi

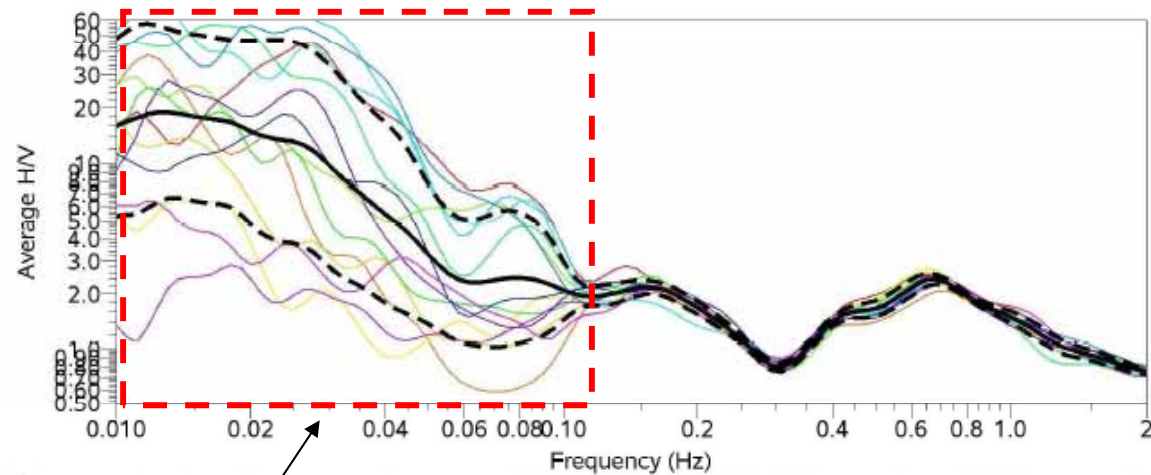
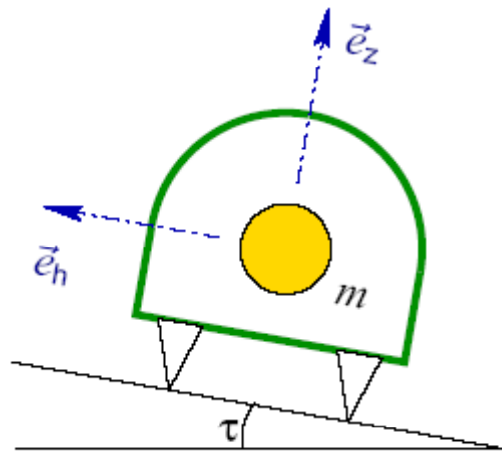
Il primo è legato ai ridotti valori di ampiezza del segnale

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 indicando 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

Per esempio, è possibile dimostrare che un lieve cambiamento nella livellazione (per esempio provocata da un piccolo cedimento del terreno su cui è appoggiato lo strumento) è in grado di perturbare significativamente la forma della funzione HVSR risultante soprattutto nella sua parte in bassa frequenza



“Effetto del tilting”

Bisogna quindi sempre controllare che lo strumento conservi la sua livellazione fino alla fine della misura!!!

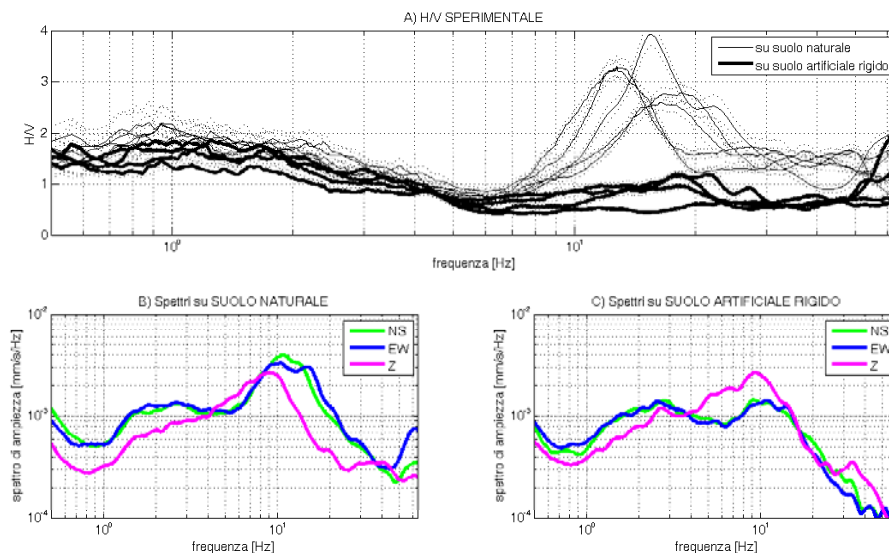


Un ruolo chiave nel condizionamento della misura HVSR può essere giocato dalla presenza di pavimentazione

In alcune circostanze, questa pavimentazione può non essere accoppiata con il suolo in modo ottimale

In pratica è come se la misura fosse effettuata al tetto di una formazione costituita da uno strato molto rigido (la pavimentazione) al di sopra di uno strato più soffice (il suolo)

Questa “inversione” di velocità (rispetto ad un andamento normale con una velocità che cresce con la profondità) può perturbare la misura in modo significativo soprattutto nella parte in più alta frequenza



Per questo la misura va possibilmente effettuata su suolo libero!



Le condizioni meteorologiche possono giocare un ruolo importante sia in senso positivo che negativo. Infatti:

1. Le condizioni meteorologiche condizionano positivamente il campo d'onde: in presenza di tempo perturbato (mari mossi, vento in quota, marcate variazioni barometriche) producono in genere un “buon” campo di rumore “illuminando” il sottosuolo anche in bassa frequenza (<0.5 Hz)
2. Tuttavia la presenza di un forte vento a terra o di pioggia che agiscano direttamente sul sensore possono perturbare la misura. Il vento al suolo può “rovinare” le misure se queste sono effettuate in un terreno con copertura erbosa ed erba alta



Un aspetto spesso sopravvalutato è quello del possibile disturbo arrecato dalla presenza di edifici o manufatti elevati nelle vicinanze della misura

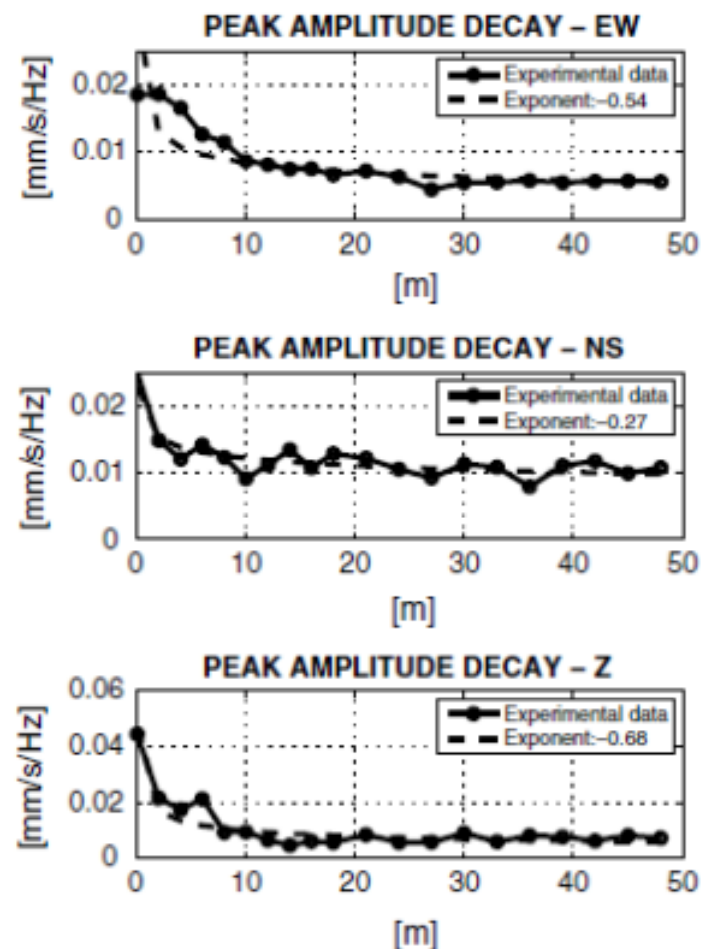
La regola “aurea” imporrebbe una distanza minima dalla struttura pari a circa l’altezza della struttura stessa. In molti casi, questo vincolo renderebbe impossibile l’esecuzione delle misure

In realtà questa regola vale per strutture sollecitate direttamente (per esempio in condizioni di forte vento). Nei casi in cui la struttura è sollecitata dalle vibrazioni ambientali stesse, allora l’energia “ritrasmessa” al terreno risulta assai minore e quindi poco efficace nel disturbare la misura.

In questi casi, a pochi metri dalla struttura l’effetto diviene rapidamente trascurabile

Comunque, l’effetto delle strutture ha carattere quasi mono-frequenziale e quindi risulta chiaramente distinguibile nelle curve HVSR





Variazione dell'ampiezza spettrale delle vibrazioni ambientali relative alla frequenza di risonanza della Torre di Pisa a distanze crescenti dalla base dell'edificio



Il secondo aspetto importante riguarda il carattere stocastico della grandezza da misurare (rapporto spettrale medio)

Si ricorderà che, affinché la misura HVSR possa essere considerata rappresentativa delle caratteristiche del sottosuolo, questa deve essere sufficientemente estesa nel tempo da includere l'effetto di un numero significativo di sorgenti a varie distanze dal ricevitore e distribuite all'intorno di quest'ultimo

Inoltre, dovendo operare su un segnale di tipo stocastico, è necessario mettere in campo tutti gli accorgimenti necessari perché l'analisi spettrale fornisca risultati statisticamente stabili ed affidabili

Per ottenere questi risultati bisogna quindi definire tempi di misura adeguatamente lunghi e procedere adottando opportune tecniche di trattamento del segnale



Riguardo alla durata complessiva delle misura

1. Se l'intervallo di frequenze di interesse è quello più alto ($> 1\text{Hz}$) 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 ($< 0.5\text{ Hz}$), 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 rimanda 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



Fase 1

Ciascuna traccia viene suddivisa in finestre di uguale dimensione e per ciascuna viene calcolato lo spettro con la seguente procedura



NS

EW

UD

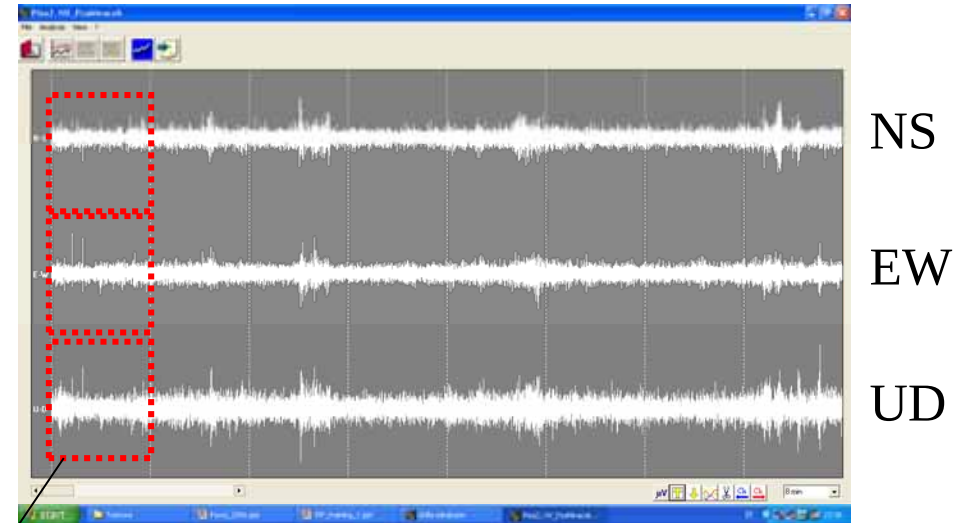
1. Detrend (eliminazione componenti lungo periodo)
2. Tapering (la serie viene “rastremata” ai lati per ridurre il fenomeno del leakage)
3. Padding (aggiunta di zeri alle estremità della serie per arrivare ad un numero di punti pari ad una potenza di 2 ed applicare la FFT (trasformata di Fourier rapida)
4. Esecuzione della FFT e calcolo della trasformata di Fourier
5. Lisciamento dello spettro di ampiezza per ridurre la variabilità stocastica nella stima delle ordinate spettrali

$$H_{NS}^2(\omega) \leftarrow$$

$$H_{EW}^2(\omega) \leftarrow$$

$$H^2(\omega) = \sqrt{H_{NS}^4(\omega) H_{EW}^4(\omega)}$$

$$HVSR(\omega) = \sqrt{\frac{H^2(\omega)}{V^2(\omega)}}$$



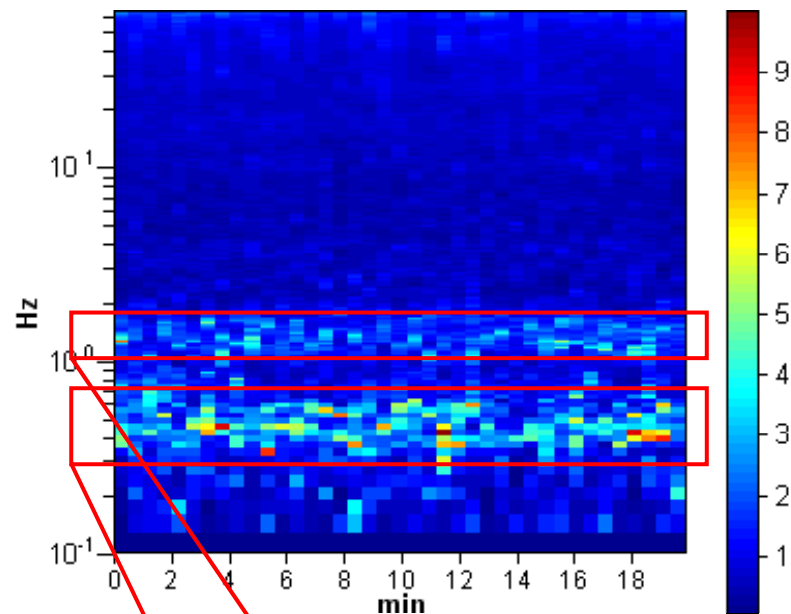
$$H(\omega) = \sqrt{\frac{H_{NS}^2(\omega) + H_{EW}^2(\omega)}{2}}$$

Formulazione alternativa

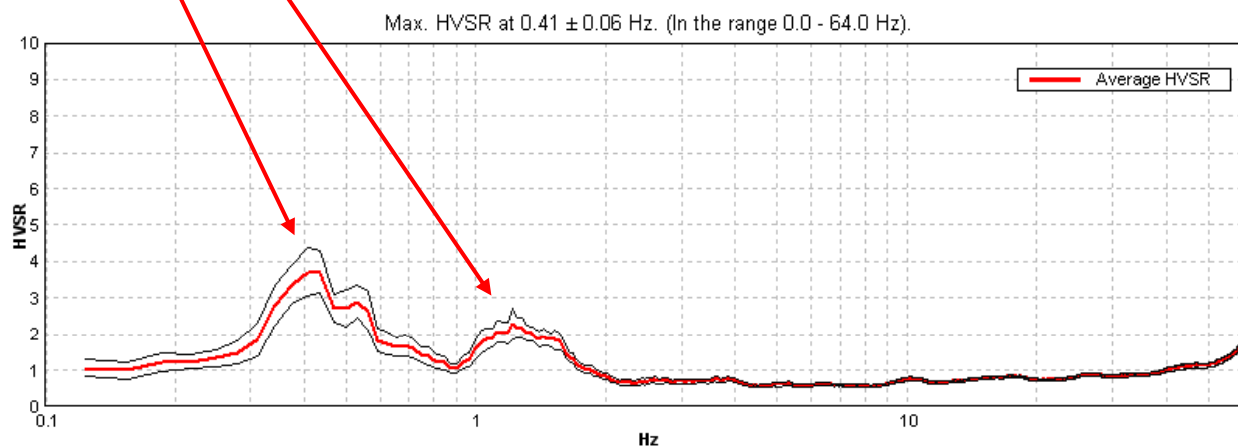
(le diverse modalità di calcolo possono avere effetti sulla forma della curve HVSR e sulle sue proprietà statistiche)

Questa operazione viene eseguita per ogni finestra temporale

Fase 2

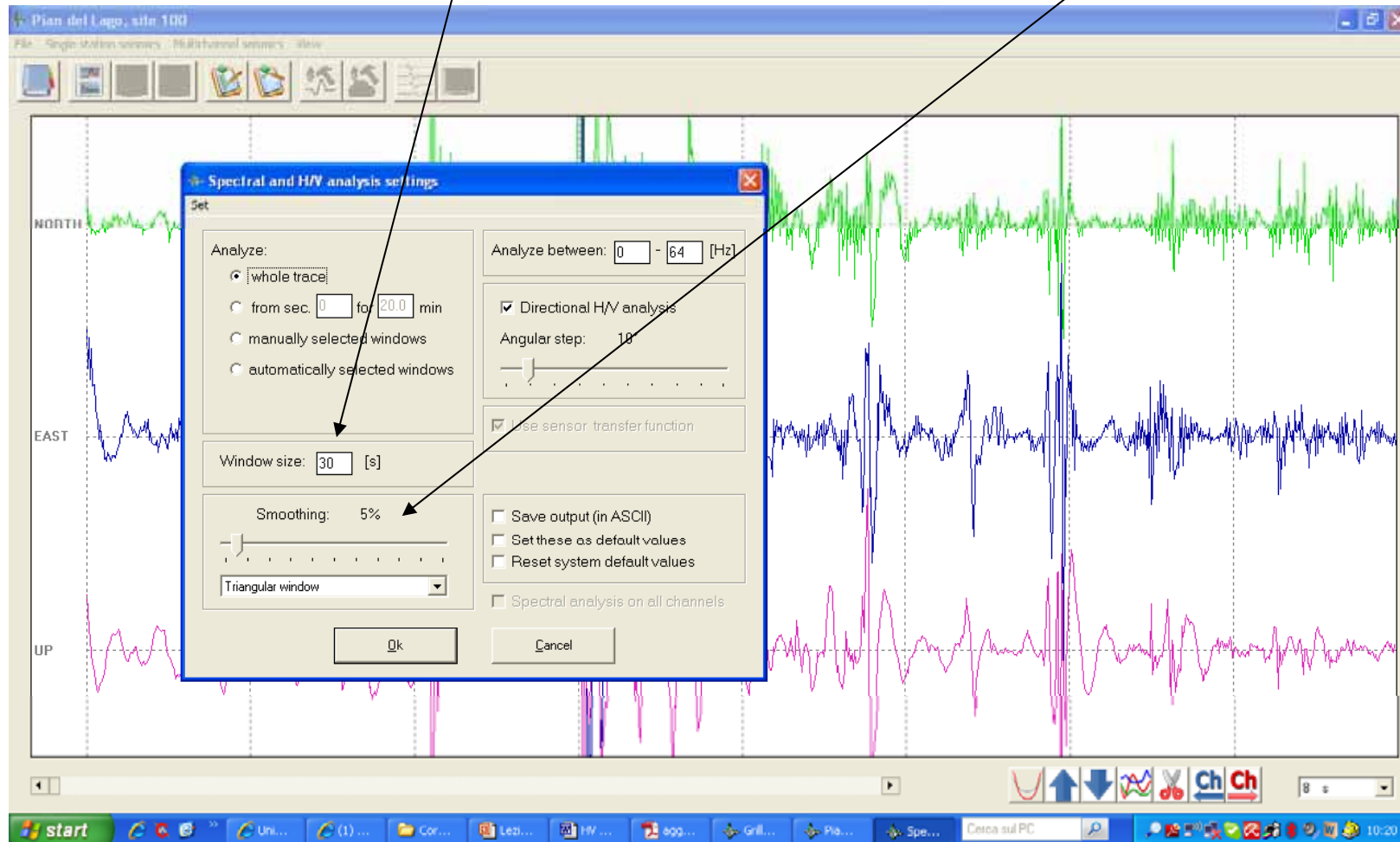


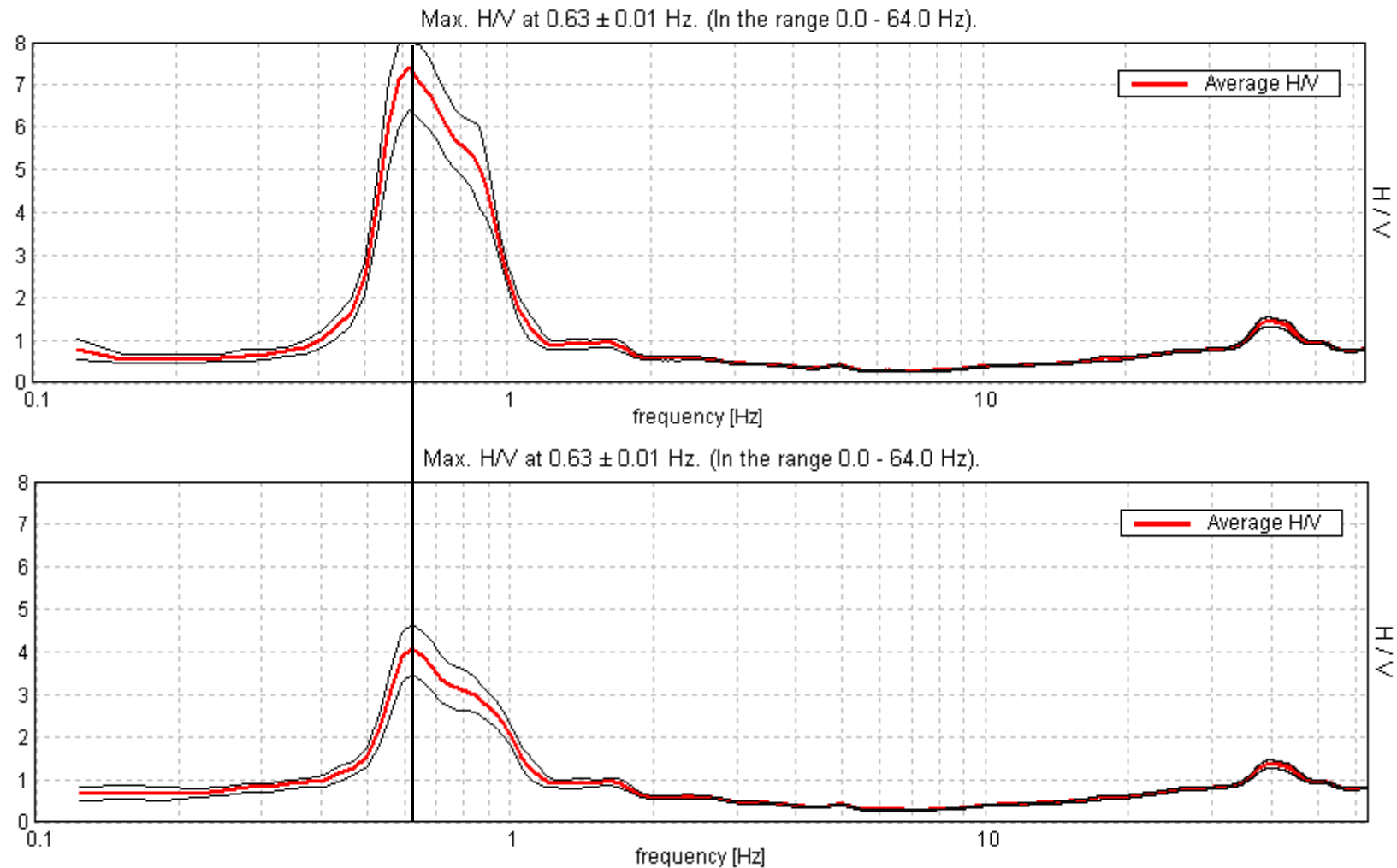
Viene valutata la persistenza delle funzioni HVSR nelle diverse finestre temporali



Vengono quindi calcolati i rapporti spettrali medi ed il relativo intervallo di confidenza

Si è detto che l'analisi del segnale richiede alcune scelte (in particolare la durata delle finestre e la modalità lisciamento dello spettro)



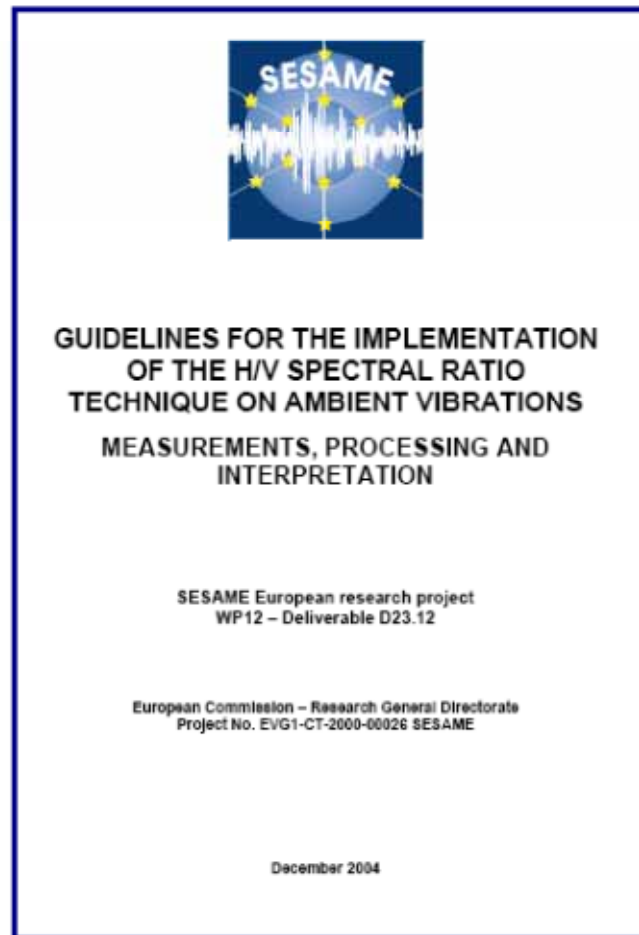


Per esempio viene mostrato l'effetto di due diverse modalità di lasciamiento (finestra triangolare e Konno-Ohmachi) si vede che la posizione del massimo non cambia ma l'ampiezza si.

Non esiste un metodo ottimale!



Data la possibile importanza di questo metodo, esso è stato oggetto di numerose ricerche e di almeno due progetti internazionali in ambito CEE e NATO



Questi hanno avuto come obiettivi la valutazione delle caratteristiche del metodo e la messa a punto di protocolli di misura e interpretazione



<http://nato.gfz.hr/>

http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/SES_Reports.htm#Guidelines

Type of parameter	Main recommendations	
	Minimum expected f_0 [Hz]	Recommended minimum recording duration [min]
Recording duration	0.2	30'
	0.5	20'
	1	10'
	2	5'
	5	3'
	10	2'
Measurement spacing	→ <u>Microzonation</u> : start with a large spacing (for example a 500 m grid) and, in case of lateral variation of the results, densify the grid point spacing, down to 250 m, for example. → <u>Single site response</u> : never use a single measurement point to derive an f_0 value, make at least three measurement points.	
Recording parameters	→ level the sensor as recommended by the manufacturer. → fix the gain level at the maximum possible without signal saturation.	
In situ soil-sensor coupling	→ set the sensor down directly on the ground, whenever possible. → avoid setting the sensor on "soft grounds" (mud, ploughed soil, tall grass, etc.), or soil saturated after rain.	
Artificial soil-sensor coupling	→ avoid plates from "soft" materials such as foam rubber, cardboard, etc. → on steep slopes that do not allow correct sensor levelling, install the sensor in a sand pile or in a container filled with sand. → on snow or ice, install a metallic or wooden plate or a container filled with sand to avoid sensor tilting due to local melting.	
Nearby structures	→ Avoid recording near structures such as buildings, trees, etc. in case of wind blowing (faster than approx. 5 m/s). It may strongly influence H/V results by introducing some low frequencies in the curves → Avoid measuring above underground structures such as car parks, pipes, sewer lids, etc.	
Weather conditions	→ <u>Wind</u> : Protect the sensor from the wind (faster than approx. 5 m/s). This only helps if there are no nearby structures. → <u>Rain</u> : avoid measurements under heavy rain. Slight rain has no noticeable influence. → <u>Temperature</u> : check sensor and recorder manufacturer's instructions. → <u>Meteorological perturbations</u> : indicate on the field sheet whether the measurements are performed during a low-pressure meteorological event.	
Disturbances	→ <u>Monochromatic sources</u> : avoid measurements near construction machines, industrial machines, pumps, generators, etc. → <u>Transients</u> : In case of transients (steps, cars,...), increase the recording duration to allow for enough windows for the analysis, after transient removal.	

Protocolli sperimentali
del progetto SESAME
forniscono utili
indicazioni sulle
condizioni sperimentali
migliori

Tuttavia vanno
considerate con spirito
"laico"

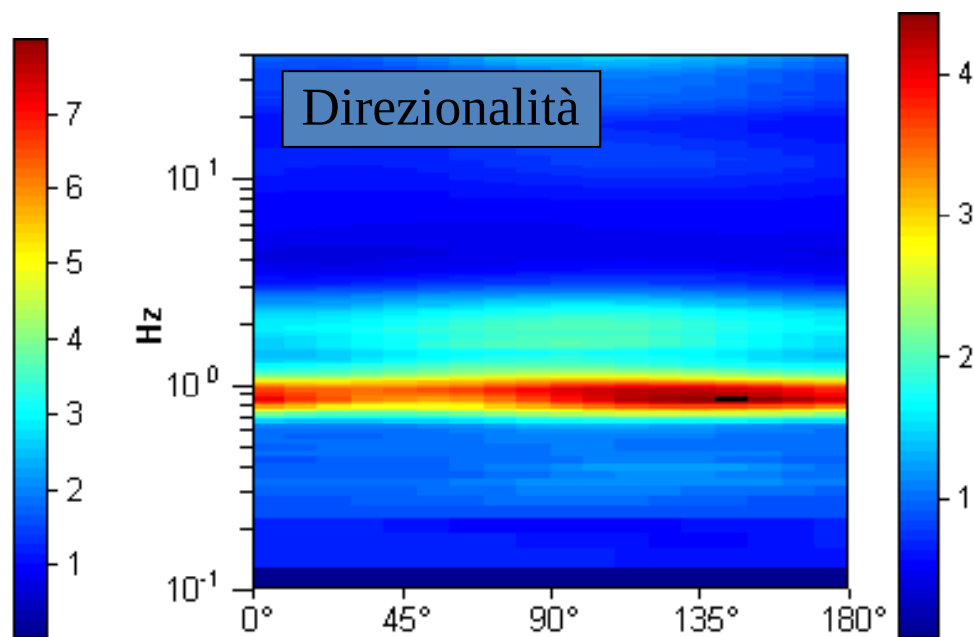
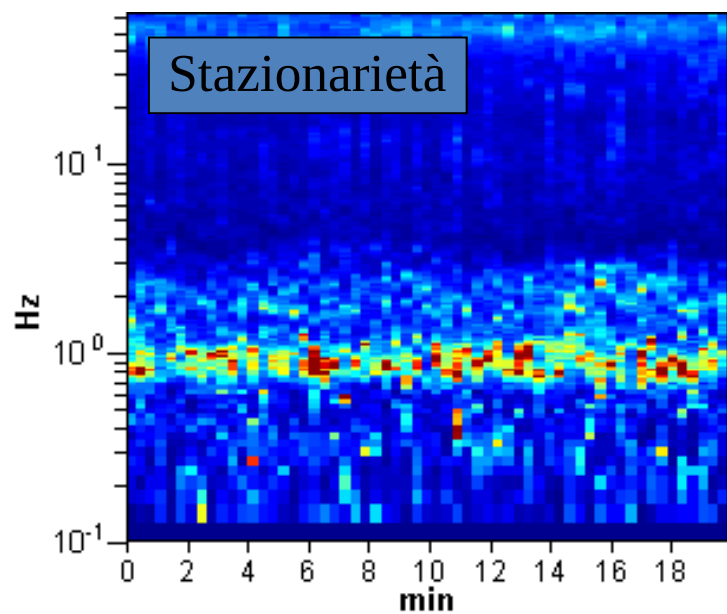
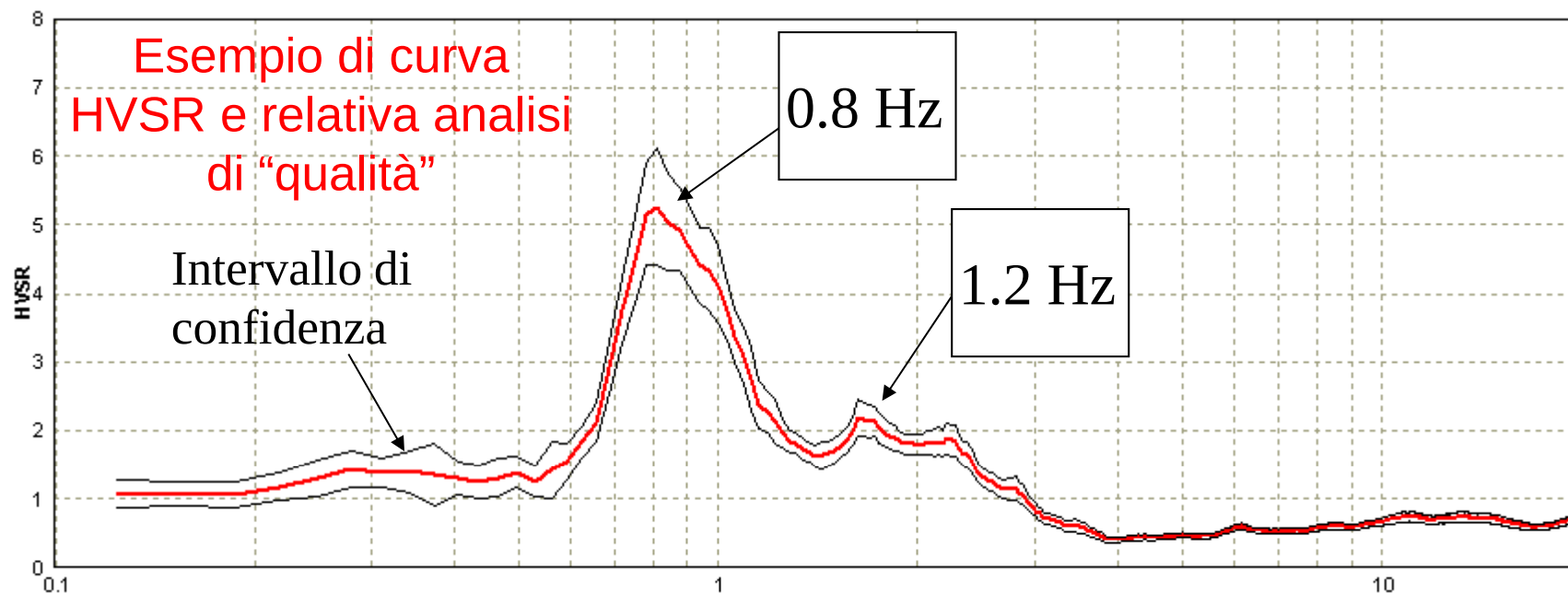


Prima di passare ad una interpretazione di queste misure è necessario valutarne preliminarmente la qualità e la rappresentatività

In particolare bisogna prendere in considerazione tre aspetti chiave

- 1. La misura ha carattere statistico e quindi il risultato deve essere rappresentativo delle caratteristiche medie del campo di vibrazioni ambientali*
- 2. Gli effetti di sorgente devono essere effettivamente stati rimossi dal processo di media (non esistono sorgenti “dominanti”)*
- 3. Non devono essere presenti disturbi di natura diversa, comunque non associati alle caratteristiche del campo di vibrazioni ambientali*

Queste caratteristiche vanno valutate per via indiretta attraverso l'impiego di opportuni diagnostici: la stazionarietà temporale e la direzionalità del segnale



Un aspetto importante è la valutazione relativa alla qualità statistica del risultato

A questo proposito, il progetto SESAME ha a suo tempo definito una serie di criteri di carattere empirico

Criteria for a reliable H/V curve i) $f_0 > 10 / l_w$ and ii) $n_c(f_0) > 200$ and iii) $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ or $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	l_w = window length n_w = number of windows selected for the average H/V curve $n_c = l_w \cdot n_w \cdot f_0$ = number of significant cycles f = current frequency f_{sensor} = sensor cut-off frequency f_0 = H/V peak frequency σ_f = standard deviation of H/V peak frequency ($f_0 \pm \sigma_f$) $\varepsilon(f_0)$ = threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ A_0 = H/V peak amplitude at frequency f_0 $A_{H/V}(f)$ = H/V curve amplitude at frequency f f = frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f) < A_0/2$ f^* = frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^*) < A_0/2$ $\sigma_A(f)$ = "standard deviation" of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided $\sigma_{\log H/V}(f)$ = standard deviation of the $\log A_{H/V}(f)$ curve, $\sigma_{\log H/V}(f)$ is an absolute value which should be added to or subtracted from the mean $\log A_{H/V}(f)$ curve $\theta(f_0)$ = threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$ $V_{s,av}$ = average S-wave velocity of the total deposits $V_{s,surf}$ = S-wave velocity of the surface layer h = depth to bedrock $h_{\min}$ = lower-bound estimate of h
Criteria for a clear H/V peak (at least 5 out of 6 criteria fulfilled) i) $\exists f \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$ ii) $\exists f^* \in [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^*) < A_0/2$ iii) $A_0 > 2$ iv) $f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ v) $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ vi) $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	

Si tratta essenzialmente di considerazioni di tipo statistico sulla stabilità della curva, sulle modalità di campionamento, ecc.

Threshold Values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$					
Frequency range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.20 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Appendice 1: I criteri SESAME (2004)

Criteri per una curva H/V affidabile [Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]	$f_0 > 10 / L_w$ $n_c(f_0) > 200$ $\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$
Criteri per un picco H/V chiaro [Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]	Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$ Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$ $A_0 > 2$ $f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$

L_w	lunghezza della finestra
n_w	numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w n_w f_0$	numero di cicli significativi
f	frequenza attuale
f_0	frequenza del picco H/V
σ_f	deviazione standard della frequenza del picco H/V
$\varepsilon(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	ampiezza media della curva H/V alla frequenza f_0
$A_{H/V}(f)$	ampiezza media della curva H/V alla frequenza f
f^-	frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$
f^+	frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$
$\sigma_A(f)$	deviazione standard di $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{\log H/V}(f)$	deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$
$\theta(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$					
Intervallo di freq. [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20



Questi criteri hanno carattere esclusivamente statistico

Di fatto non permettono di valutare la qualità “fisica” della misura

Quest’ultima deve essere valutata soprattutto sulla base della **ripetibilità** della misura valutata confrontando misure condotte in posizioni vicine o in condizioni ambientali differenti

Infatti, data una certa frequenza di vibrazione ν , misure condotte in posizioni distanti meno della lunghezza d’onda considerata (V_s/ν) devono dare gli stessi risultati



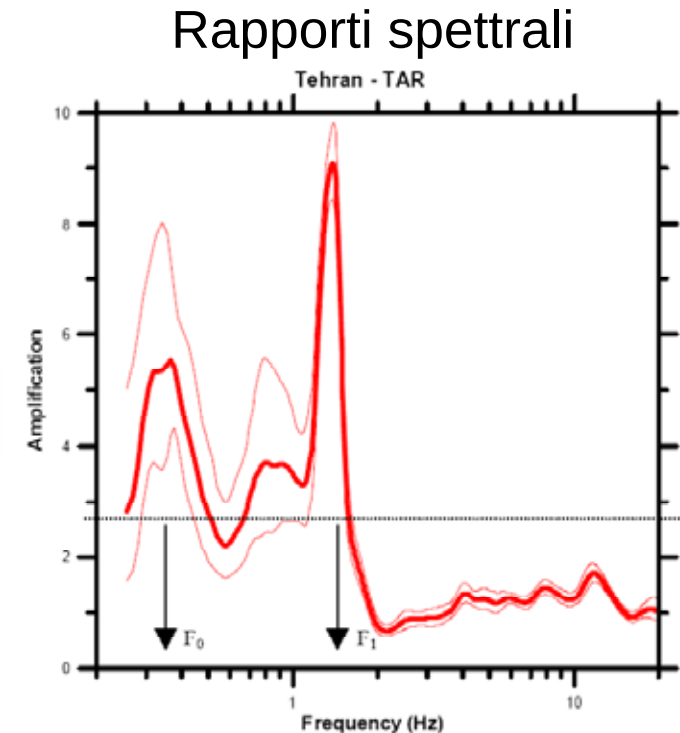
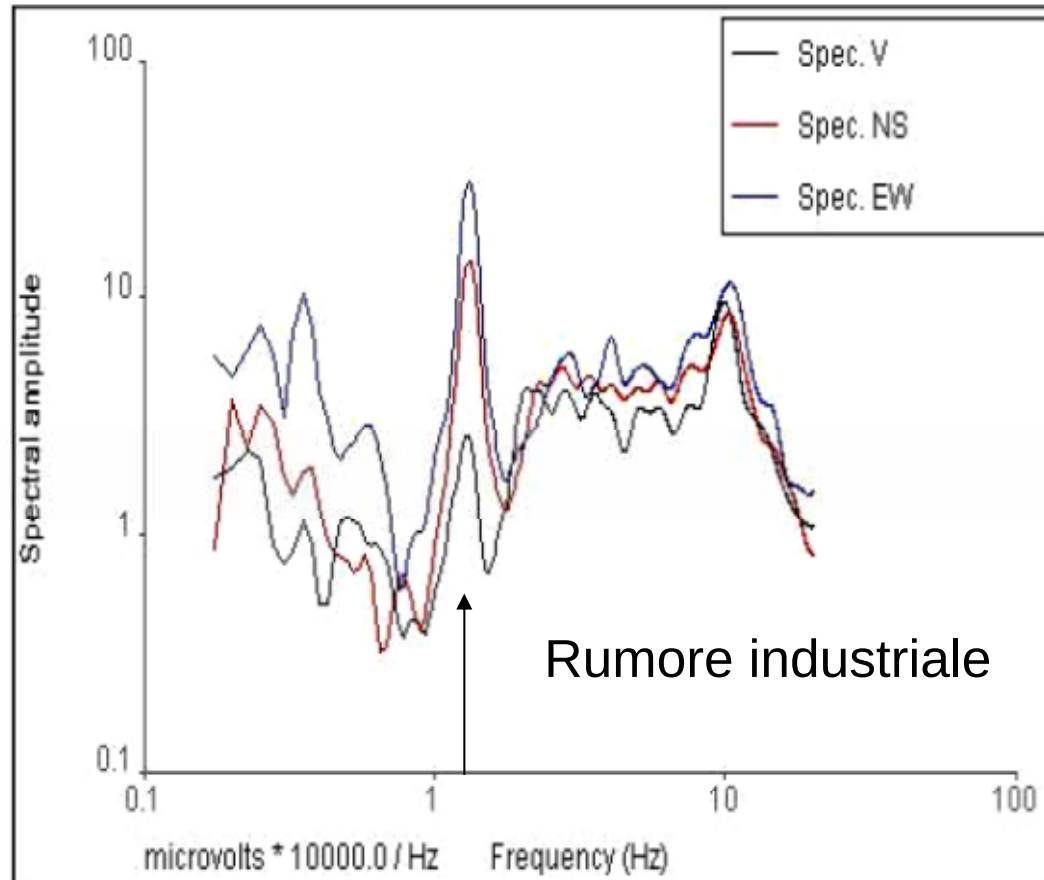
Esempio:

- Assumo una velocità media delle onde S (quelle con maggiori effetti distruttivi) dell'ordine di 300 m/sec nel primo sottosuolo
- In un sito ottengo un picco della funzione HVSR a 3 Hz
- A questo picco corrispondono lunghezze d'onda pari a

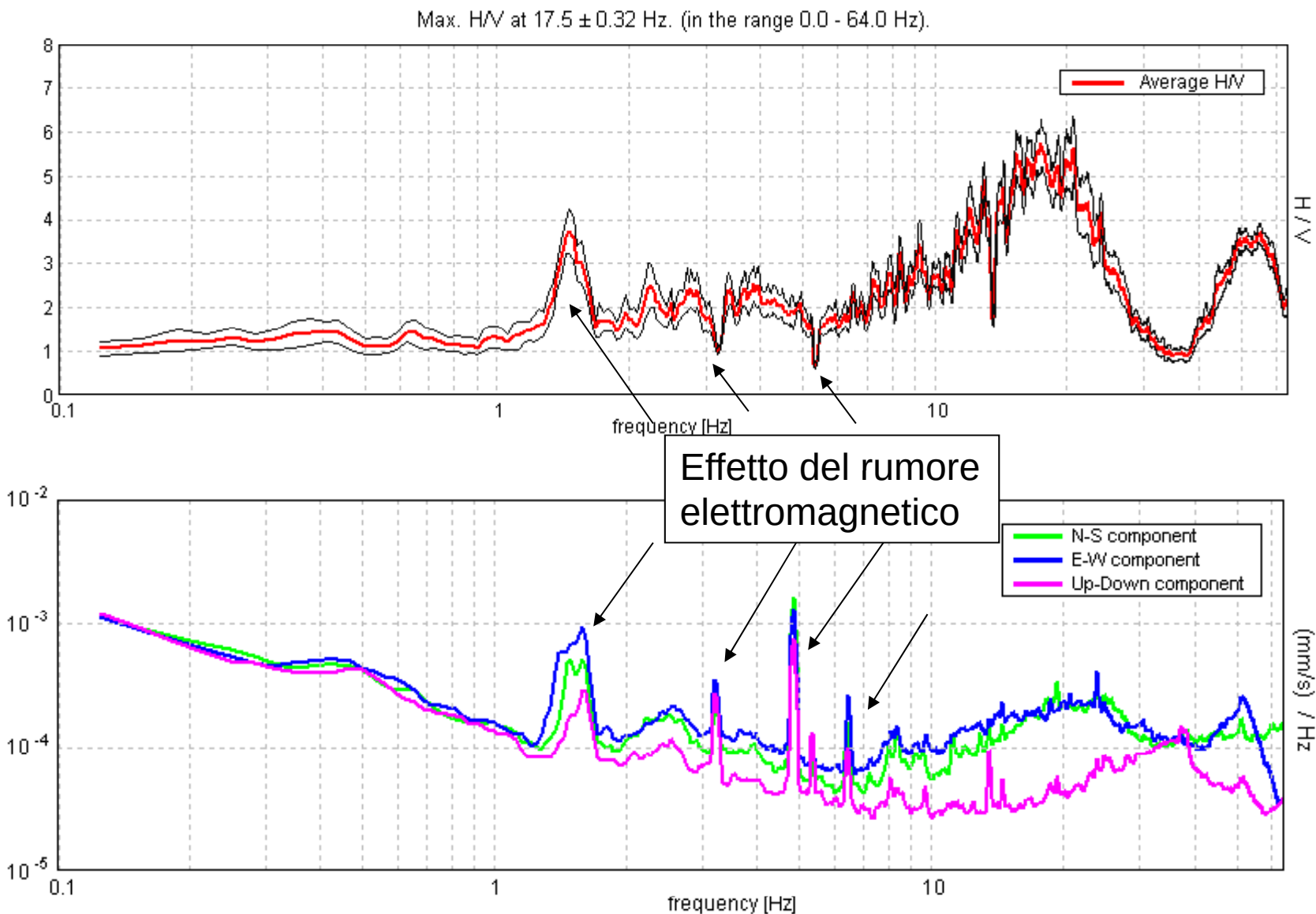
$$\lambda = V / \nu \rightarrow \lambda \approx 300 / 3 \approx 100 \text{ m}$$

Mi aspetto che altre misure condotte entro un centinaio di metri debbano fornire risultati analoghi

Spettri relativi alle tre componenti



Un problema specifico è posto dalla presenza di disturbi di origine industriale che si manifestano con picchi intensi su tutte le componenti spettrali



Contro questo disturbo non c'è niente da fare salvo eliminare la misura

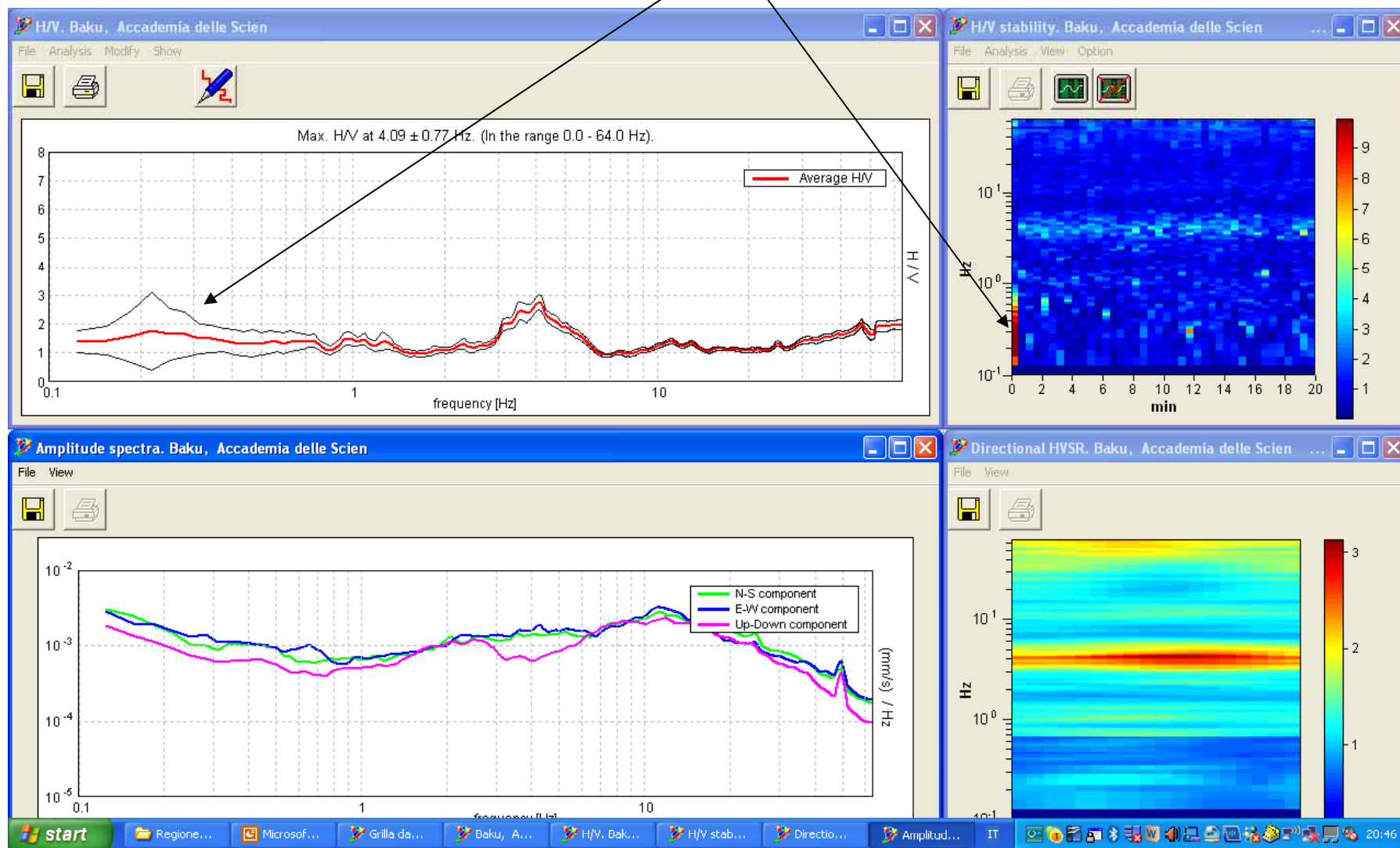


Un altro problema che può sorgere nell'interpretazione delle curva HVSR è la presenza di andamenti “anomali” indotti da forti fenomeni transienti avvenuti durante la misura (per esempio un urto sullo strumento o una forte sollecitazione nelle vicinanze di questo)

Anche se questo transiente è breve rispetto all'intera durata della misura, se la sua ampiezza è grande può perturbare la curva media introducendo marcati effetti di sorgente

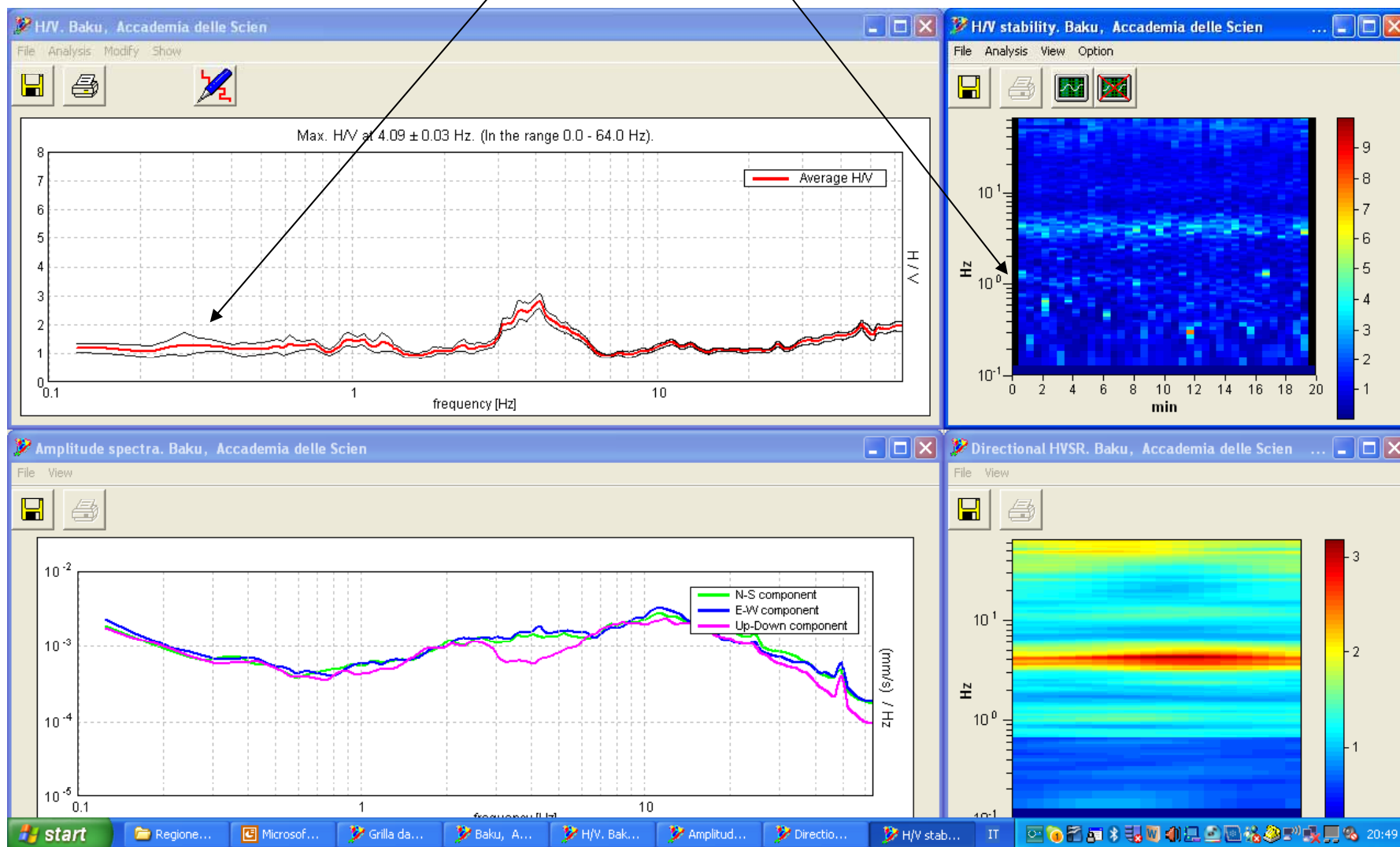
In questi casi, si dovrebbe rimuovere il segmento “contaminato” prima di procedere all'analisi

Forte transiente





Dopo la rimozione





Nessuno di questi criteri è comunque da solo definitivo: infatti non è detto che curve poco chiare siano effettivamente prive di valore

L'atteggiamento corretto è quello di cercare conforto in misure condotte in punti vicini (in rapporto alla lunghezza d'onda di interesse). Su questa base, nell'ambito delle attività di microzonazione sismica speditiva nell'area del terremoto aquilano è stata proposta una classificazione delle misure sulla base di criteri volti a stabilirne la qualità



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 rumore elettromagnetico
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.



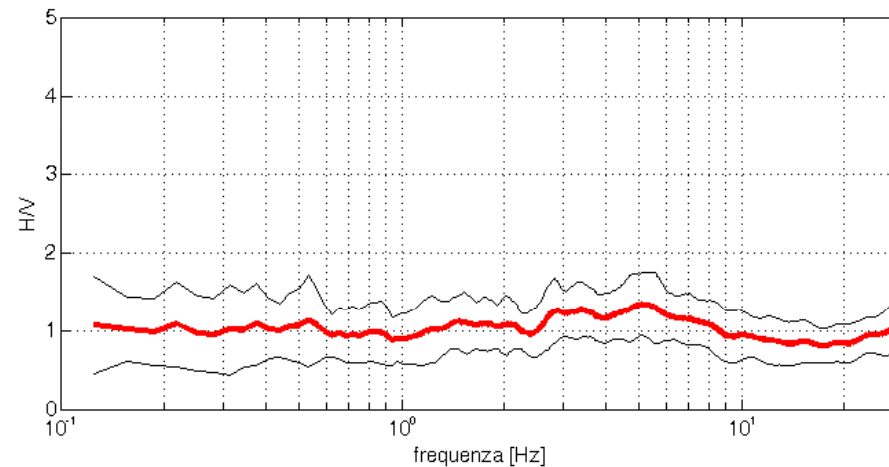
Vengono proposte tre classi di qualità:

Classe A: H/V affidabile e interpretabile: può essere utilizzata anche da sola

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 (*plausibilità 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.





Classe B: curva H/V sospetta (da “interpretare”): va utilizzata con cautela e solo se coerente con altre misure ottenute nelle vicinanze

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: non va utilizzata

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 evidenzia 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



Classe A1: le variazioni azimuthali non superano il 30% e viene identificato almeno un picco chiaro

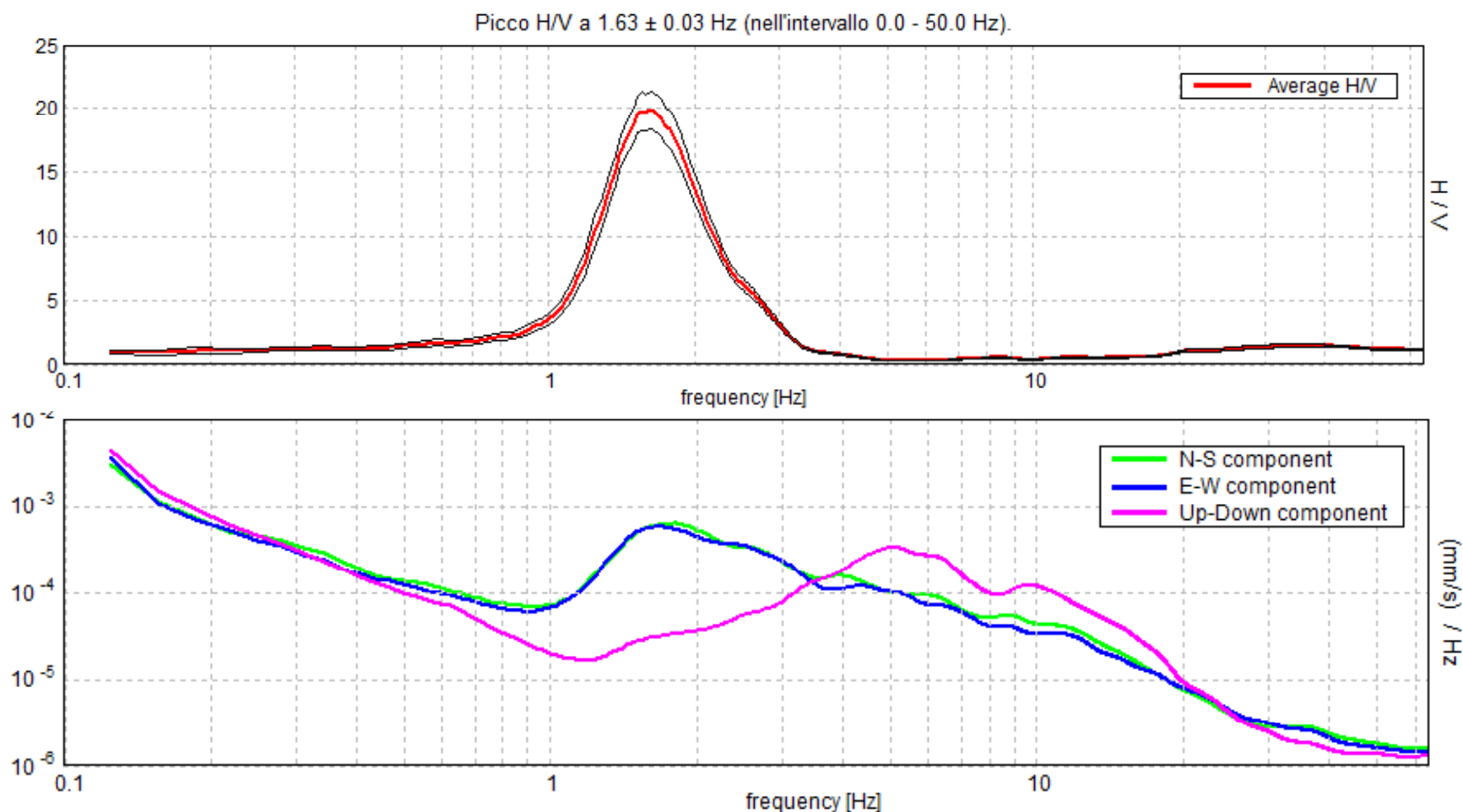
Durata registrazione: 0h12'00". Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

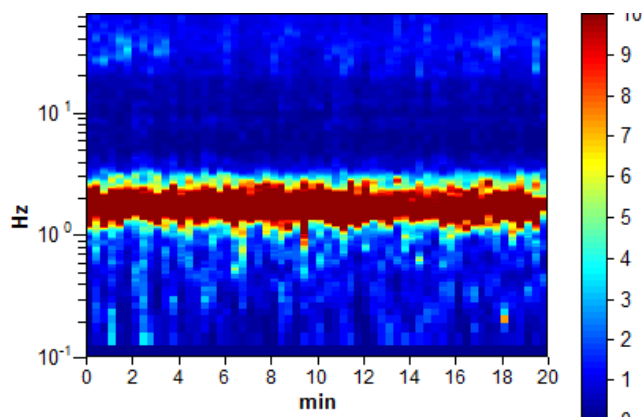
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: triangolare

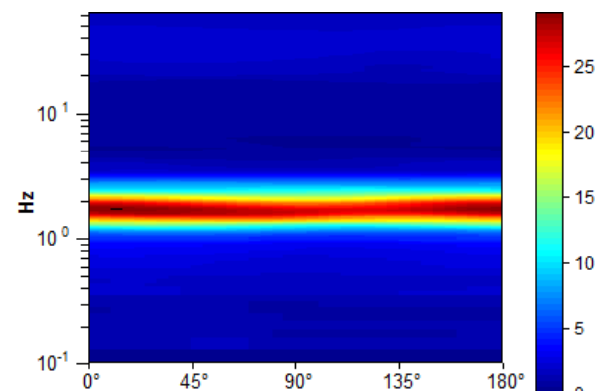
Lisciamento: 10%



SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



Picco H/V a 1.6 ± 0.03 Hz (nell'intervallo 0.0 - 50.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$1.63 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$1950.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 79	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^* in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^*) < A_0 / 2$	1.219 Hz	OK	
Esiste f^* in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^*) < A_0 / 2$	2.219 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$19.86 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}} [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.0092 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < 8(f_0)$	$0.01495 < 0.1625$	OK	
$\sigma_A(f_0) < 0(f_0)$	$0.7439 < 1.78$	OK	



Classe B1: non soddisfa la condizione di isotropia ma ha un picco chiaro

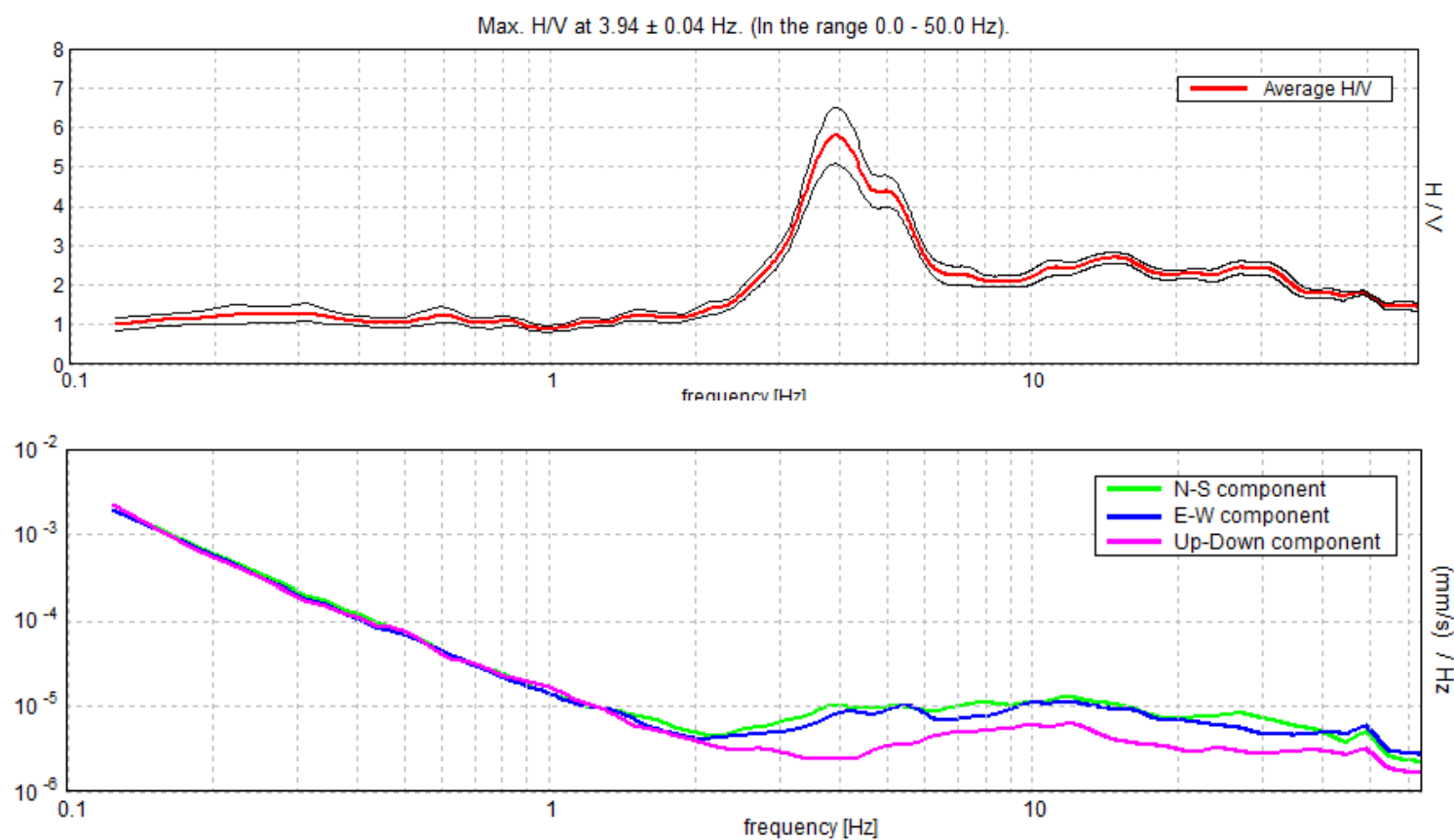
Durata registrazione: 0h20'00". Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

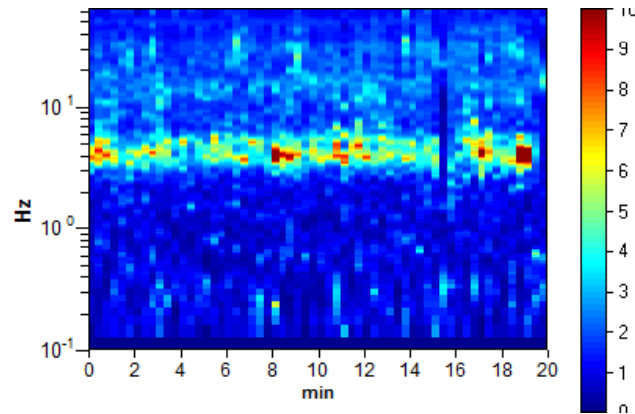
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: triangolare

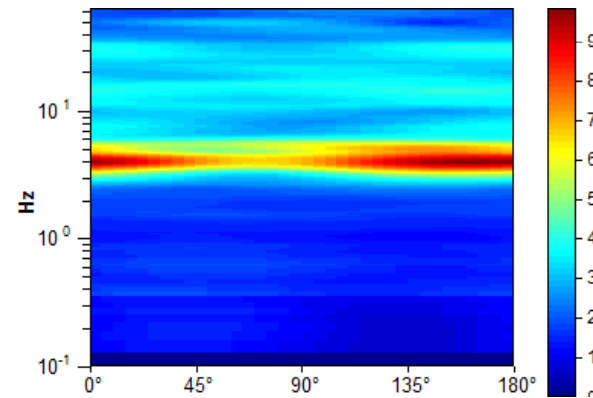
Lisciamento: 10%



SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



Picco H/V a 3.9 ± 0.04 Hz (nell'intervallo 0.0 - 50.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$3.94 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$4725.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Supcrato 0 volte su 190	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	3.031 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	5.938 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$5.79 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}} [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.00462 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.01818 < 0.19688$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3534 < 1.58$	OK	

Classe B2: forte direzionalità e possibile presenza di disturbi elettromagnetici in assenza di picchi chiari

Durata registrazione: 0h20'00".

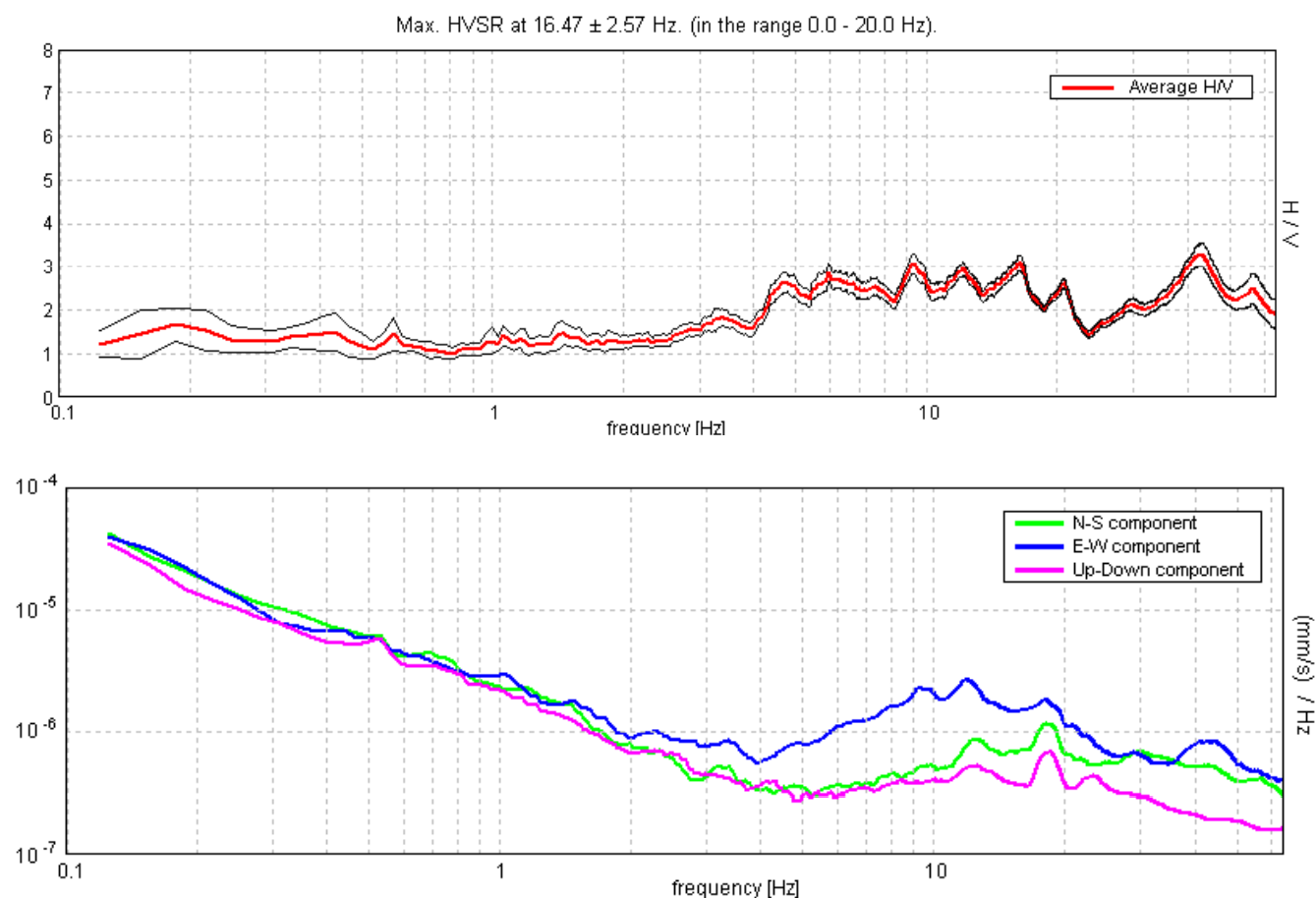
Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

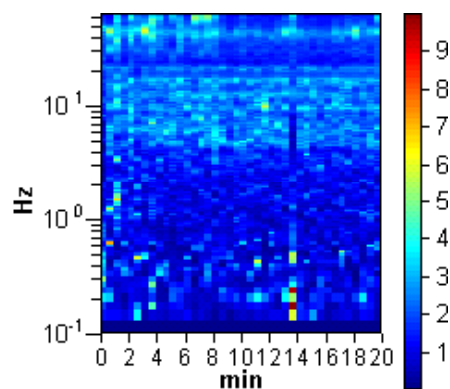
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: triangolare

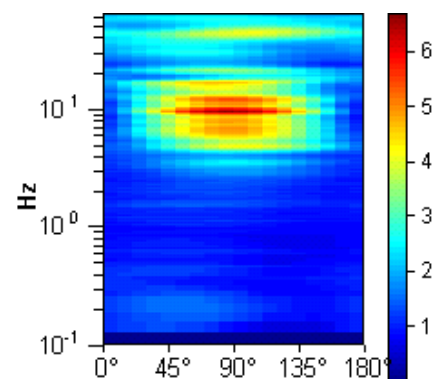
Lisciamento: 5%



SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



Criteri per una curva H/V affidabile [Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]			
$f_0 > 10 / L_w$	$16.47 > 0.33$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$19762.5 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 792 times	OK	
Criteri per un picco H/V chiaro [Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]			
Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$			NO
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	23.063 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$3.08 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}} [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.07625 < 0.05$		NO
$\sigma_f < 8(f_0)$	$1.25582 < 0.82344$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.0882 < 1.58$	OK	

Classe C: Misura non interpretabile *sopra 1 Hz* a causa di forti disturbi elettromagnetici

La forme spettrali e i test SESAME (2004) relativi al picco a 0.4 Hz indicano che esso è di chiara origine stratigrafica. Sopra 1 Hz la curva è però disturbata da un forte disturbo di possibile natura elettromagnetica e quindi non interpretabile in tutta la banda di frequenze di interesse ingegneristico.

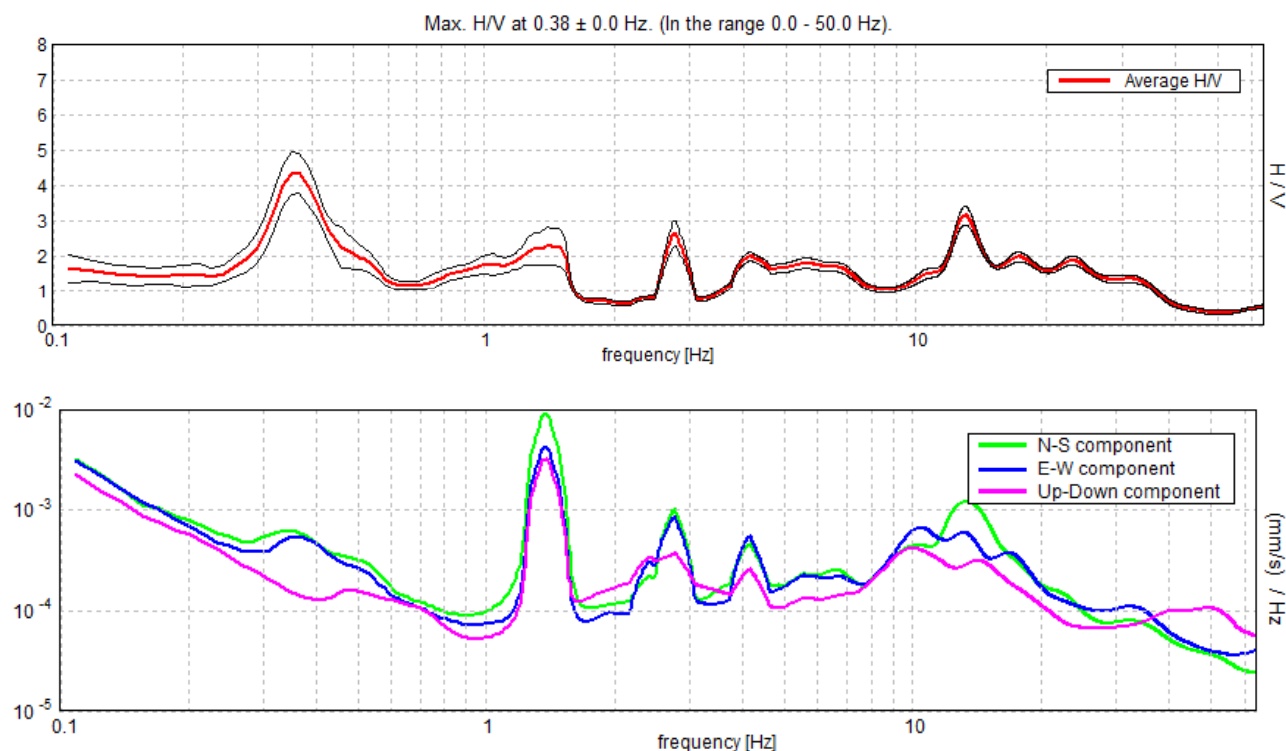
Durata registrazione: 0h20'00'', Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

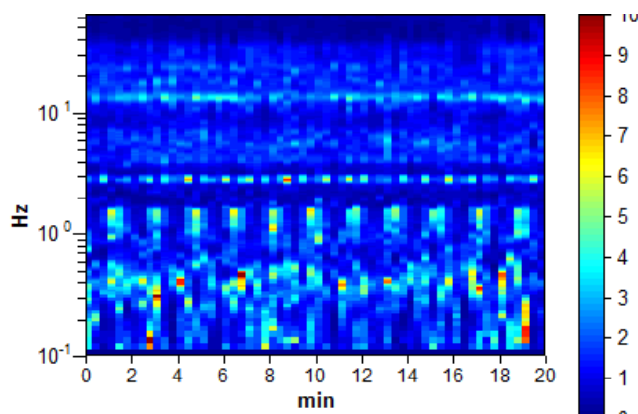
Lunghezza finestre: 40 s

Tipo di lisciamento: triangolare

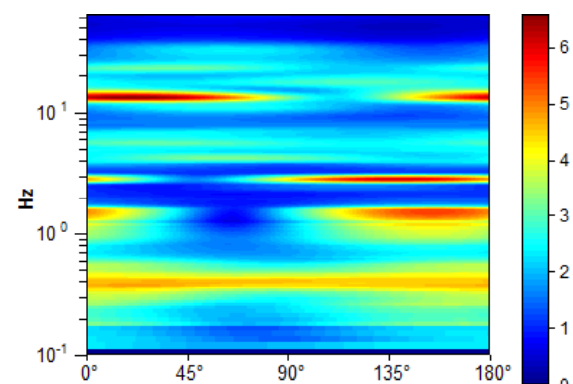
Lisciamento: 10%



SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



Picco H/V a 0.38 ± 0.0 Hz (nell'intervallo 0.0 - 50.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.38 > 0.25$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$450.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 37	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^* in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^*) < A_0 / 2$	0.281 Hz	OK	
Esiste f^* in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^*) < A_0 / 2$	0.484 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$4.34 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}} [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.00621 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	$0.00233 < 0.075$	OK	
$\sigma_A(f) < \theta(f)$	$0.2752 < 2.5$	OK	

Classe C: Misura non interpretabile sotto 2 Hz a causa di deriva dell'H/V legata a un possibile movimento (basculamento) dello strumento

Durata registrazione: 0h30'00".

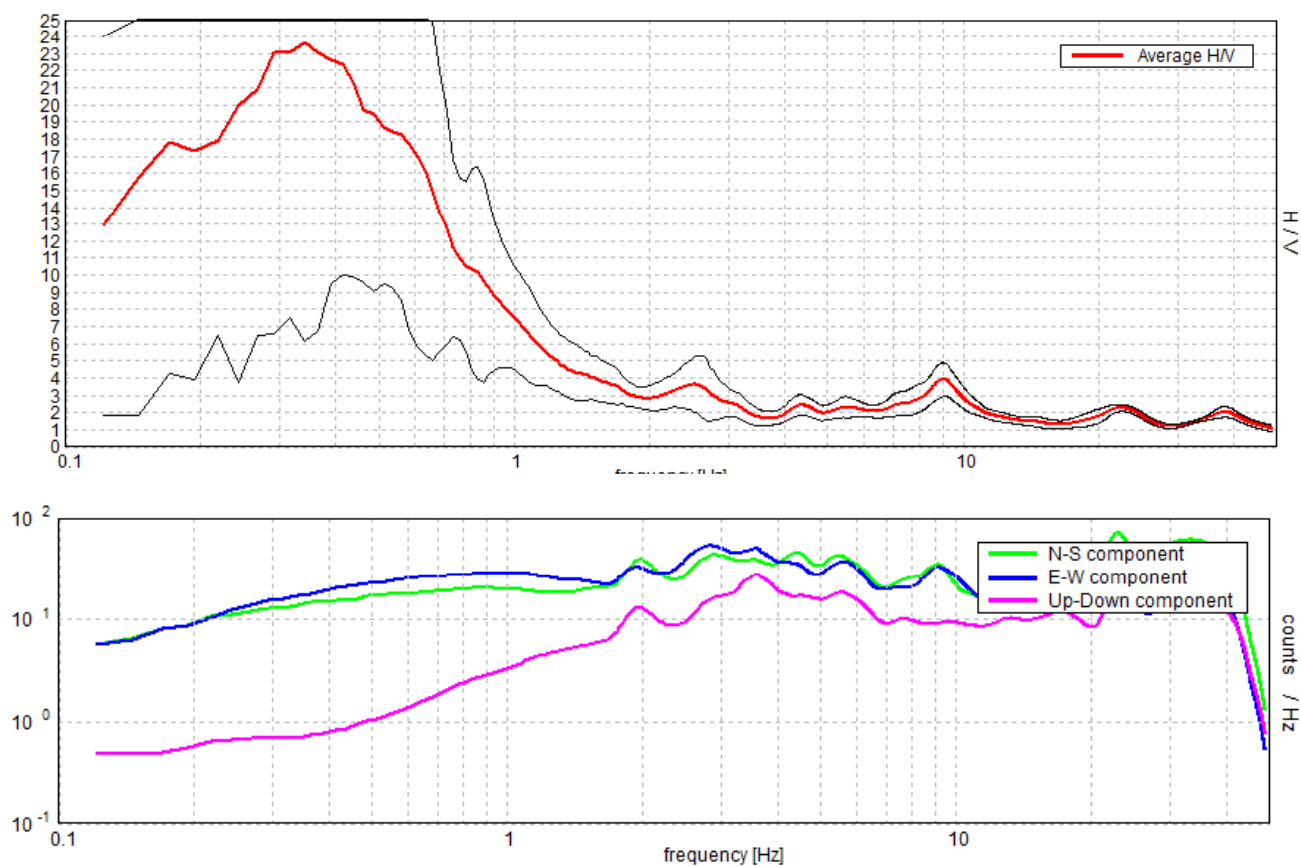
Analisi effettuata sull'intera traccia.

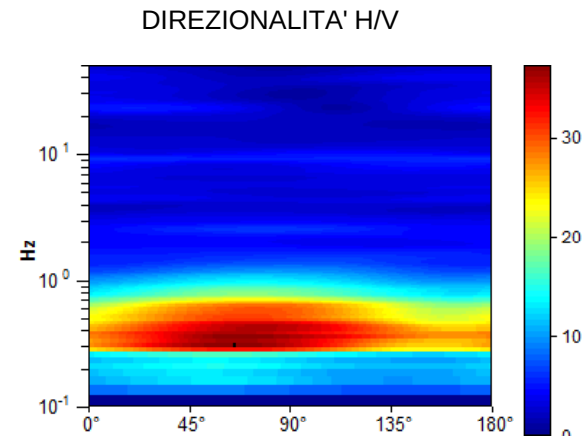
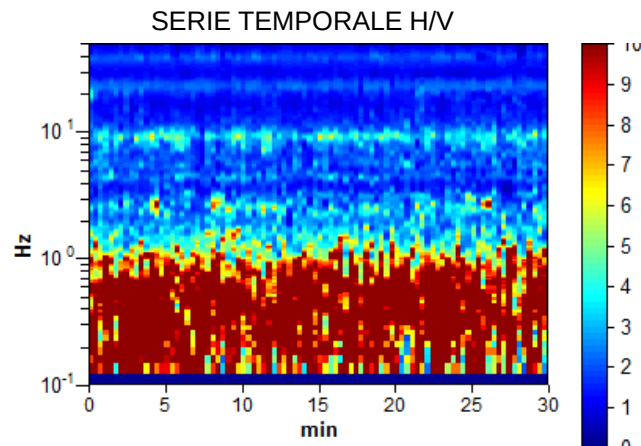
Freq. campionamento: 100 Hz

Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di liscio: triangolare

Liscio: 10





Picco H/V a 0.34 ± 0.1 Hz (nell'intervallo 0.0 - 50.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

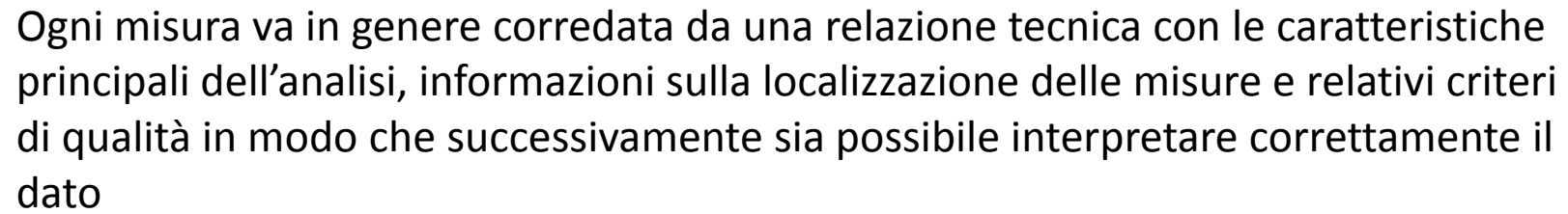
[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.34 > 0.50$		NO
$n_c(f_0) > 200$	$615.2 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 22 volte su 22		NO

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^* in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^*) < A_0 / 2$	0.098 Hz	OK	
Esiste f^* in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^*) < A_0 / 2$	0.732 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$23.66 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.0152 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < 8(f_0)$	$0.0052 < 0.06836$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$8.7476 < 2.5$		NO



Threshold values for c_{d} and $d_{\text{d}}(f)$					
Freq. range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$c_{\text{d}}(\%)$ [Hz]	0.25 %	0.2 %	0.15 %	0.10 %	0.05 %
$\theta(f_{\text{d}})$ for $c_{\text{d}}(f_{\text{d}})$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.59
Load $\theta(f_{\text{d}})$ for $c_{\text{d,max}}(\%)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

A narrow street in a town with historic buildings, showing a small white object on the ground.

Criteri SESAME



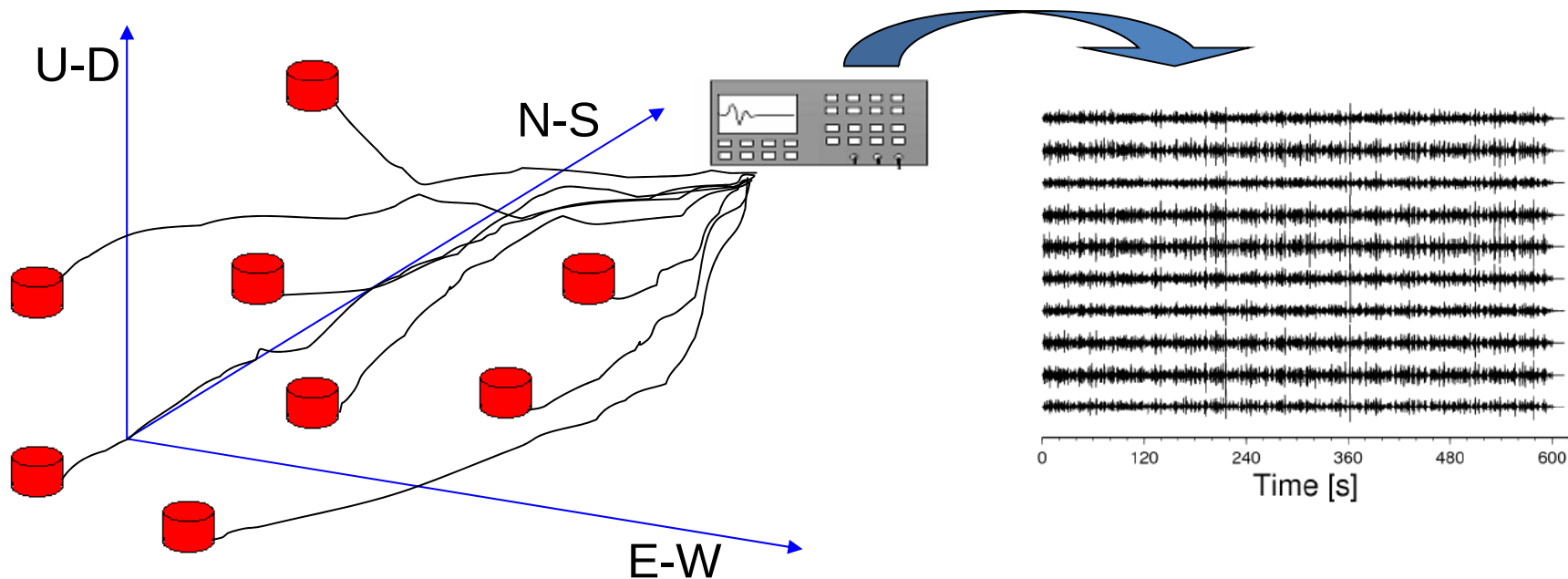


PAUSA



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**





Obiettivo primario di questa analisi è la caratterizzazione delle modalità di propagazione dei **fonti d'onda** che attraversano l'antenna sismica (array) durante l'intervallo di misura

L'espressione più semplice per descrivere un fronte d'onda **piano** che si muove in una direzione può essere ricavato dalla forma elementare della funzione coseno

Supponiamo di avere due punti di osservazione (1 e 2) che vedono transitare un'onda cosinusoidale

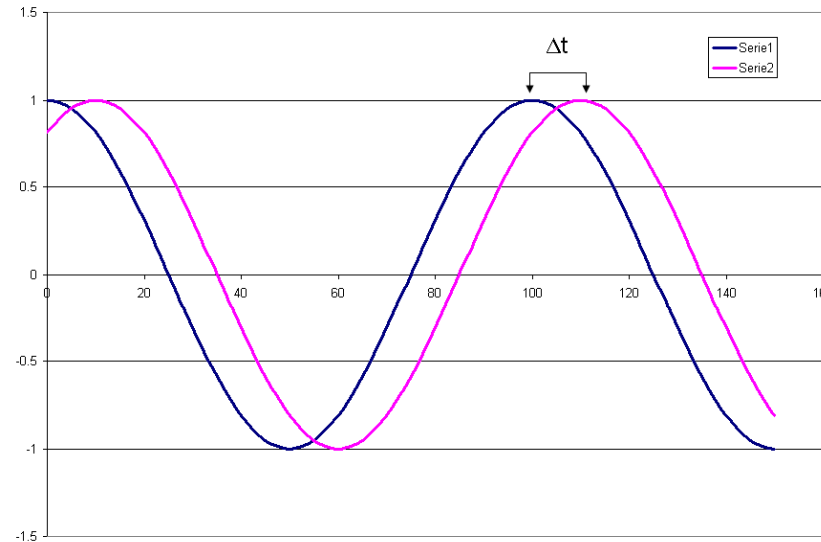
La prima sarà descritta come

$$D_1(t) = A \cos(2\pi \nu t)$$

La seconda avrà la forma

$$D_2(t) = A \cos(2\pi \nu (t - \Delta t)) = A \cos(2\pi \nu t - 2\pi \nu \Delta t)$$

In pratica, la seconda è uguale alla prima a meno di un ritardo Δt



Se immaginiamo che l'onda si propaghi ad una velocità V (detta **velocità di fase**), il tempo di ritardo fra le due registrazioni dipenderà dalla distanza r fra i due ricevitori e quindi

$$D_2(t) = A \cos \left(2\pi \nu t - 2\pi \nu \frac{r}{V} \right) = A \cos (2\pi \nu t - \phi)$$

Differenza di Fase



In generale, si avrà quindi che la forma registrata dipenderà dalla distanza r dal primo ricevitore

$$D(t, r) = A \cos \left(2\pi \nu t - \frac{2\pi \nu}{V} r \right) = A \cos(2\pi \nu t - kr)$$

In questa forma, k è detto **numero d'onda** e svolge le stesse funzioni della **frequenza** ma in funzione della **posizione** invece che nel **tempo**

Periodo $T = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{\omega}$ Velocità di fase $V = \lambda \nu$	Frequenza $k = \frac{2\pi \nu}{V} = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{V} = \omega u$ Numero d'onda Lunghezza d'onda "Slowness" (lentezza) $1/\nu$
--	---



Quindi, per caratterizzare le velocità di propagazione delle onde piane presenti, bisogna studiare le **differenze di fase** fra le registrazioni ottenute alla diverse stazioni

$$D(t, r) = A \cos(2\pi \nu t - kr)$$

Può essere vista come la
“fase” dell’onda

Immaginiamo il campo d’onde misurato come la **combinazione lineare** di fronti d’onda piani ciascuno caratterizzato da una **frequenza di vibrazione** e da una diversa **velocità di fase**

Le informazioni relative alle differenze di fase osservate per ciascuna frequenza di vibrazione nei diversi punti di misura è contenuta nella cosiddetta **matrice cross-spettrale** o, alternativamente, dalla matrice di **cross-correlazione**.



Strumento chiave è la correlazione fra due segnali registrati da due sensori posti ad una distanza r

$$r_{12}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D(x_1, t_i) D(x_2, t_i + \tau)$$

$$r_{12}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A \cos(\omega t_i - kx_1) A \cos(\omega t_i - kx_2 + \omega\tau) \xrightarrow{N \rightarrow \infty} \frac{A^2}{2} \cos(k(x_2 - x_1) - \omega\tau)$$

$$r_{\max} \leftrightarrow k(x_2 - x_1) - \omega\tau_{\max} = 0 \rightarrow \frac{k}{\omega}(x_2 - x_1) = \frac{(x_2 - x_1)}{V_R} = \tau_{\max}$$

Quindi lo studio della funzione di correlazione permette di individuare lo sfasamento fra i due segnali e quindi la velocità di propagazione “apparente” (è quella vera solo se il segnale viaggia lungo la congiungente)



In presenza di dispersione, questa operazione andrebbe ripetuta frequenza per frequenza dopo avere filtrato di volta in volta il segnale

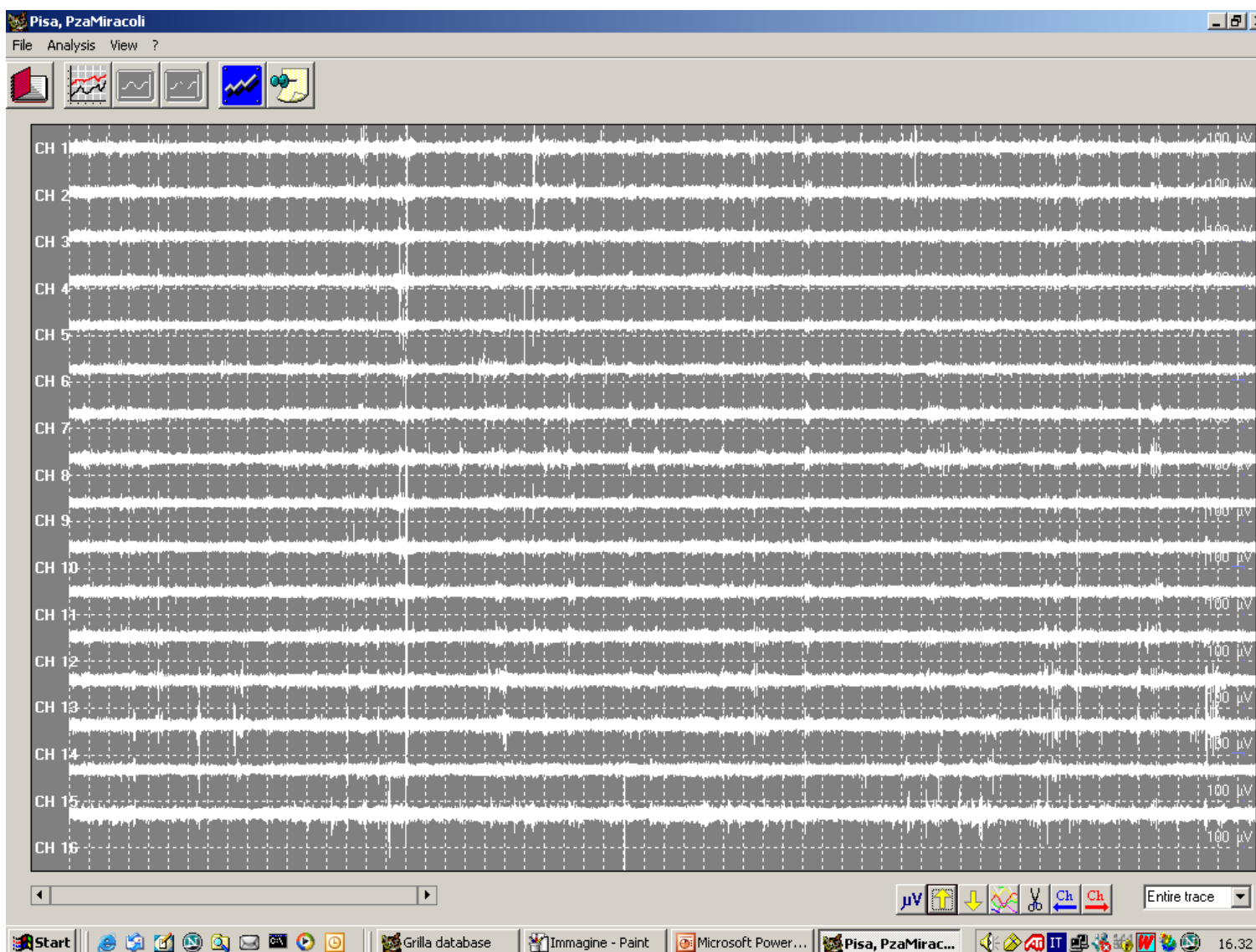
In realtà il teorema di Wiener-Khinchin stabilisce che la stessa informazione sullo sfasamento può essere ottenuta utilizzando gli spettri del segnale misurato ai due sensori.

In pratica si costruisce la cosiddetta **funzione di coerenza** nella forma

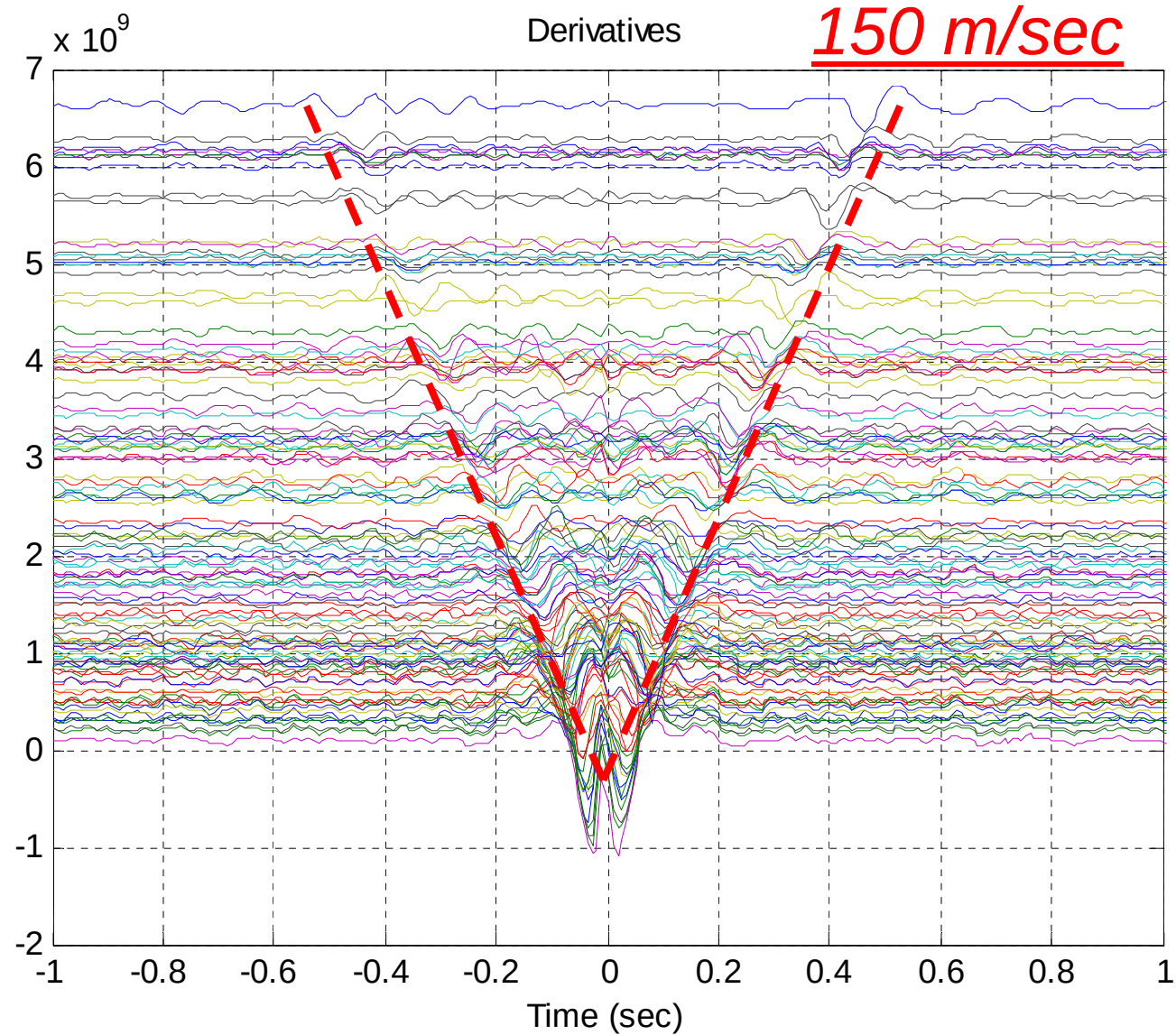
$$C_{12}(\Delta x, \omega) = \frac{A(x_1, \omega) \tilde{A}(x_2, \omega)}{\sqrt{A(x_1, \omega) \tilde{A}(x_1, \omega)} \sqrt{A(x_2, \omega) \tilde{A}(x_2, \omega)}}$$

dove $A(x_i, \omega)$ è lo spettro complesso nel punto i -mo e la tilde indica il complesso coniugato. Il numeratore della funzione di coerenza è la cosiddetta **funzione cross-spettrale**). L'insieme dei valori della funzione di coerenza per le diverse coppie di sensori è detta **matrice di coerenza**

Gli elementi della matrice di coerenza forniscono le informazioni sullo sfasamento



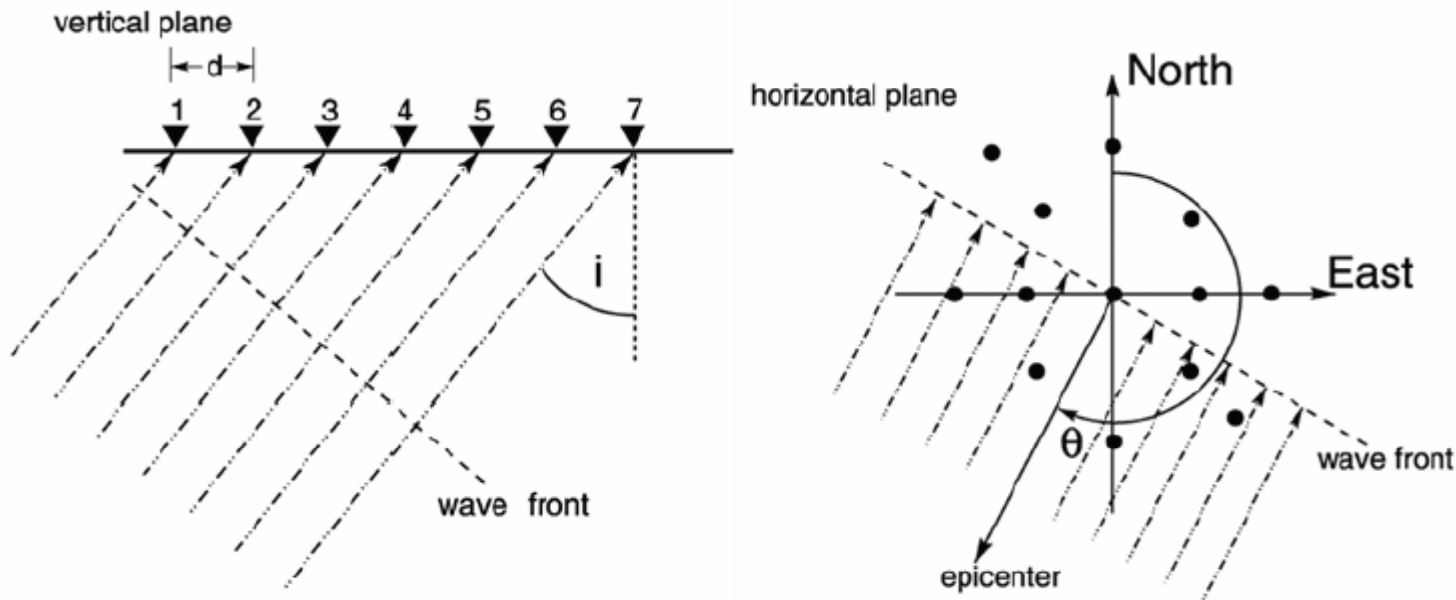
Vibrazioni ambientali misurate sul un'antenna sismica



La cross correlazione media rivela forme di persistenza statistica associate al segnale

Il numero d'onda contiene le informazioni sulle modalità di propagazione del fronte d'onda nello spazio: direzione e velocità di fase **apparenti** (sempre maggiori o uguali alle velocità reali v_0)

$$D(t, r) = A \cos(\omega t - \omega \vec{u} r)$$



Lentezza
apparente

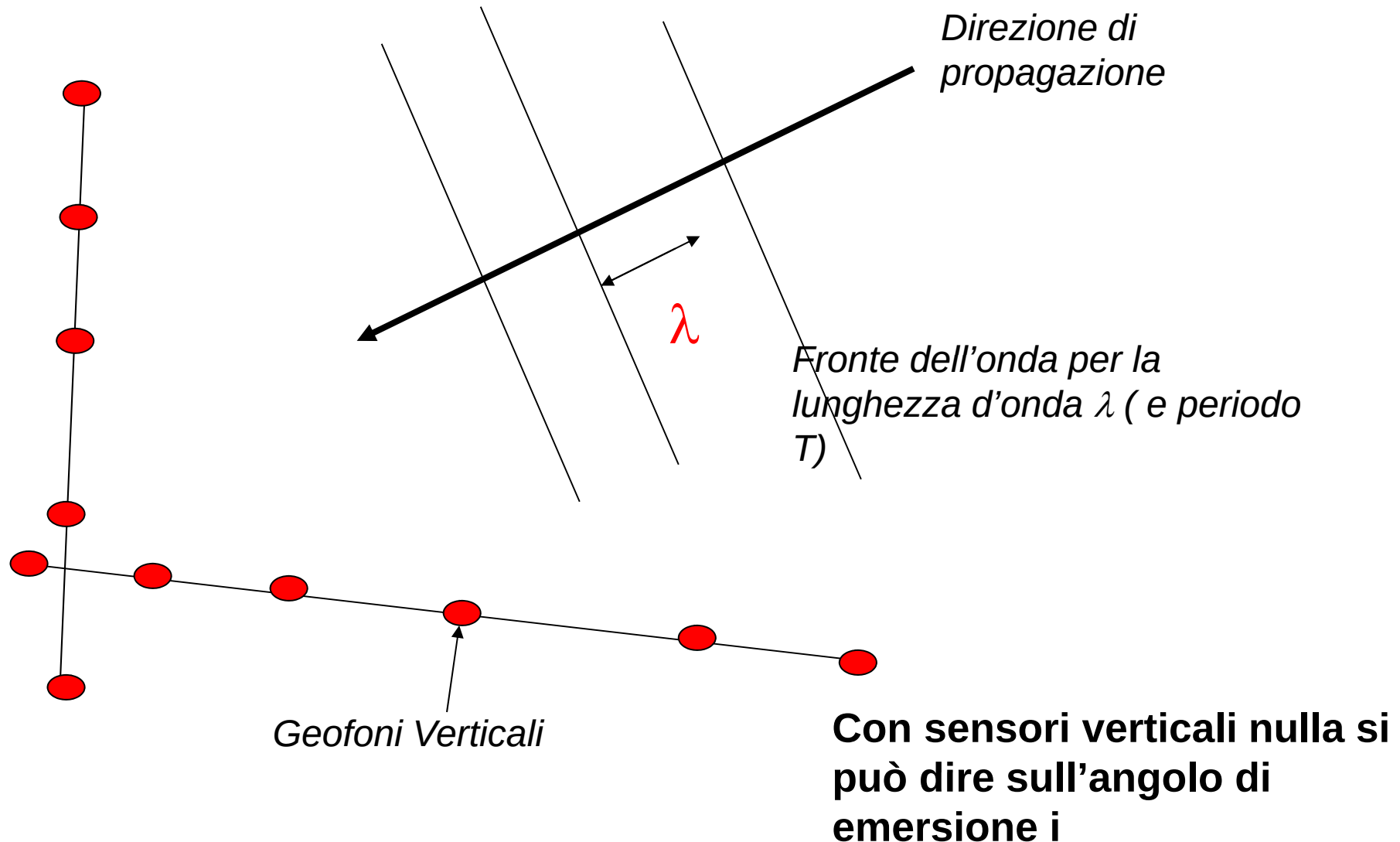
$$\vec{u} = \frac{1}{v_0} (\sin(i) \sin(\theta), \sin(i) \cos(\theta), \cos(i))$$

$$\vec{u} = u_{hor} (\sin(\theta), \cos(\theta), \frac{1}{\tan(i)})$$

$$|\vec{u}_{hor}| = \frac{1}{v_{app}} = \frac{\sin(i)}{v_0}$$



Esaminando le differenze di fase su una distribuzione di sensori non allineati è possibile identificare la direzione di provenienza dell'onda (θ)





Anche restringiamo l'analisi ai soli fronti d'onda che si propagano sul piano orizzontale (in realtà per una diagnosi efficace sarebbero necessarie registrazioni su antenne costituite da sensori tri-direzionali), rimangono aperti tre problemi essenziali

Quanto bene conosciamo la matrice cross spettrale?

Qual è il campo di frequenze esplorato?

Quanto accurate sono le stime delle velocità di fase?



La qualità della matrice cross-spettrale dipende dalle modalità di campionamento nel tempo (frequenza di campionamento, durata delle registrazioni) e nello spazio (posizioni relativa dei sensori)

Queste pongono dei limiti alle **frequenze effettivamente campionabili** e alle **lunghezze d'onda caratterizzabili in modo affidabile**

In **termini temporali** (campo di frequenze esplorate) contano due parametri: il tempo totale della registrazione (T) e la frequenza di campionamento (ν_c).

La minima frequenza distinguibile è pari a $1/T$ che è anche la **risoluzione** in frequenza della matrice **cross spettrale**

La massima frequenza osservabile è pari a $\frac{1}{2} \nu_c$

Lunghi intervalli di misura (T) permettono anche un buon campionamento statistico delle caratteristiche medie del campo di rumore

In **termini spaziali** (campo di numeri d'onda esplorato in una data direzione) contano due parametri: la massima dimensione dell'antenna (D_{max}) e la minima distanza inter-geofonica (D_{min}).

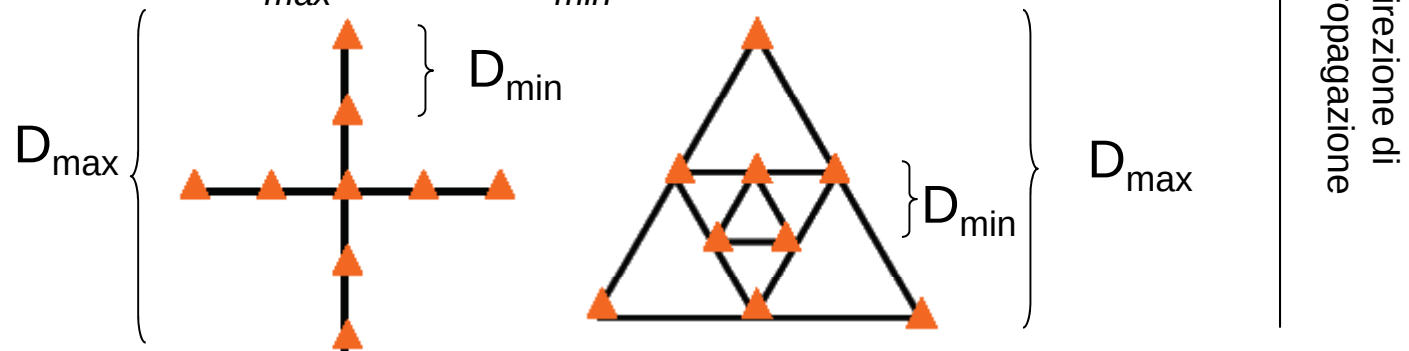
$$\Delta k = 2\pi / ((N - 1)d_{min}) = 2\pi / D_{max}$$

In pratica definisce la minima differenza di lunghezza d'onda distinguibile ad una data frequenza e quindi la minima differenza di velocità apprezzabile $\delta V = V^2 / (v D_{max})$ che dipende quindi dalla velocità di fase V

La minima lunghezza d'onda apprezzabile (λ_{min}) sarà almeno $2D_{min}$

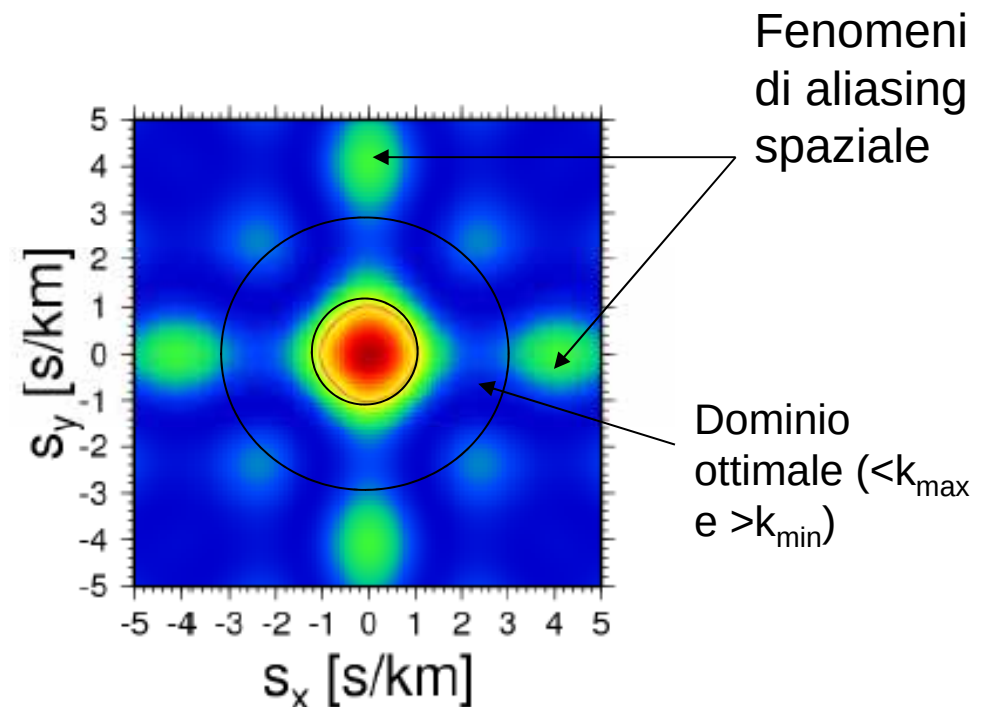
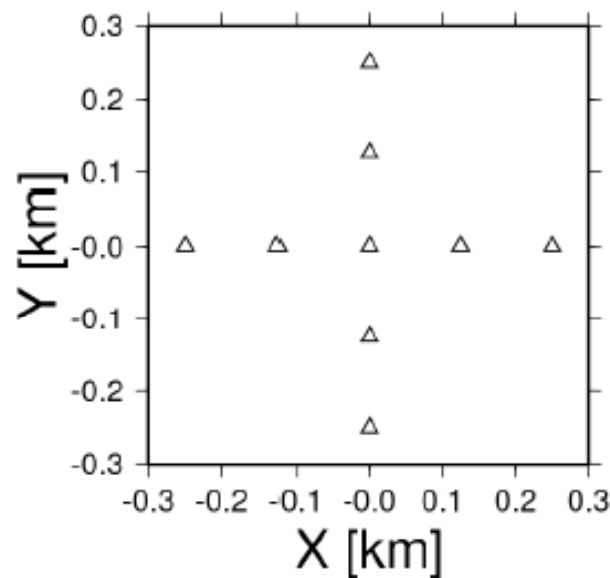
La massima lunghezza d'onda apprezzabile (λ_{max}) sarà circa $3D_{max}$

In termini di velocità $3D_{max} v > V > 2D_{min} v$



In realtà conta anche il numero dei sensori e la loro distribuzione spaziale

Quest'ultimo effetto viene espresso dalla cosiddetta **funzione di risposta** dell'antenna in termini di valori di numero d'onda S (al posto di k) osservabili nelle diverse direzioni senza distorsioni (aliasing)



Esistono quindi dei limiti alla individuazione delle velocità di fase per una determinata configurazione, limiti che dipendono dalla direzione



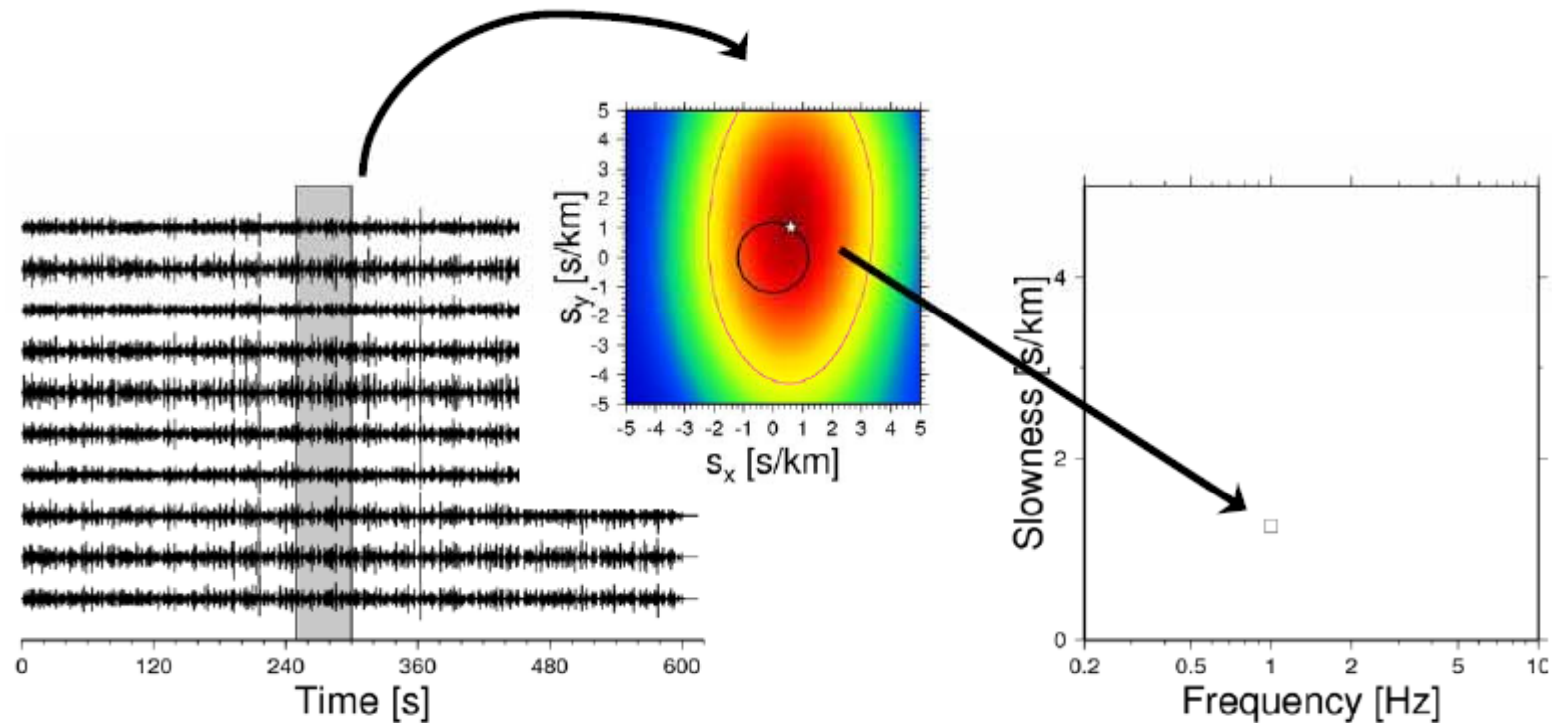
A questo punto ci si pone il problema di determinare le velocità di fase dei treni d'onda a partire dalla matrice cross-spettrale

Il problema principale in questo contesto è separare le fasi di onde piane coerenti che attraversa l'antenna, dalle fasi non coerenti (onde non piane o disturbi)

Esistono due tecniche fondamentali che si basano su due modelli del campo d'onde del rumore sismico

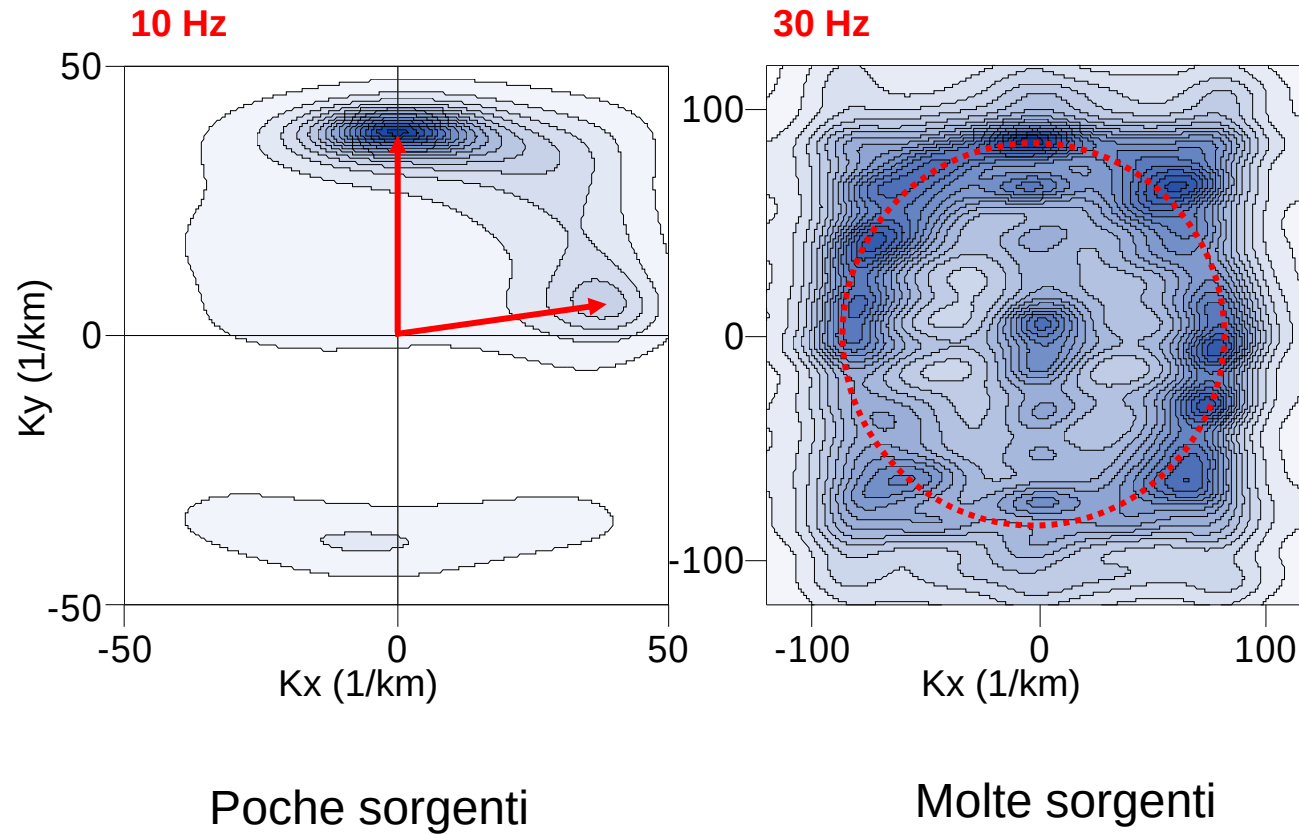
- 1. Procedure f - k** (*beam-forming, massima verosimiglianza, MUSIC*) ecc. utili in presenza di onde piane generate da un insieme ridotto di sorgenti
- 2. Procedure basate sull'autocorrelazione spaziale** (*ESAC, MESAC, SPAC*) sono utili quando il rumore è generato da una distribuzione uniforme di sorgenti (ovvero non esistono sorgenti dominanti)

Le procedure f-K sono assai più raffinate e permettono di determinare contemporaneamente le direzioni di provenienza dei fronti d'onda che in un dato intervallo di tempo hanno attraversato lo stendimento e la loro velocità di fase in funzione della frequenza



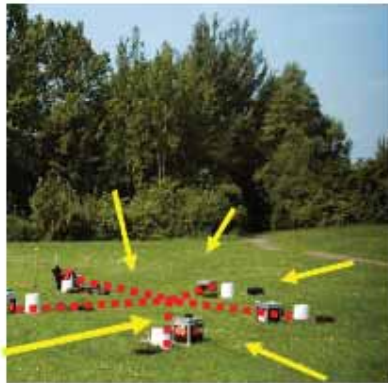
Il problema è che richiedono una serie di scelte dell'operatore che condizionano fortemente l'esito della misura

È possibile studiare la direzionalità del rumore e valutare la velocità di fase alle diverse frequenze

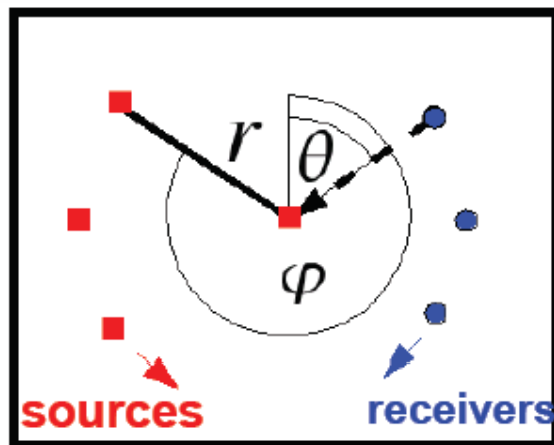




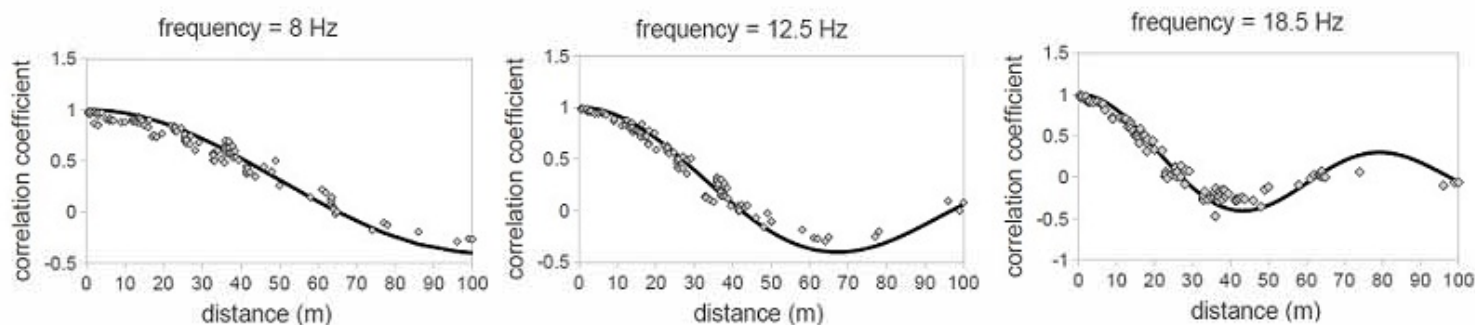
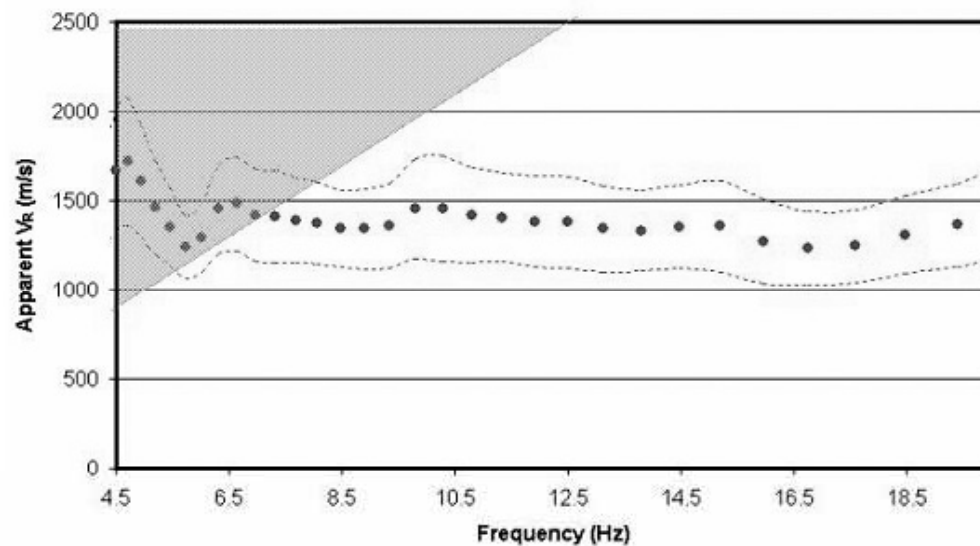
Le procedure ESAC sono basate sul un risultato di Aki (1959) secondo il quale la funzione di correlazione media fra le registrazioni di un rumore isotropo effettuate su sensori verticali distribuiti nelle diverse direzioni a parità distanza r da un sensore centrale, ha una forma nota (Funzione di Bessel di ordine 0)



$$\overline{\rho}(r, \omega_0) = J_0\left(\frac{\omega_0 r}{c(\omega_0)}\right)$$



La forma di questa funzione di Bessel ad una data frequenza ed una data distanza r è controllata dal valore della velocità di fase



Si tratta di un metodo “robusto” grazie alla regolarizzazione imposta dalla applicazione della funzione di Bessel, ma rischia di fornire risultati errati in presenza di una sorgente dominante e quando la misura è effettuata con stendimenti lineari. Con questa procedura è possibile identificare direttamente la curva di dispersione effettiva



In sintesi, In assenza di grandi contrasti di impedenza, la profondità di esplorazione dipende quindi da tre elementi

1. *La frequenza di risonanza dei geofoni*
2. *La dimensione dello stendimento*
3. *Dalla presenza di segnale in bassa frequenza*

Simulazioni numeriche e l'esperienza di campagna hanno dimostrato che in presenza di un segnale intenso, è possibile determinare differenze di fase fino a frequenze pari alla metà circa della frequenza propria dei sensori (ν_0). In generale, però, questa frequenza è la minima raggiungibile

Data una velocità di fase V per le onde superficiali misurate, la massima lunghezza d'onda misurabile (V/ν_0), almeno nel caso della procedura ESAC è dell'ordine di due volte la dimensione dello stendimento

Dato che la profondità di esplorazione è circa dell'ordine della metà della lunghezza d'onda ne risulta che la profondità di esplorazione è dell'ordine di grandezza della dimensione dello stendimento



Per esempio, utilizzando geofoni con $v_0 = 4.5$ Hz ed in presenza di velocità di fase dell'ordine di 500 m/s, la massima lunghezza d'onda risulta pari a circa 100 m. Quindi, con sensori di questo tipo, dimensioni maggiori sono inutili.

Dall'altro lato, se le dimensioni massime dello stendimento sono dell'ordine del centinaio di metri (per limitazioni logistiche o per via delle dimensioni dei cavi) è inutile utilizzare sensori a più bassa frequenza propria

Infine si dimostra che l'incertezza δV_R relative alle stime della velocità di fase per la frequenza f è come minimo pari a

$$\left[\delta V_R (f) \right]_{\min} \equiv \frac{\left[V_R (f) \right]^2}{f_c \cdot \langle r \rangle}$$

dove r è la distanza media fra i sensori, f_c è la frequenza di campionamento e V_R è la velocità di fase alla frequenza f

Questo vuol dire che maggiori sono le velocità di fase e maggiore è l'incertezza. Questa può essere ridotta (molto parzialmente) aumentando le frequenze di campionamento o la distanza media fra i geofoni

In pratica, le misure su terreni rigidi sono più difficili (ma non impossibili)!



PAUSA



I risultati delle misure di vibrazioni ambientali si prestano ad almeno tre livelli di interpretazione

1. Livello qualitativo

L'insieme dei dati ottenuti permette di identificare le aree dove esistono fenomeni di risonanza la presenza di fenomeni di risonanza sismica nel campo di frequenze di interesse ingegneristico (0.5-10 Hz)

2. Livello semi-qualitativo

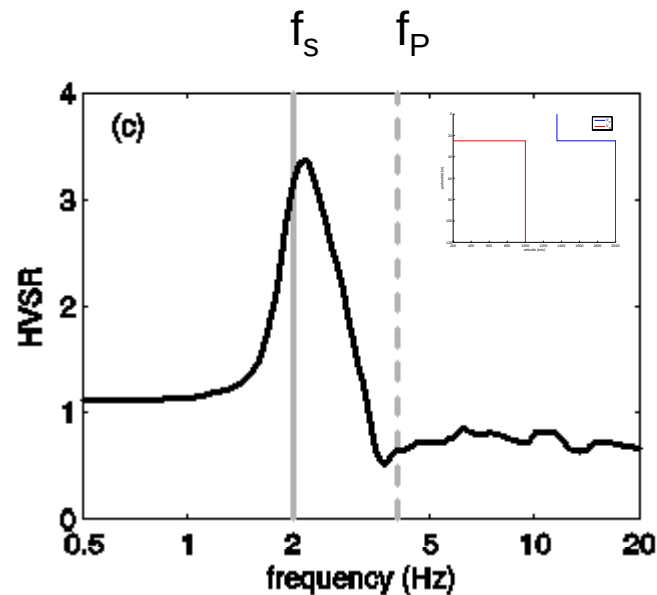
Alle misure sono associate delle stime molto grossolane dello spessore delle coperture responsabili del fenomeno della risonanza e dell'entità del contrasto atteso

3. Livello quantitativo

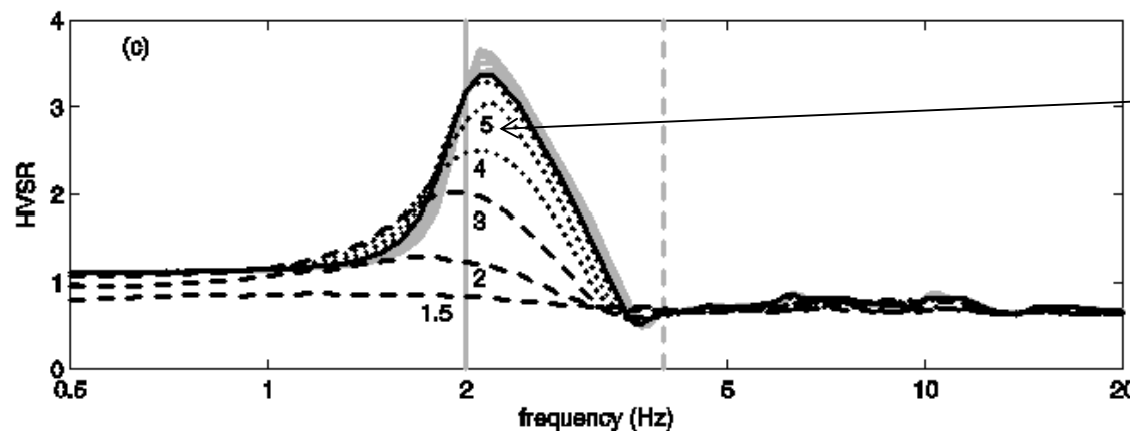
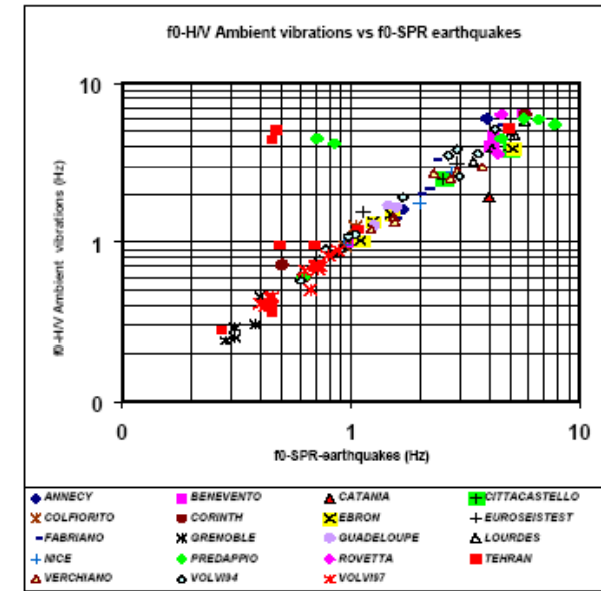
Le misure vengono “invertite” (con modelli piano-paralleli) per ricavare informazioni sul profilo di velocità delle onde S nel sottosuolo del punto di misura



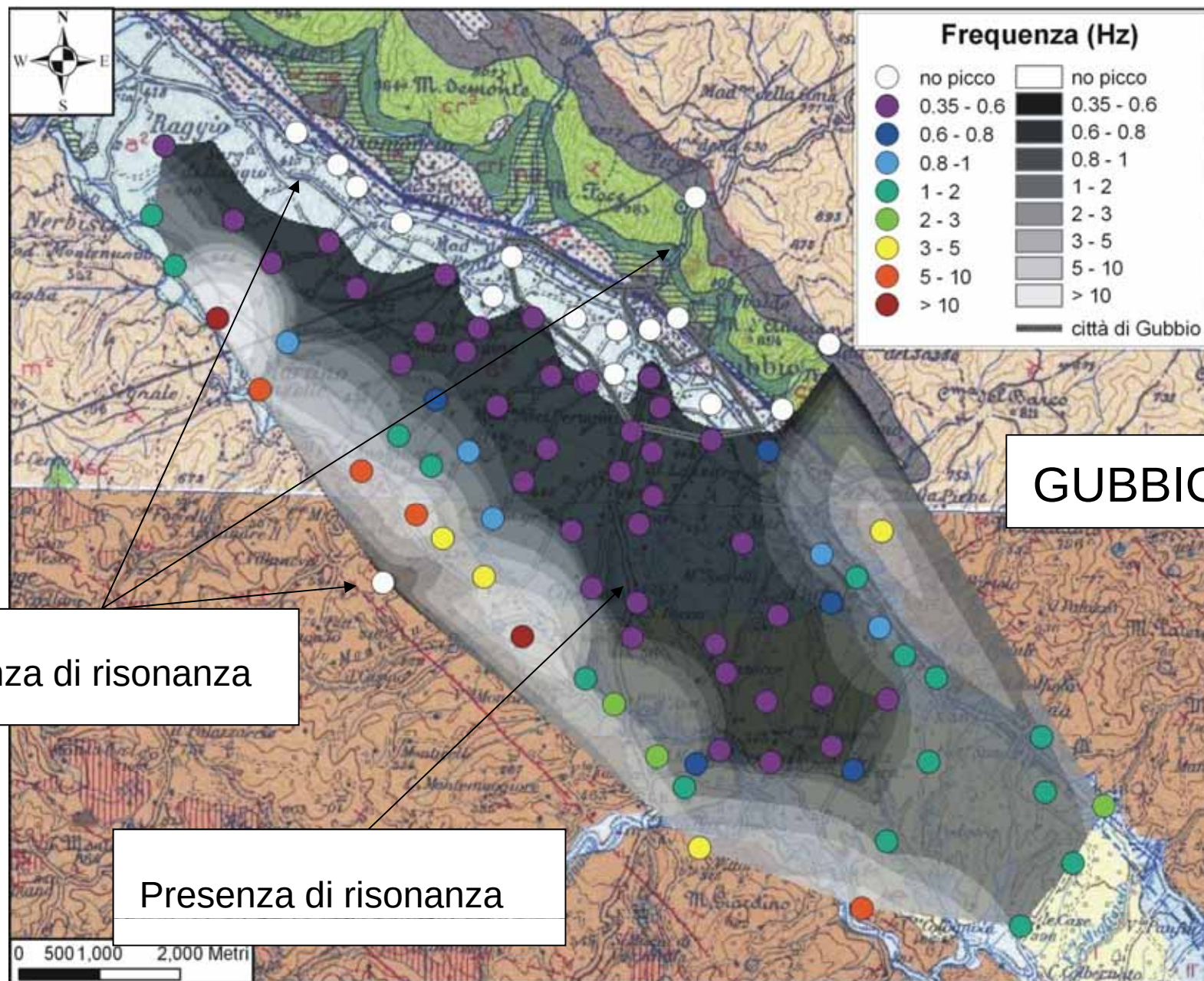
L'interpretazione **qualitativa** è basata sui risultati delle simulazioni numeriche i quali indicano che:



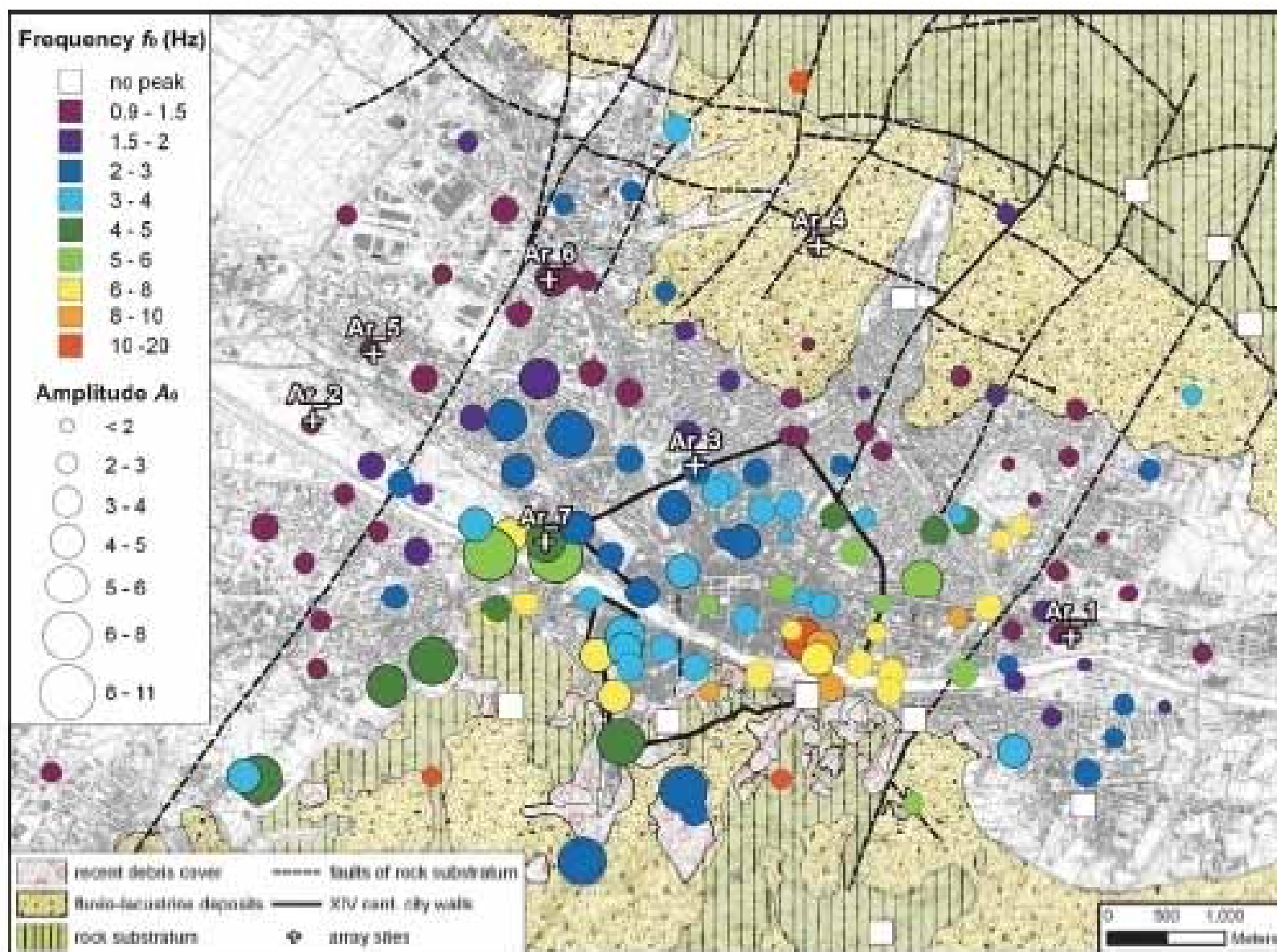
La posizione dei massimi dei rapporti spettrali mostra una buona correlazione con le frequenze di risonanza delle onde S ($f_0 = V_S/4H$)



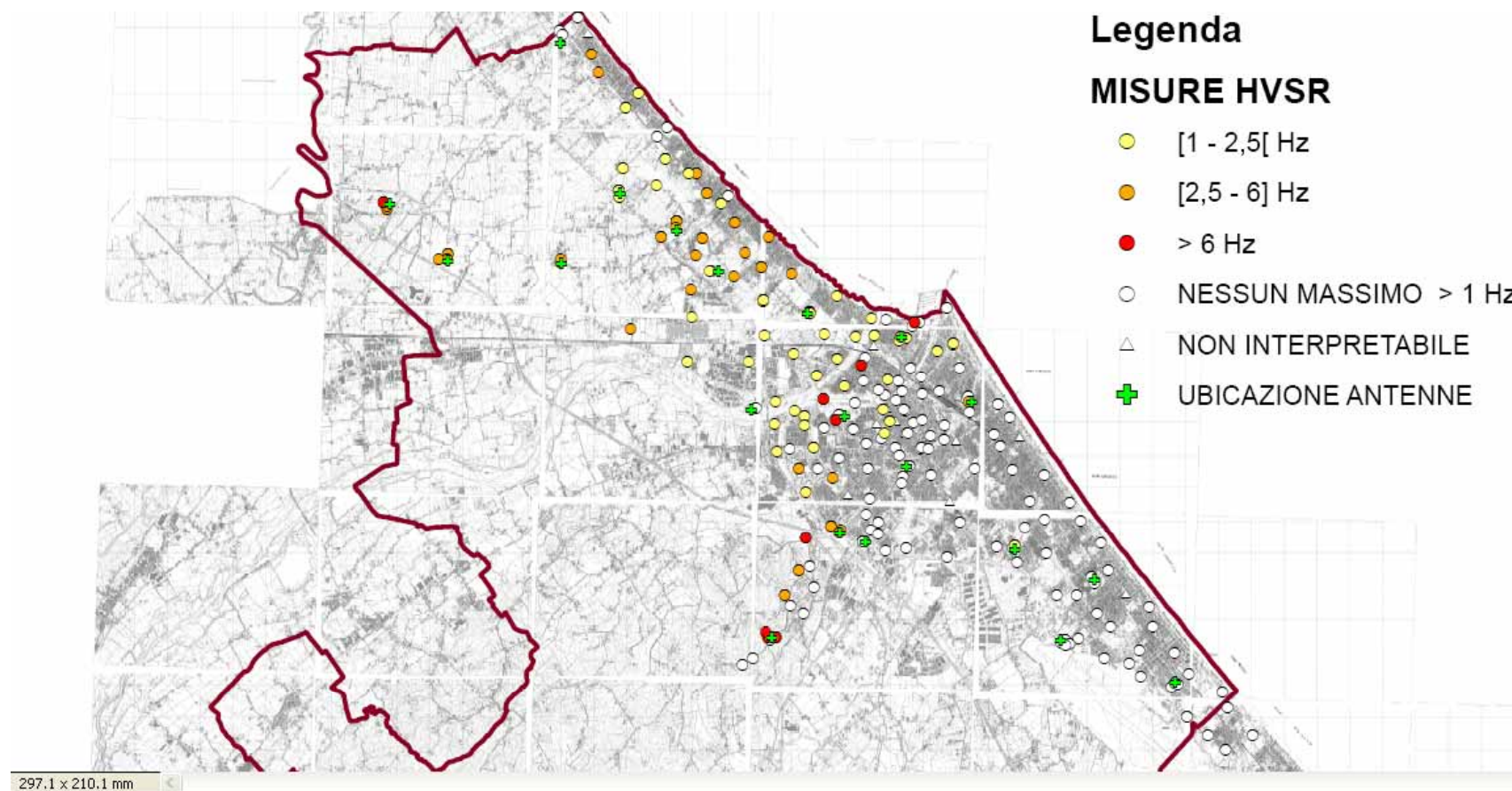
Per contrasti di impedenza bassi o nulli il picco sparisce e la sua ampiezza aumenta con l'aumentare del contrasto (in modo non lineare)



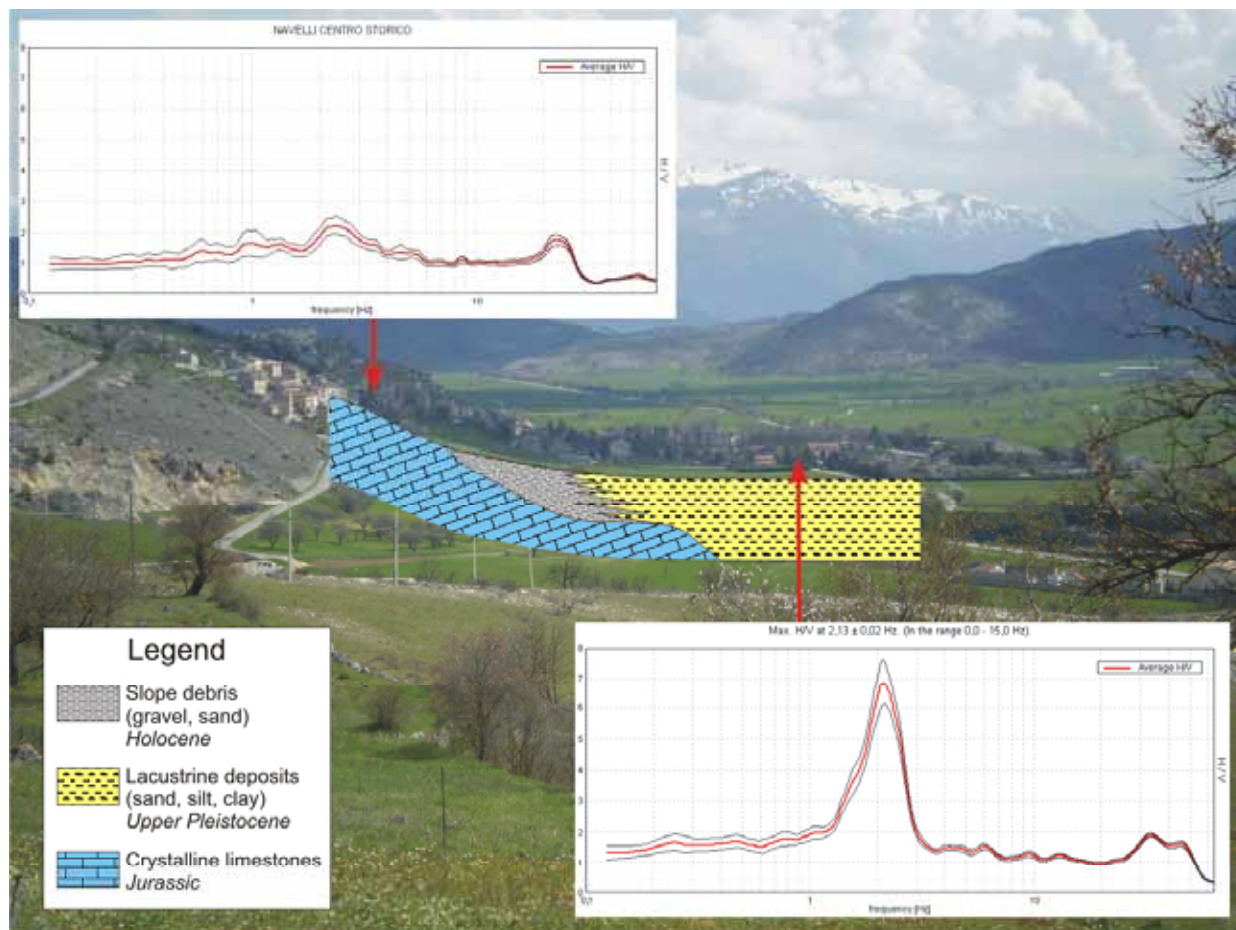
Misure HVSR nel comune di Firenze



Misure HVSR nel comune di Rimini



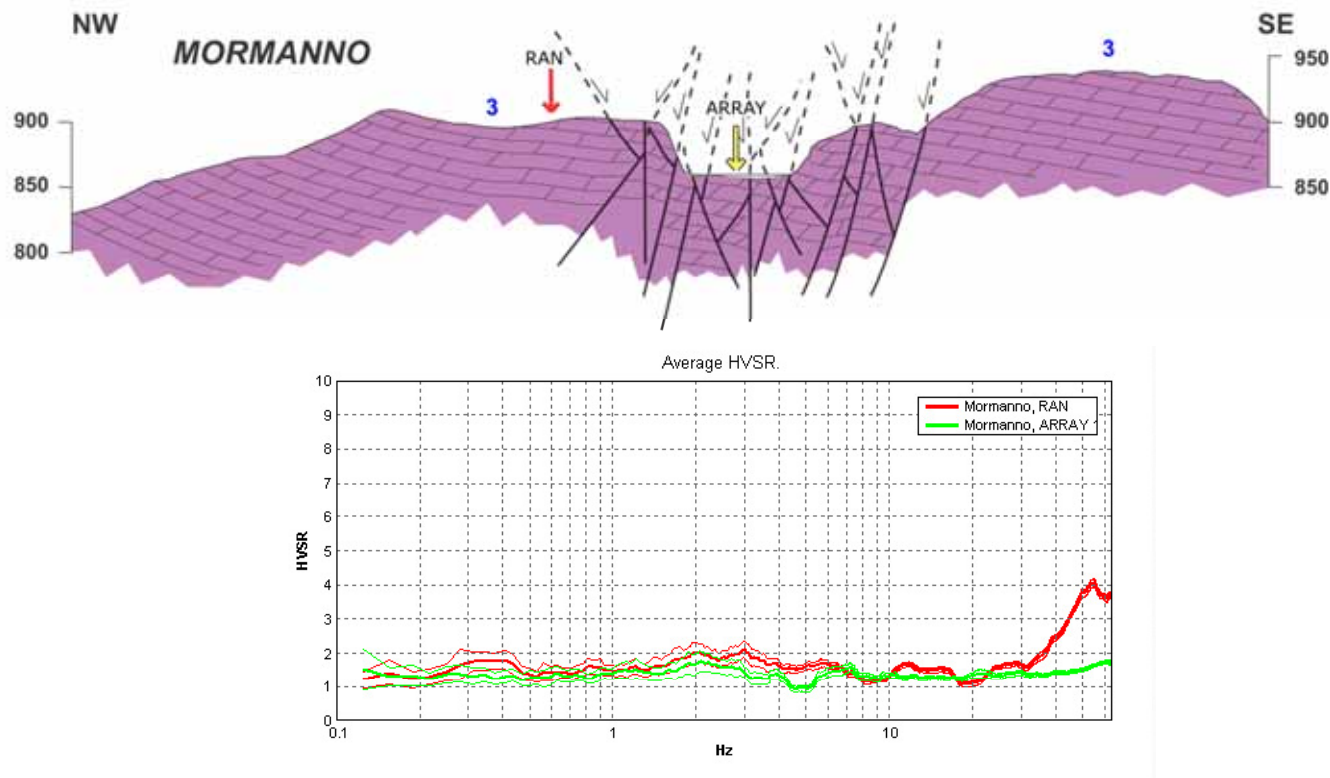
Esempio del territorio di Navelli (L'Aquila)



Viene messa in chiara evidenza la differenza fra una situazione di basamento rigido affiorante e sepolto



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



Il livello **semi-qualitativo**

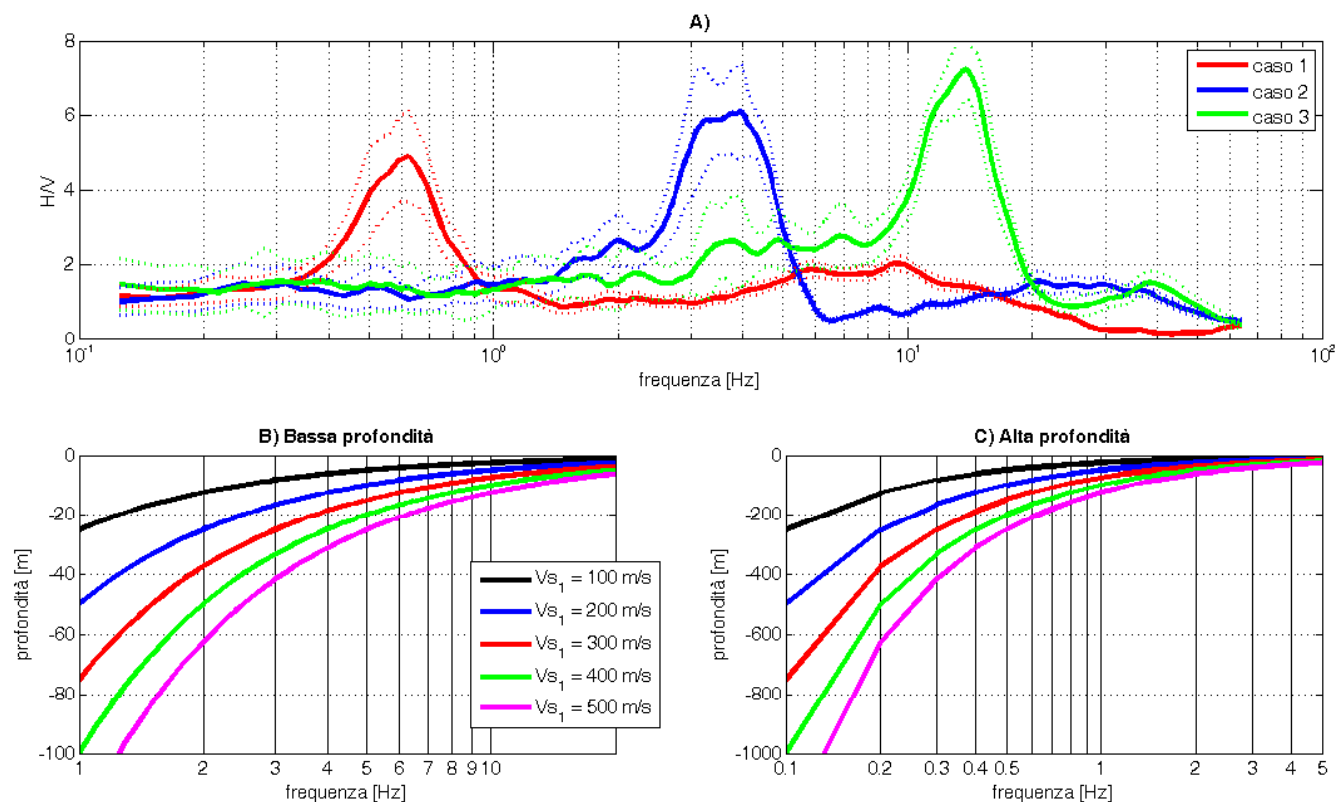
Le misure forniscono una stima diretta della frequenza di risonanza ν_0 delle coperture

La frequenza di risonanza del sedimento dipende dallo spessore H del sedimento e dalla velocità “media” (V_s) delle onde S nel sedimento

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

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.

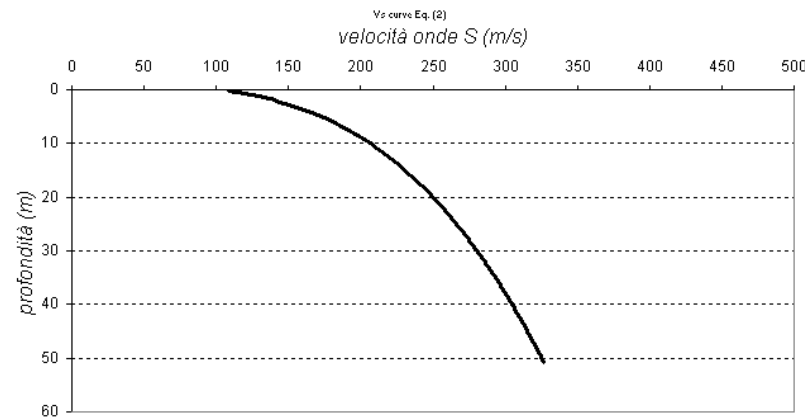


In alcuni casi è possibile formulare ipotesi ragionevoli riguardo al profilo di velocità

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 V_s con la profondità H del tipo “Legge a potenza”

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



dove V_0 e a dipendono dalle caratteristiche del sedimento (granulometria, coesione, ecc.). Si noti anche che in questa ipotesi

$$\bar{V}_s(h) \approx V_0(1 - a)h^a$$



In questi casi è possibile dimostrare che esiste una relazione diretta tra la frequenza di risonanza e lo spessore dello strato soffice

Questa relazione dipenderà dai due parametri V_0 e a secondo la relazione

$$H = \left[\frac{V_0(1-a)}{4\nu_0} + 1 \right]^{1/(1-a)} - 1 \approx A\nu_0^B$$

Si ha allora che

$$\log H \approx \log A + B \log \nu_0$$

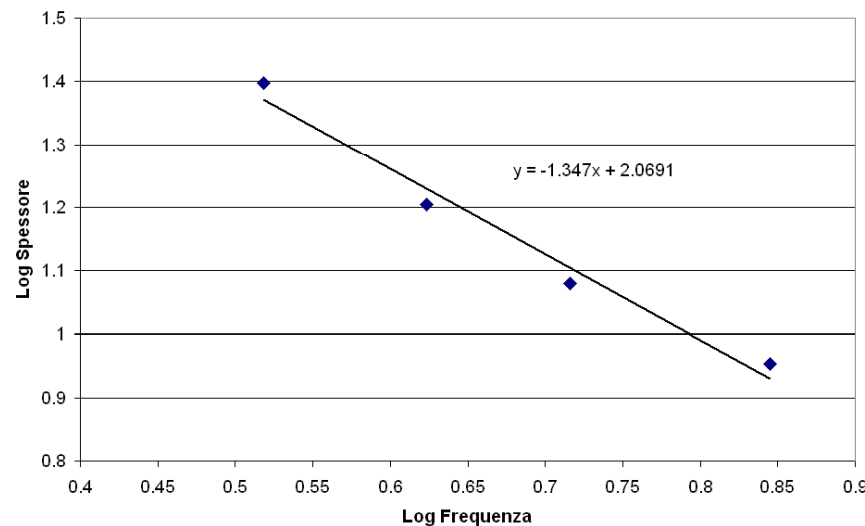
$$a = \frac{1}{B} + 1$$

$$V_0 = \frac{4A^{1-a}}{1-a}$$

$$\ln H \approx \ln A + B \ln \nu_0$$

Questa relazione può essere utilizzata per stimare i parametri della “legge a potenza” (V_0 e a) a partire da valori di frequenza di risonanza misurati in corrispondenza di coperture di spessore H noto

H (m)	ν_0 (Hz)	
25	3.3	Sito 1
12	5.2	Sito 2
16	4.2	Sito 3
9	7.0	Sito 4



$$A = 10^{2.07} = 7.9$$

$$B = -1.347$$

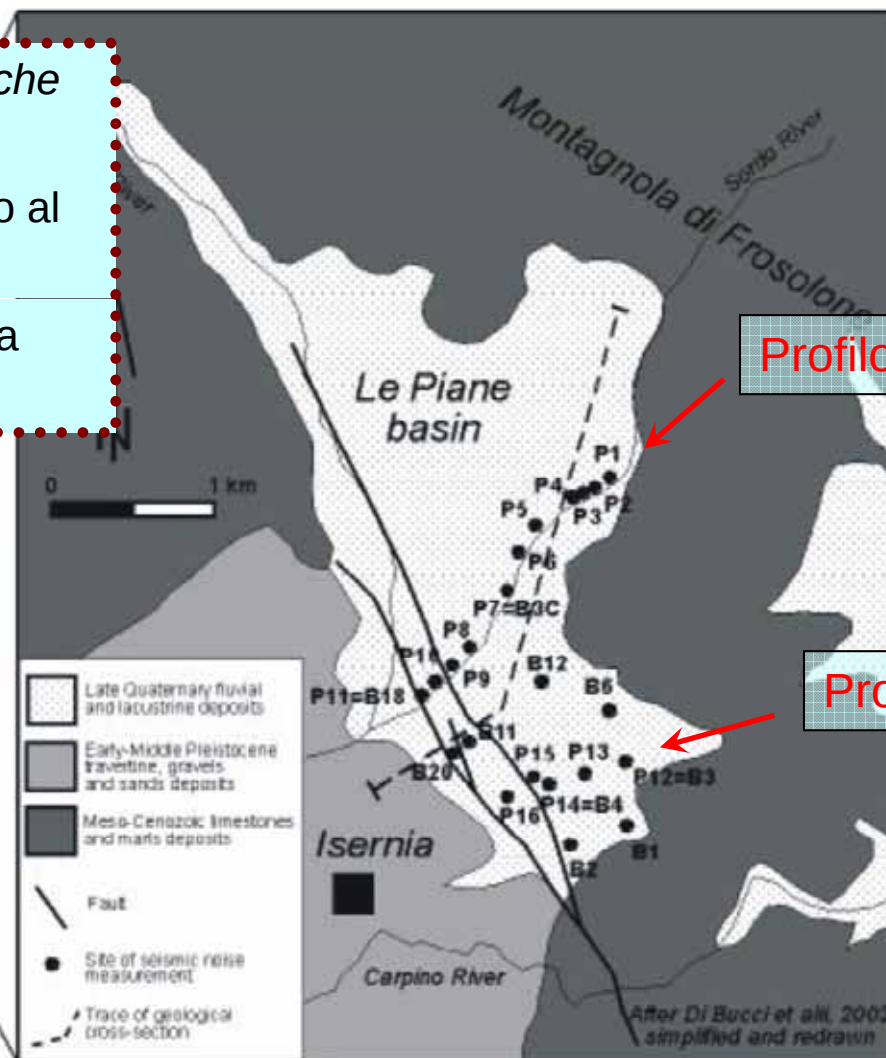
$$a = 0.25; \quad V_0 = 185 \text{ m/s}$$

Sono i parametri della legge a potenza

Il caso del bacino “Le Piane” (Isernia)

Informazioni geologiche e geofisiche disponibili:

- 45 sondaggi superficiali (solo 3 fino al bedrock)
- 1 profilo di sismica a rifrazione, 2 a riflessione e 1 profilo MASW



Profilo 1

Profilo 2

misure HVSR
di rumore sismico ambientale

I dati disponibili
possono essere
utilizzati per
parametrizzare la
legge a potenza

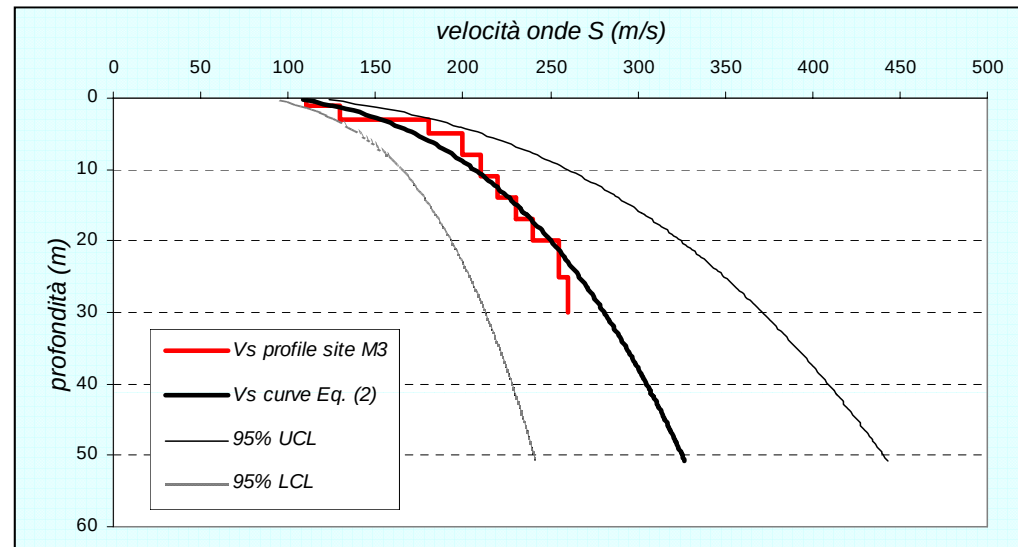
[1]

$$v_1 = \frac{\hat{V}_s}{4H}$$

nell'assunzione che in uno strato sedimentario
soffice il profilo V_s sia:

[2]

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



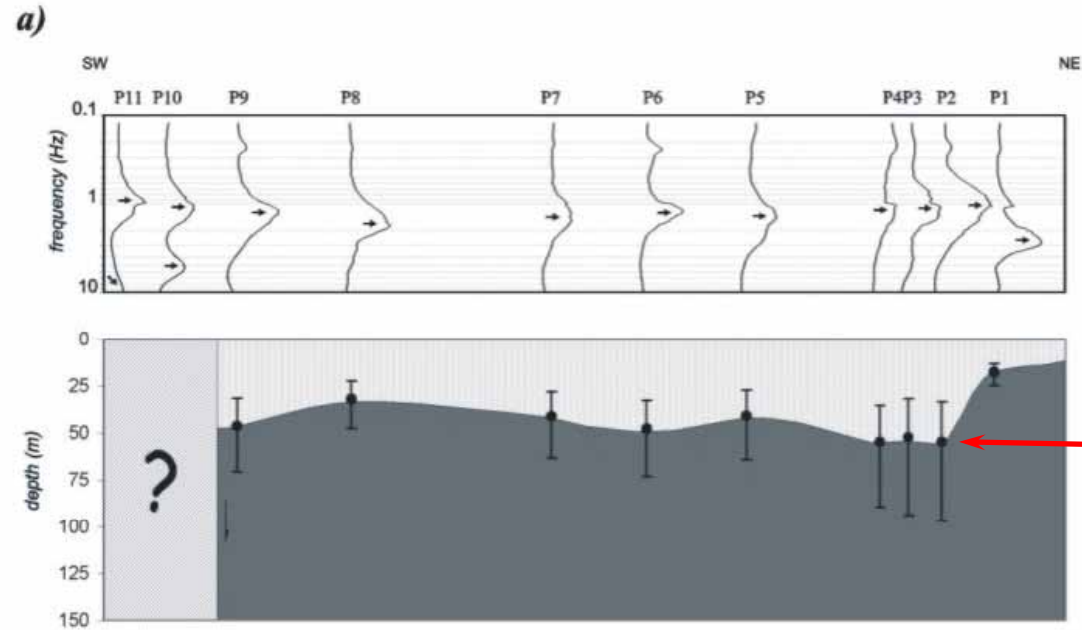
[3]

$$H = \left[\frac{V_0(1-a)}{4\hat{V}_1} + 1 \right]^{1/(1-a)} - 1 \cong A\hat{V}_r^B$$

$$V_0 = 102 \pm 12 \text{ (m/s)}$$

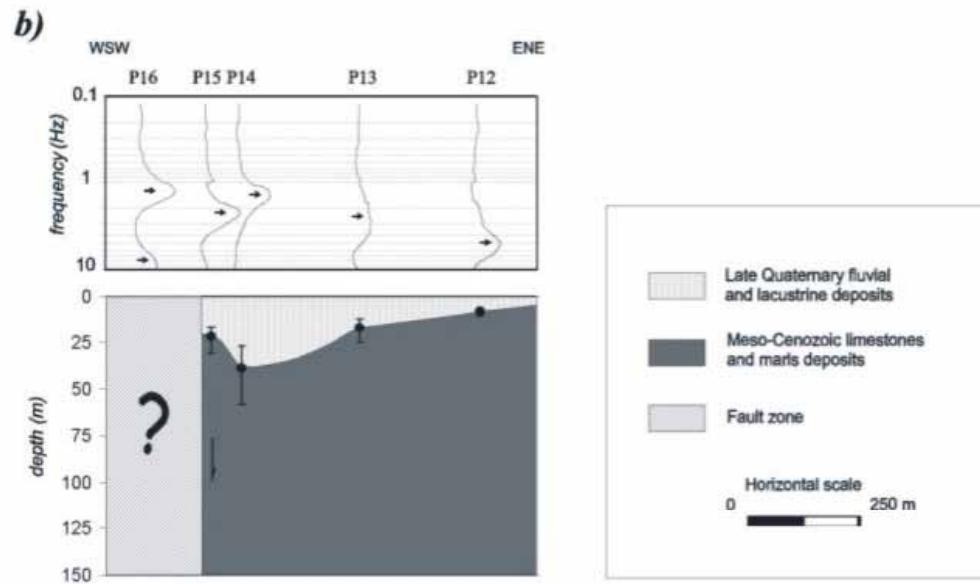
$$a = 0.296 \pm 0.048$$

Profilo 1



$$h = \left[\frac{V_0(1-a)}{4f_r} + 1 \right]^{1/(1-a)} - 1$$

Profilo 2





L'esperienza mostra che in molti casi i parametri della legge a potenza sono assai simili fra loro. Quindi è possibile definire semplici abachi di tipo generale che permettono di stimare (in prima approssimazione) lo spessore della coltre di sedimenti

Per esempio, utilizzando un abaco preliminare (valido a rigore per mezzi granulari non cementati), le frequenze di risonanza possono tentativamente essere convertite in spessori permettendo una identificazione preliminare delle interfacce risonanti

Questo tipo di indagine non sostituisce una analisi di dettaglio ma ha il solo scopo (sotto stretto controllo geologico) di fornire indicazioni preliminari sulla struttura del sottosuolo

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



Al 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	
2 – 3	30 – 50	
3 – 5	20 – 30	Decine di metri
5 – 8	10 – 20	
8 – 20	5 – 10	
> 20	< 5	Qualche metro

$H/V > 3$ Alto contrasto

$2 < H/V < 3$ Basso Contrasto



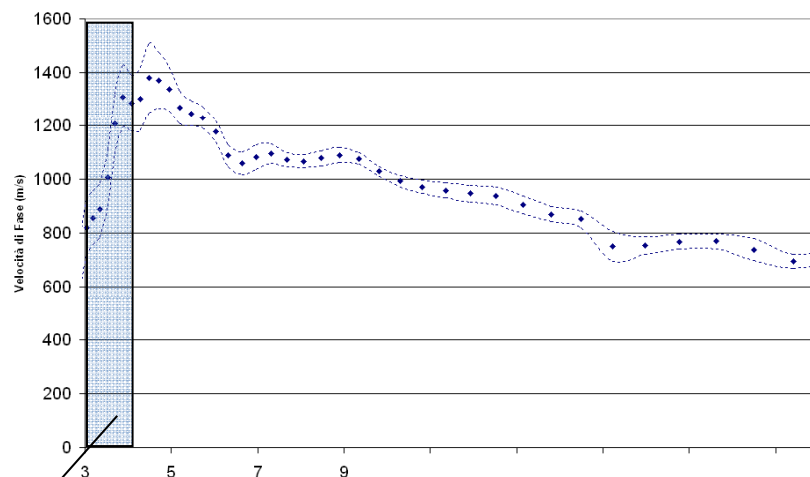
Anche per le curve di dispersione (come per l'HVSR) è possibile effettuate interpretazioni di tipo semi-quantitativo

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 $0.5-0.9 \lambda$ (per Vs30 è opportuno $\lambda=40$)

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 $V_s(h)$ sfruttando le relazioni del tipo $h=0.8\lambda$ e $V_s=1.1V_R$*
3. *La curva $V_s(h)$ viene interpretata come indicativa della velocità media delle onde S fino alla profondità h*

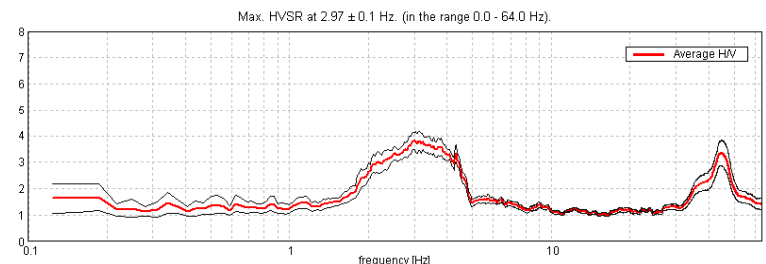
Naturalmente questa interpretazione ha senso solo per frequenze al di sopra della frequenza di risonanza delle coperture



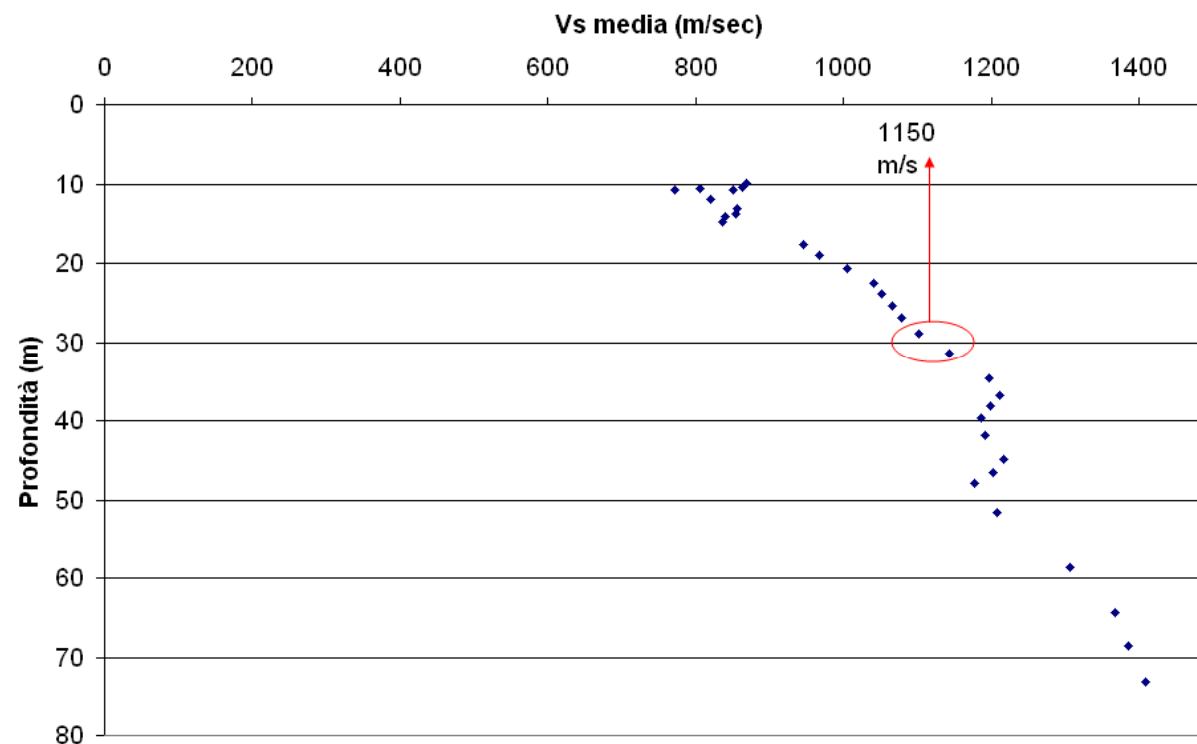
Sotto la frequenza di risonanza

$V_{s30} = 1150 \text{ m/s}$

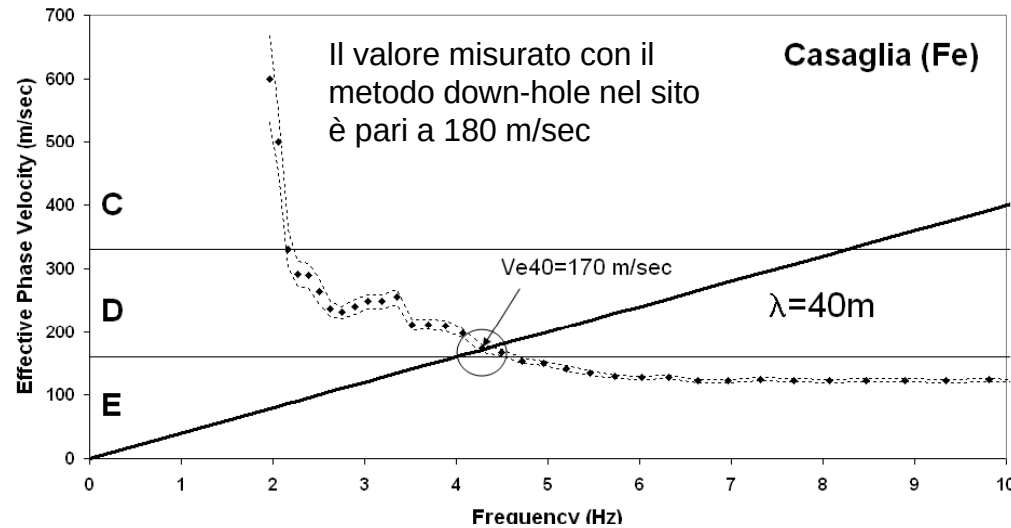
(Naturalmente è una stima approssimata!!!)



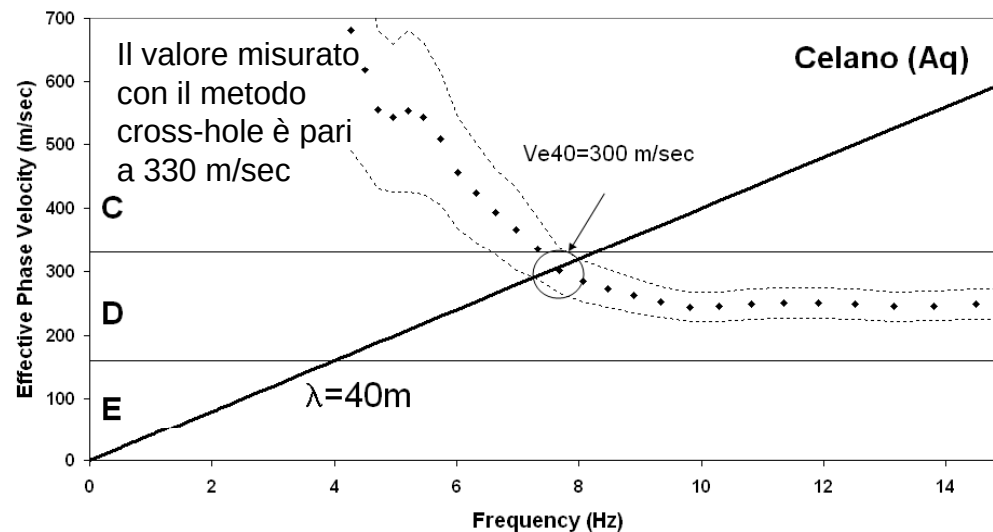
Frequenza di risonanza (HVSR)



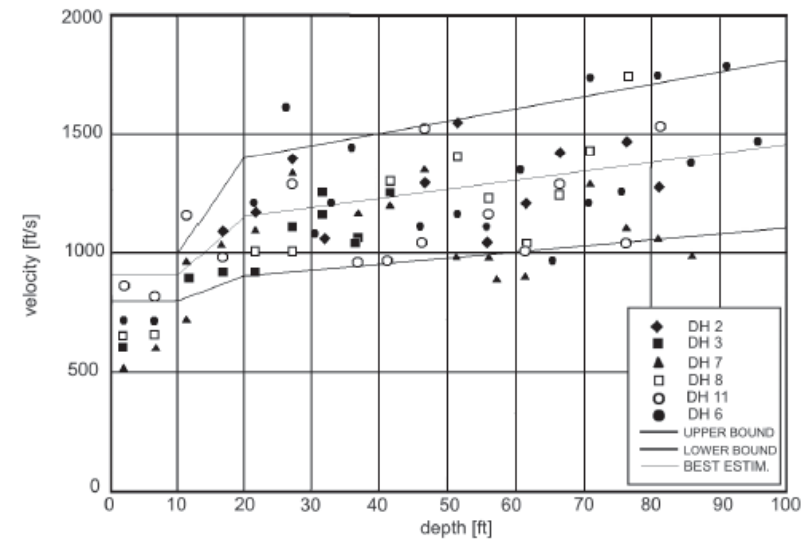
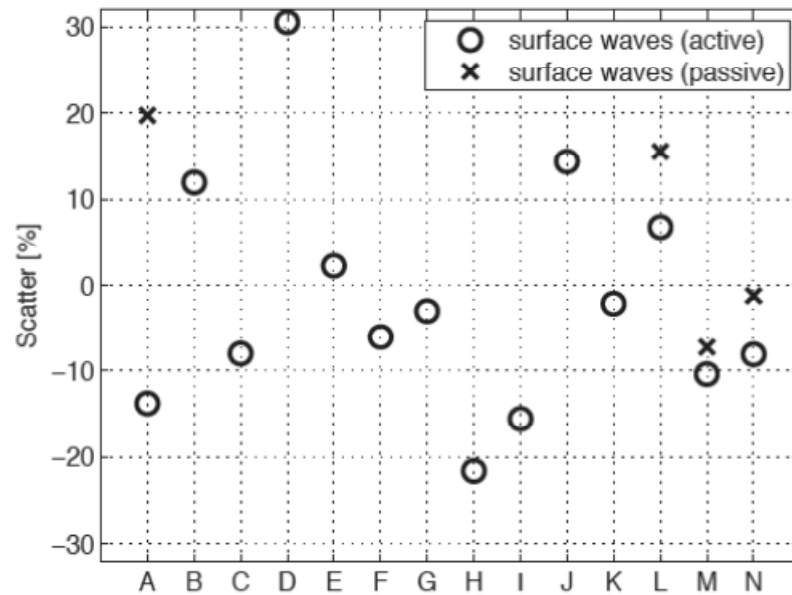
Modellazioni numeriche condotte recentemente, hanno per esempio mostrato che una stima attendibile del valore medio delle onde S fino 30 metri può essere ottenuto per una lunghezza d'onda pari a 40m



Queste linee sono relative alla relazione $V=40 f$ ovvero indica tutti i valori corrispondenti alla lunghezza d'onda di 40 m



Può essere utile confrontare la qualità delle stime di Vs30 ottenute con metodi di questo genere in rapporto a stime di riferimento (down-hole). Le simulazioni indicano che le stime di Vs30 ottenute in questo modo hanno incertezze contenute entro il 20% della misura

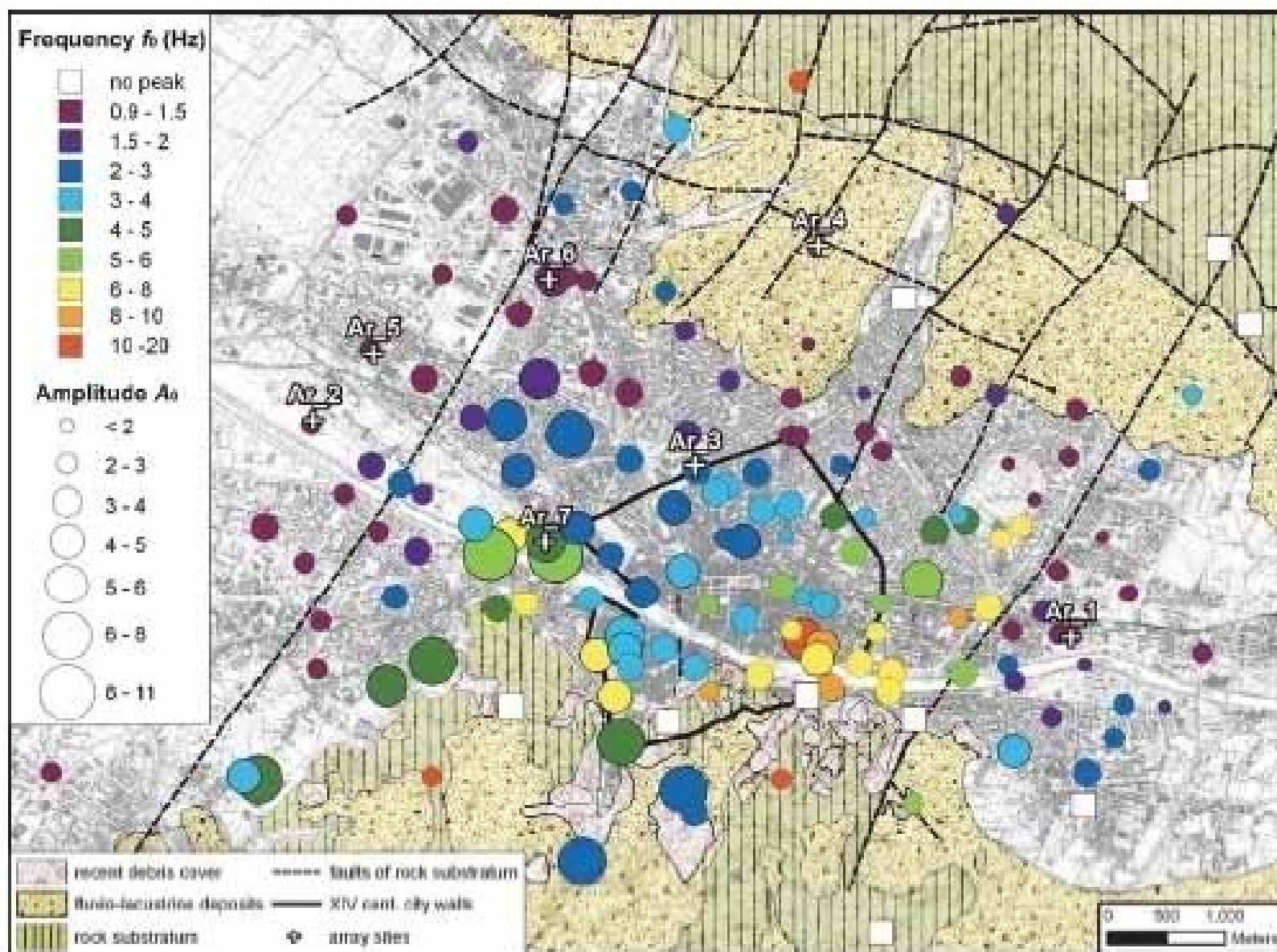


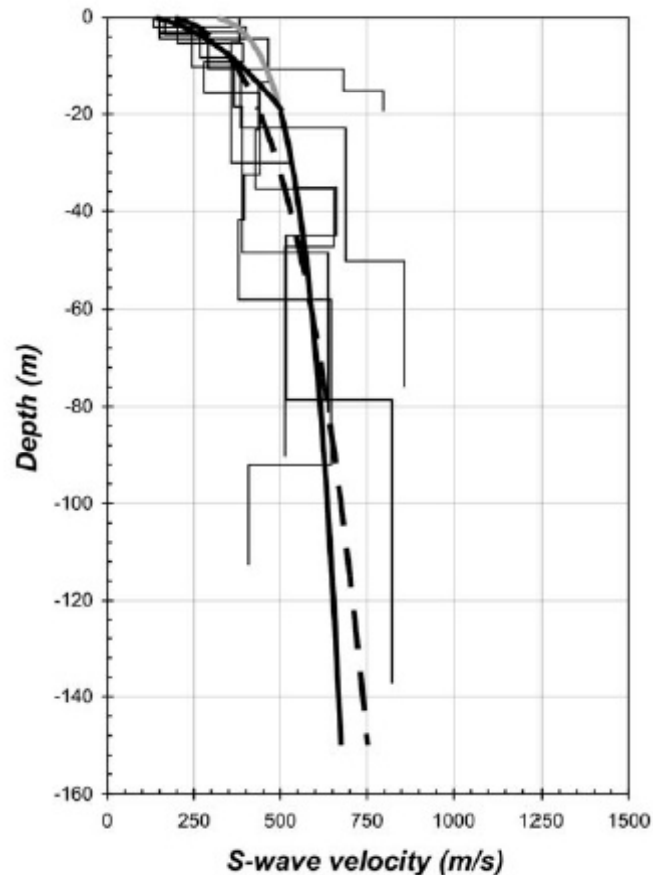
▲ **Figure 2.** The Vs(z) profile according to the dense DH survey at the site of the LANL National Ignition Facility. Redrawn with permission (see text).

Anche nel caso di misure DH si ottengono fluttuazioni dell'ordine del 20%

Questo fa pensare che tutte le stime di Vs30 (anche quelle in foro con il metodo DH) sono affette da incertezze dell'ordine del 10-20 %

Il caso di Firenze



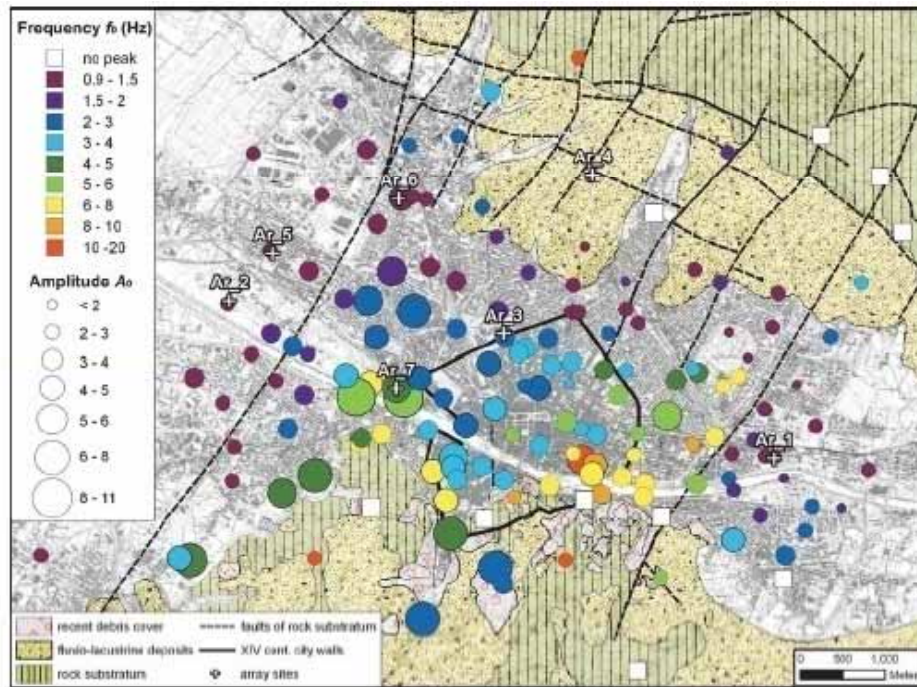


Combinando le stime di V_s ottenute e dalle curve di dispersione e altri dati disponibili sulla profondità del basamento è stato possibile ricavare una relazione fra la frequenza di risonanza e lo spessore delle coperture

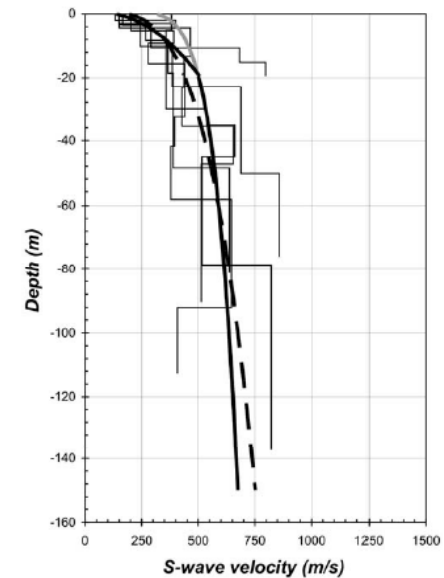
$$h = \left[\frac{138(1 - 0.43)}{4f_r} + 1 \right]^{1/(1-0.43)} - 1 \quad f_r > 4.2 \text{ Hz};$$

$$h = \left[\frac{318(1 - 0.15)}{4f_r} - 2.75 \right]^{1/(1-0.15)} - 1 \quad f_r \leq 4.2 \text{ Hz}.$$

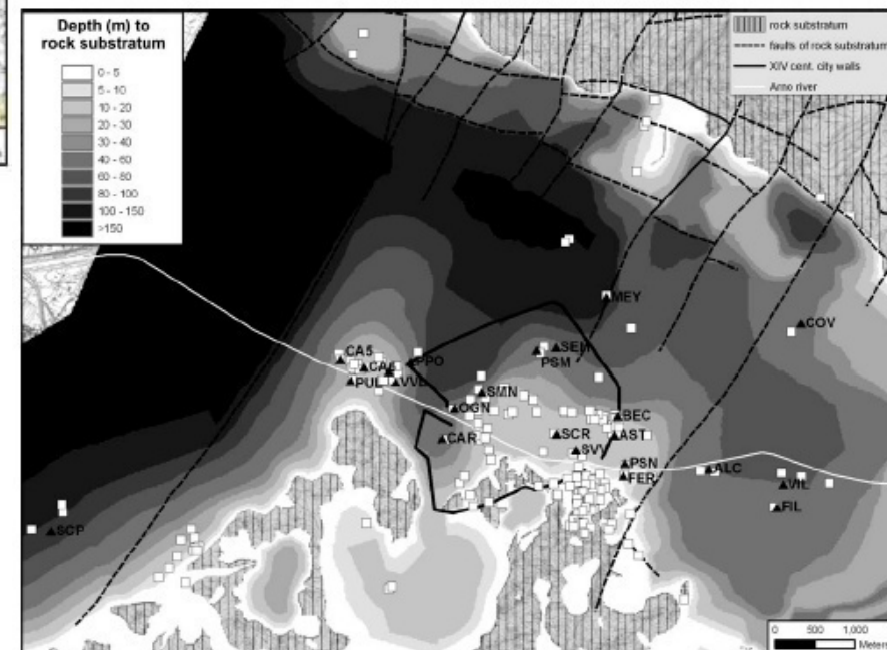
Il sottosuolo di Firenze

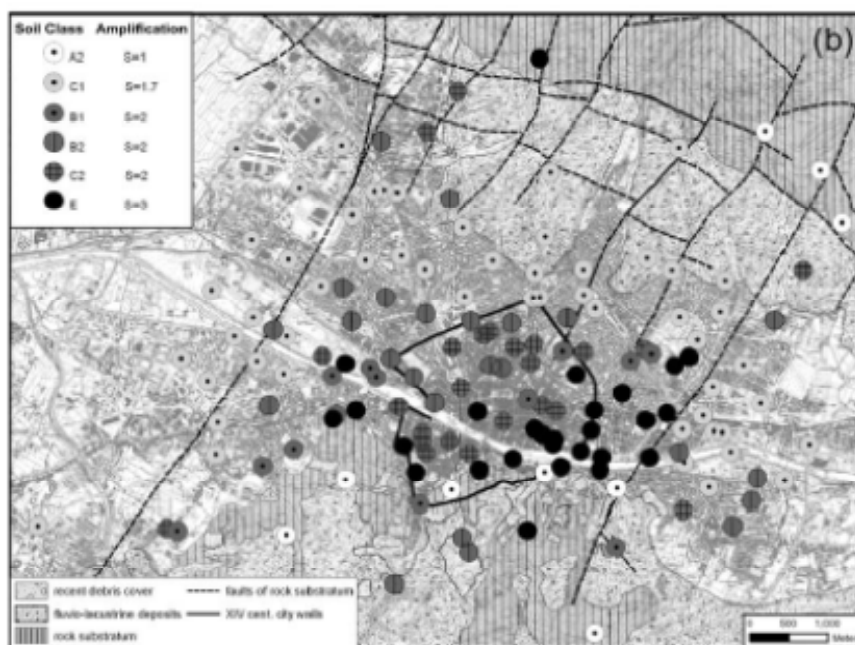
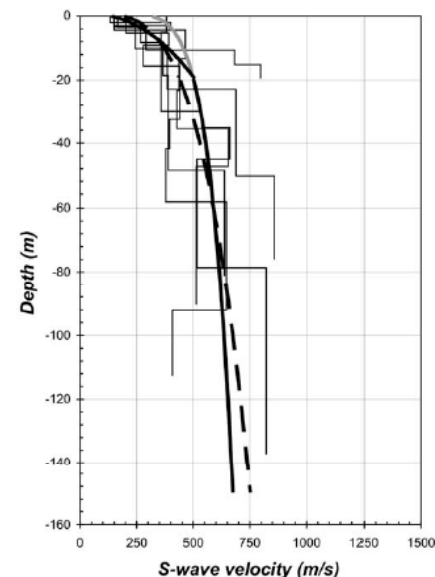
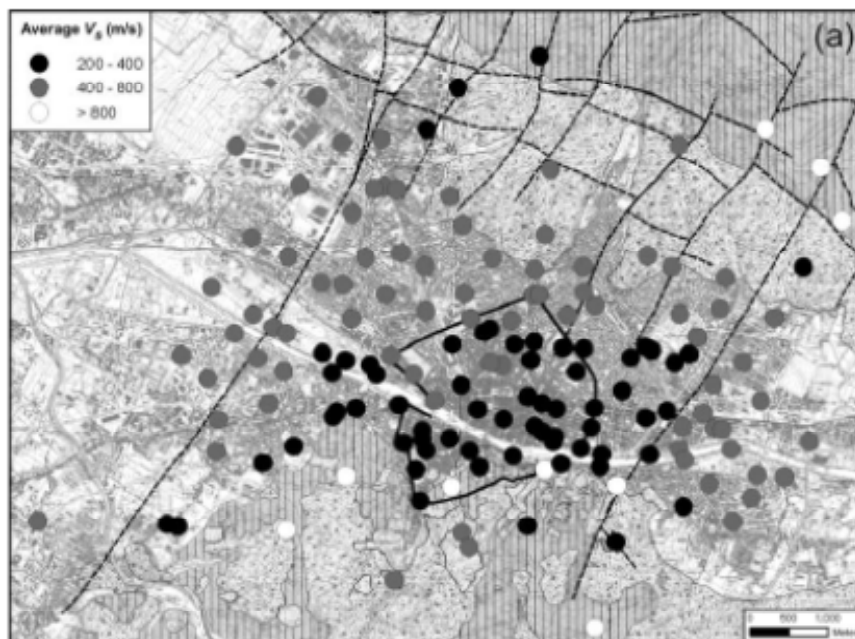


Profilo di
velocità
rappresentativo



In questo modo è stata
eseguita una valutazione
della topografia del
basamento al di sotto della
città di Firenze



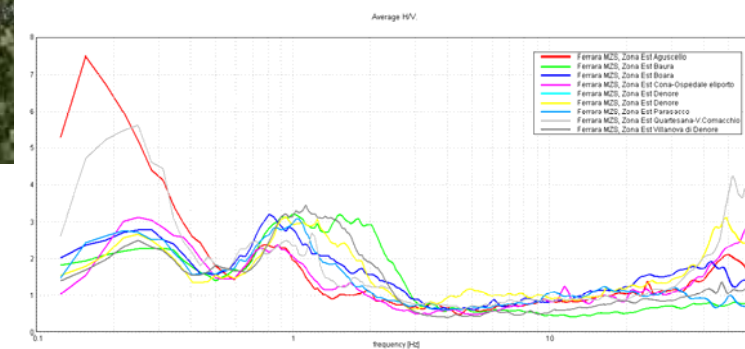
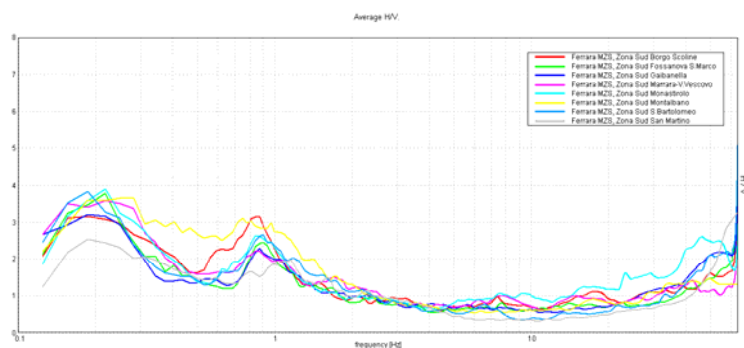
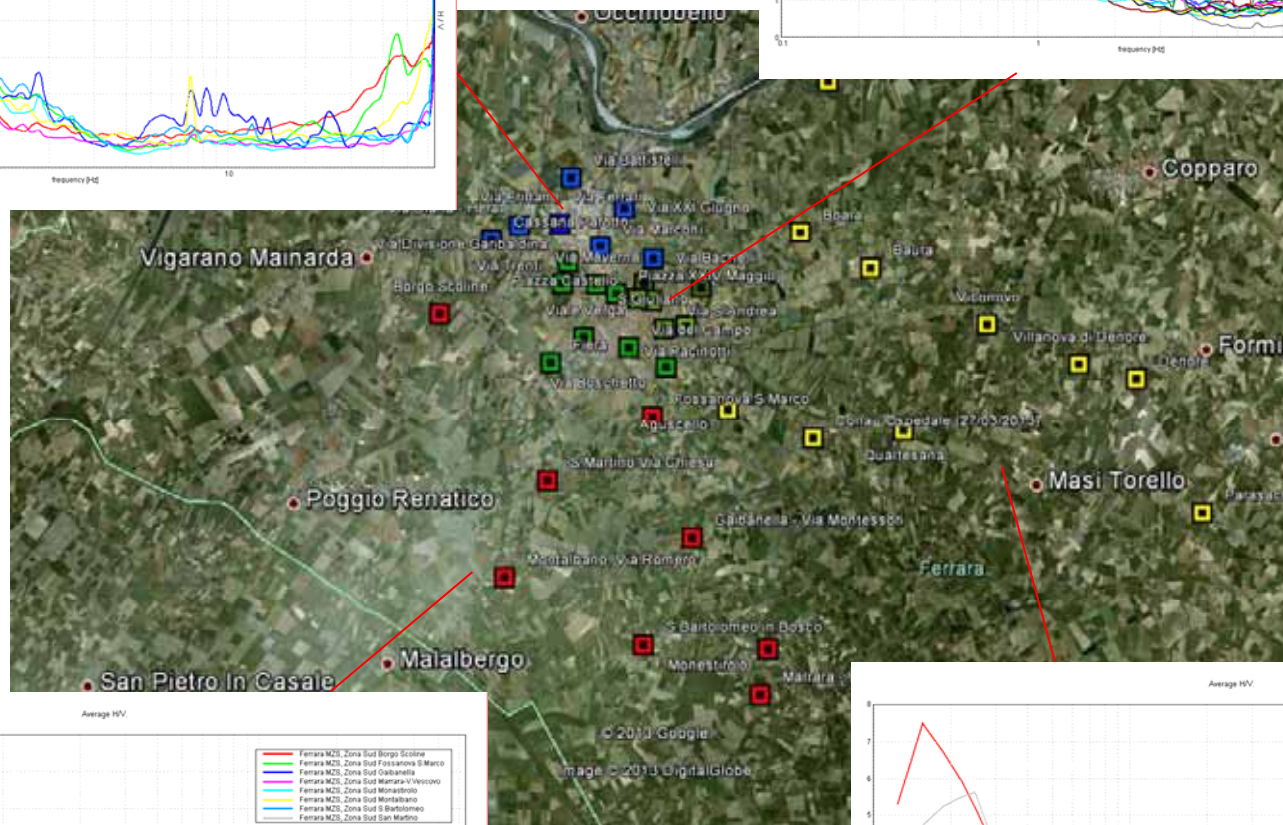
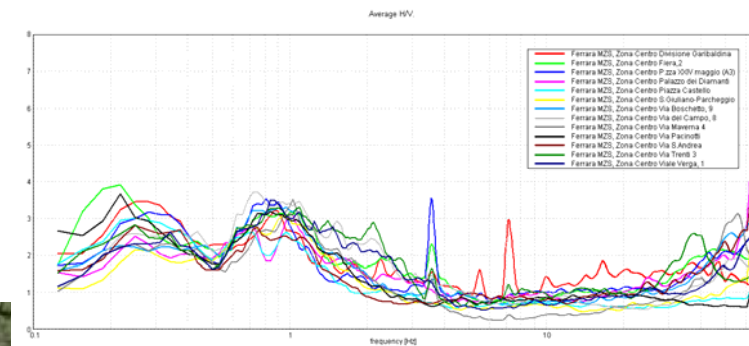
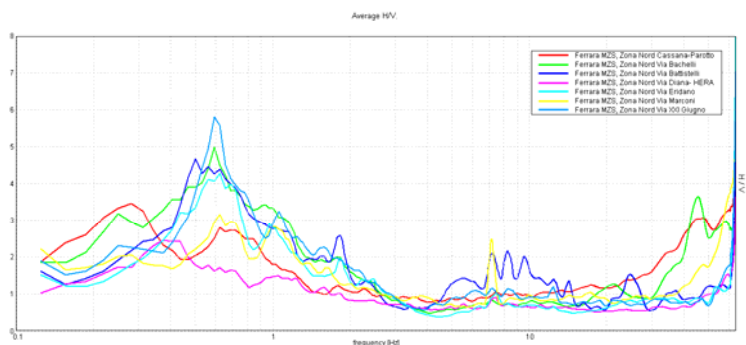


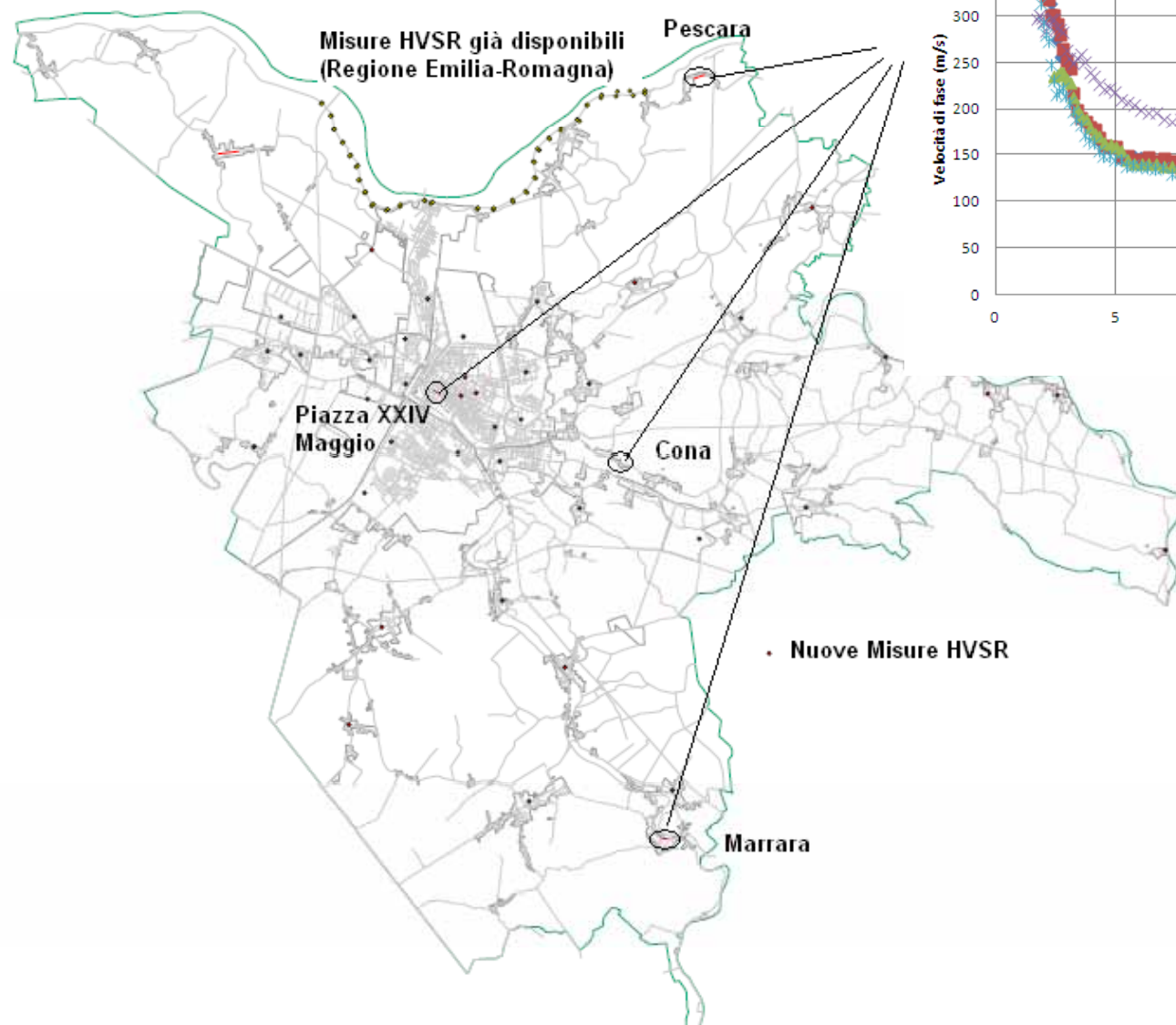
Utilizzando i profili di velocità semplificati è possibile determinare per ogni punto lo spessore della coltre sedimentaria e la velocità media fino al basamento sismico

Utilizzando queste informazioni ed un abaco proposto da Pitilakis et al, abbiamo valutato i fattori di amplificazione

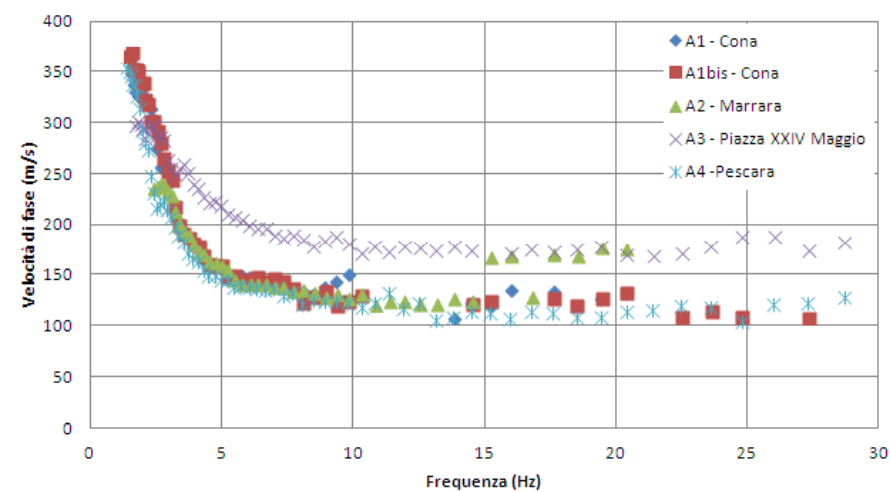


Un esempio nel Comune di Ferrara



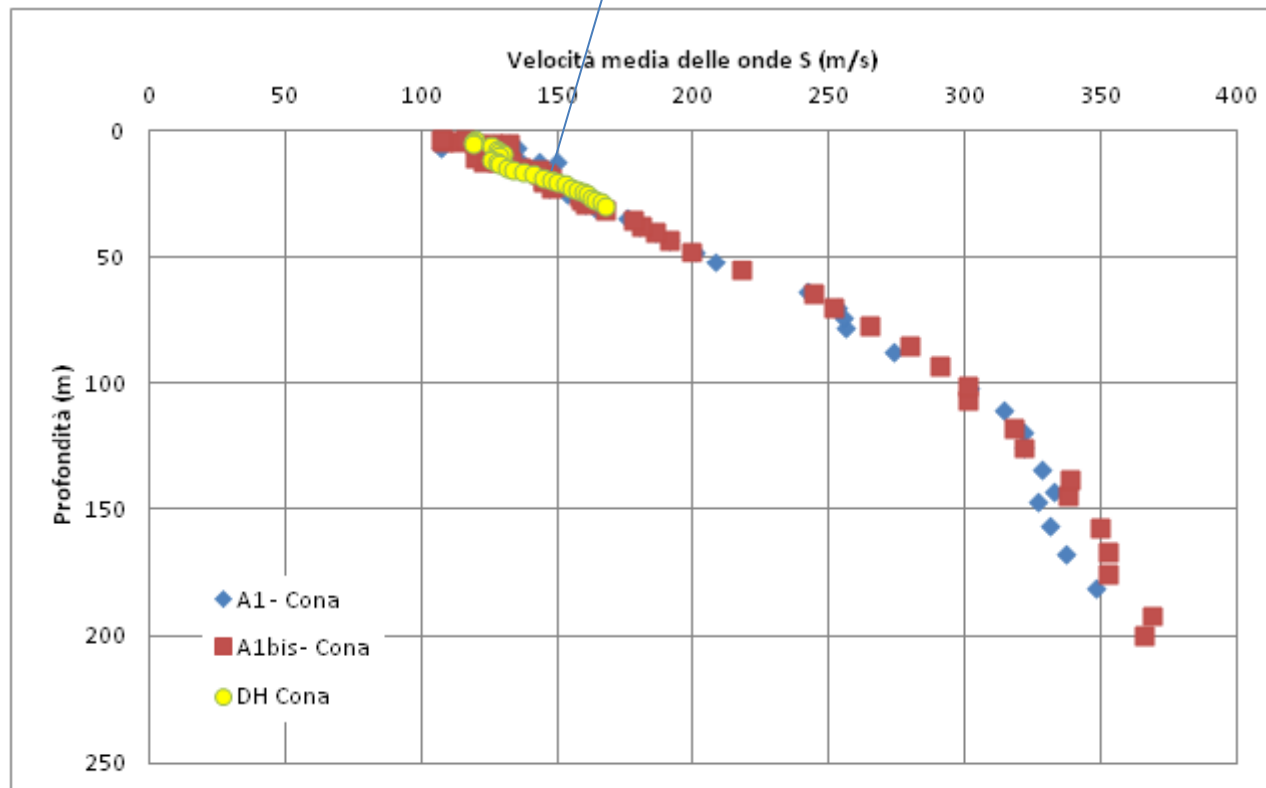


Curve di dispersione delle onde di Rayleigh



$$h \approx c \cdot \frac{V_R(v)}{v} \longrightarrow C=0.8$$

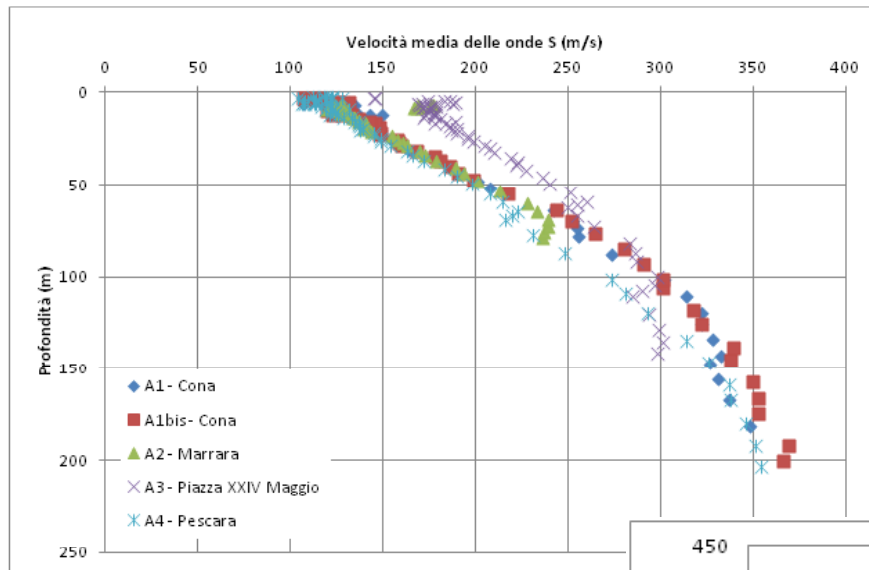
Calibrazione ottenuta considerando una misura down-hole



Legge “a potenza”

$$\bar{V}(h) \approx 50 \cdot h^{0.38}$$

Interpretazione semi-qualitativa delle curve di dispersione (C=0.8)

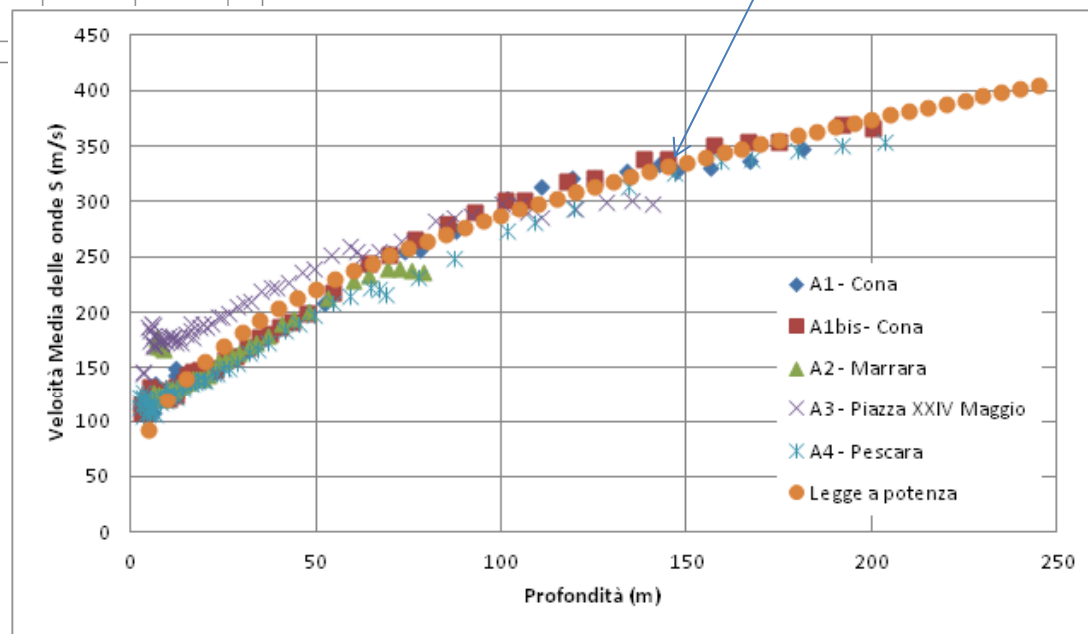


Legge “a potenza”

$$\bar{V}(h) \approx 50 \cdot h^{0.38}$$

Risulta possibile stimare approssimativamente la profondità della prima interfaccia risonante (0.7-1Hz) che risulta dell'ordine di 70-100 m

$$H \approx \left[\frac{V_0(1-x)}{4f_r} + 1 \right]^{\frac{1}{1-x}} - 1$$



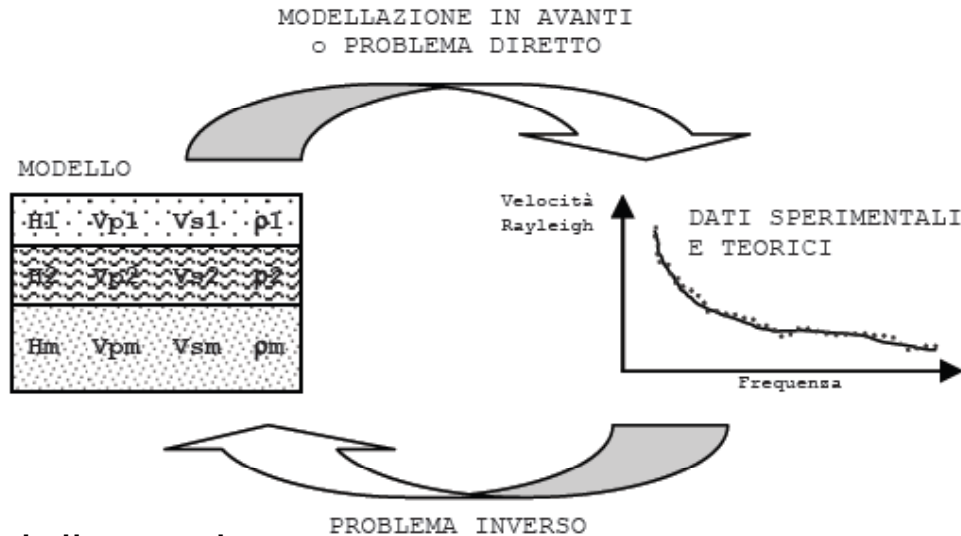


Il Livello quantitativo

Vengono usate procedure di inversione numerica basate sull'applicazione di metodi capaci di gestire l'estrema non linearità del problema: non esiste di fatto una relazione semplice fra gli osservabili e le caratteristiche meccaniche del sottosuolo

Le procedure hanno tutte la stessa struttura

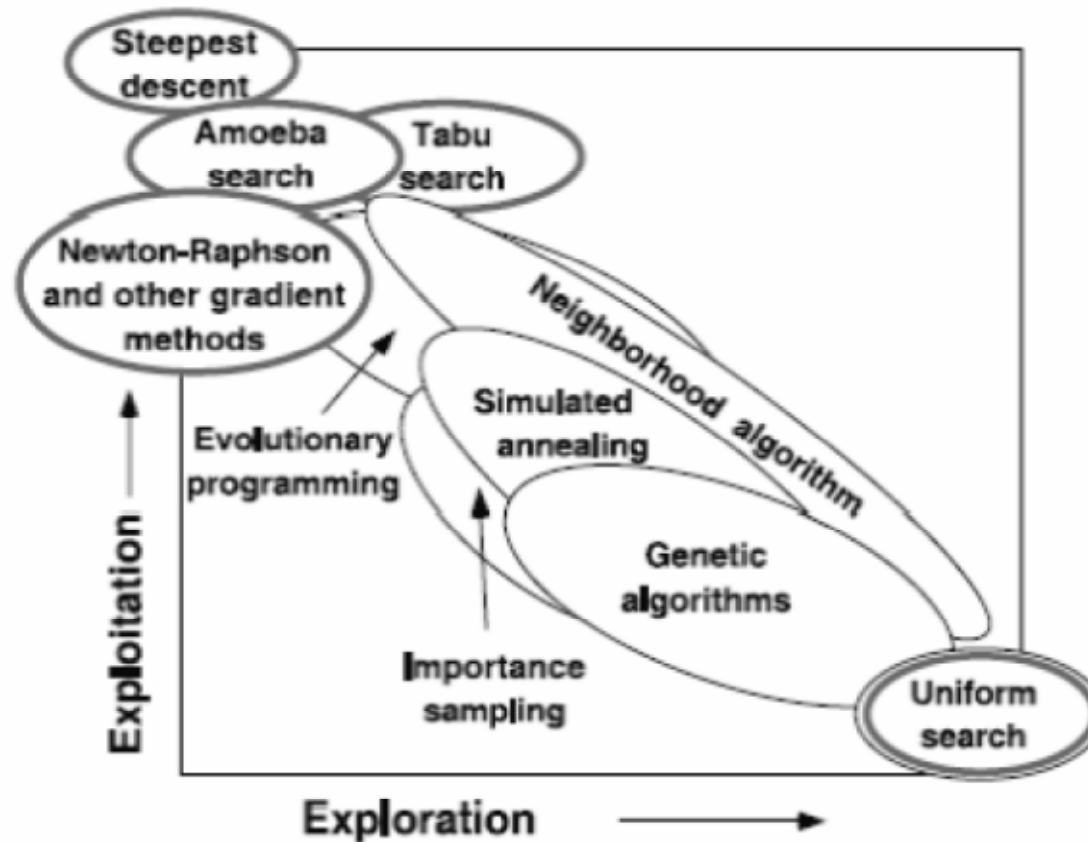
1. Dispongono di una procedura numerica per la determinazione del profilo teorico della curva di dispersione a partire da una determinata configurazione stratigrafica (risolvono il problema diretto). Il problema diretto permette anche di individuare i parametri più significativi. Va osservato che nel caso delle onde superficiali, la relazione fra configurazione stratigrafica e curva di dispersione è molto complessa matematicamente ed è applicabile solo per configurazioni piano-parallele
2. Costruiscono un parametro di confronto fra le “previsioni” dedotte risolvendo il problema diretto per una data configurazione ipotetica con le osservazioni (costruiscono una funzione di disaccordo o misfit)
3. Dispongono di una procedura per cambiare le caratteristiche del modello in funzione delle discrepanze fra le previsioni e le osservazioni (Inversione)



Una volta scelti i parametri di maggiore interesse si sviluppa una procedura iterativa

1. Ipotizzo il modello
2. Risolvo il problema diretto
3. Calcolo il valore della funzione di disaccordo (o di perdita) L^2 che misura il disaccordo fra il modello e le osservazioni
4. Modifico le caratteristiche del modello e torno al punto 2

Un metodo è tanto più veloce quanto meno volte deve compiere l'iterazione e, soprattutto, quante meno volte deve risolvere il problema diretto



Le differenze tra i diversi approcci riguardano fondamentalmente quando grandi sono le variazioni ammesse per i modelli di prova (esplorazione-exploration) e quanto le variazioni imposte al modello sfruttano il precedente confronto fra previsioni e osservazioni (sfruttamento-exploitation)

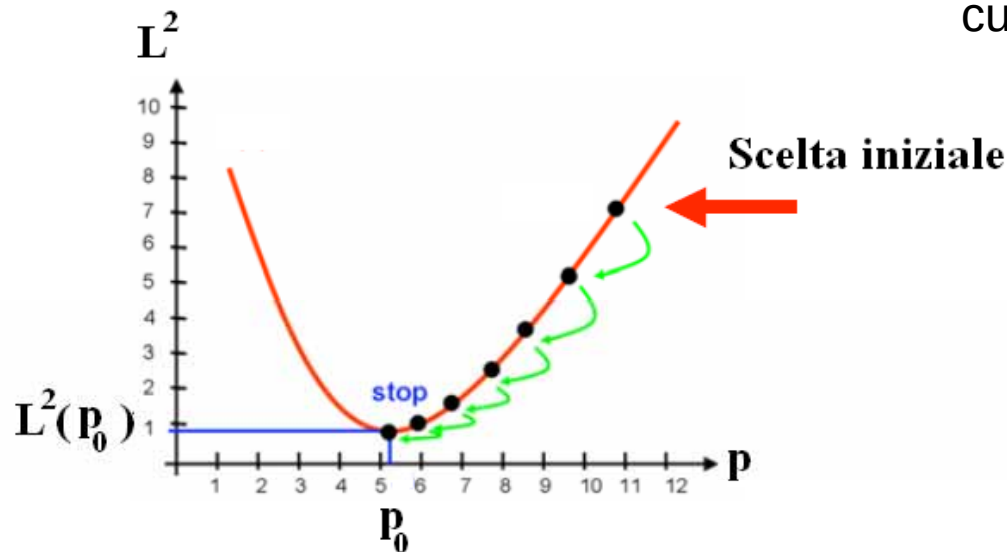


I metodi “a gradiente” sono quelli che sfruttano maggiormente il precedente confronto fra previsioni e osservazioni ma esplorano poco lo spazio delle possibili soluzioni

In questo caso, un dato paramero (per esempio la Vs in un dato strato) viene variato modificandolo in modo da ridurre il valore della funzione di perdita. In particolare, scrivo variazione in funzione di un parametro h (positivo) che dipende da come varia la funzione di perdita L^2

$$\Delta p = -h \frac{dL^2}{dp} \quad p' = p - h \frac{dL^2}{dp}$$

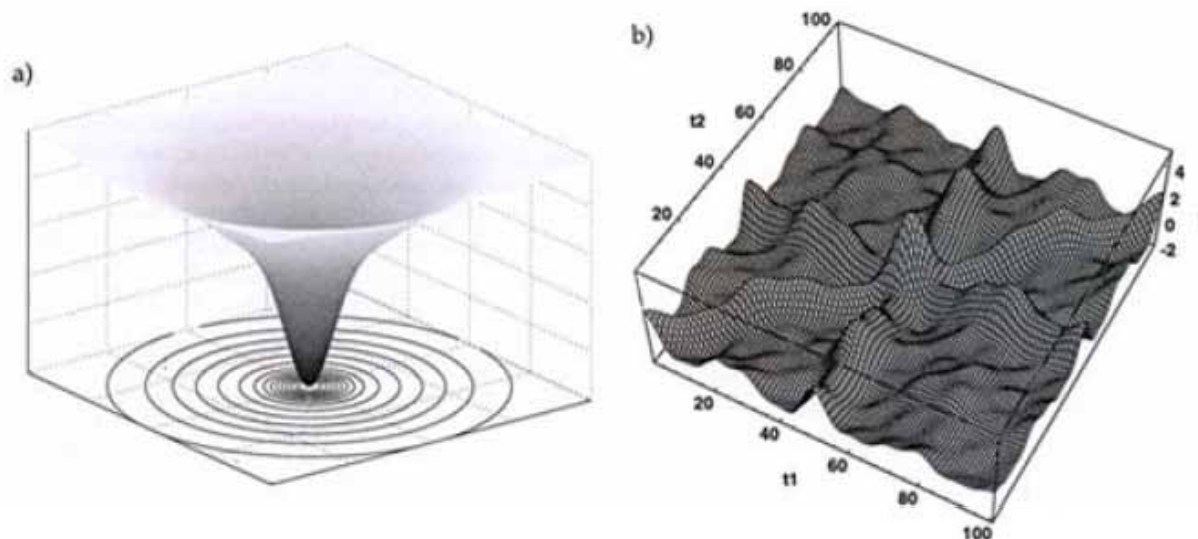
Come si vede, la variazione è tanto maggiore quanto maggiore è la derivata della funzione di disaccordo (quanto maggiore è la pendenza della curva della funzione di disaccordo)



La cosa procede iterativamente aggiornando progressivamente il valore di p fino a raggiungere il minimo (la derivata diventa nulla e l'aggiornamento finisce)

In realtà questi sistemi sono i più veloci (fanno poche iterazioni e variano di poco i parametri iniziali).

Però, se la scelta iniziale è troppo lontana dalla soluzione “corretta” non c’è nessuna garanzia che il gruppo di parametri scelto sia quello che corrisponde al minimo “assoluto” della funzione di perdita. Di fatto la forma della funzione di misfit è ignota (per calcolarla dovremmo variare i parametri in tutti i modi possibili) In assenza di questi controlli, la ricerca del minimo potrebbe trovarsi “intrappolato” in un minimo relativo e da lì non uscire più





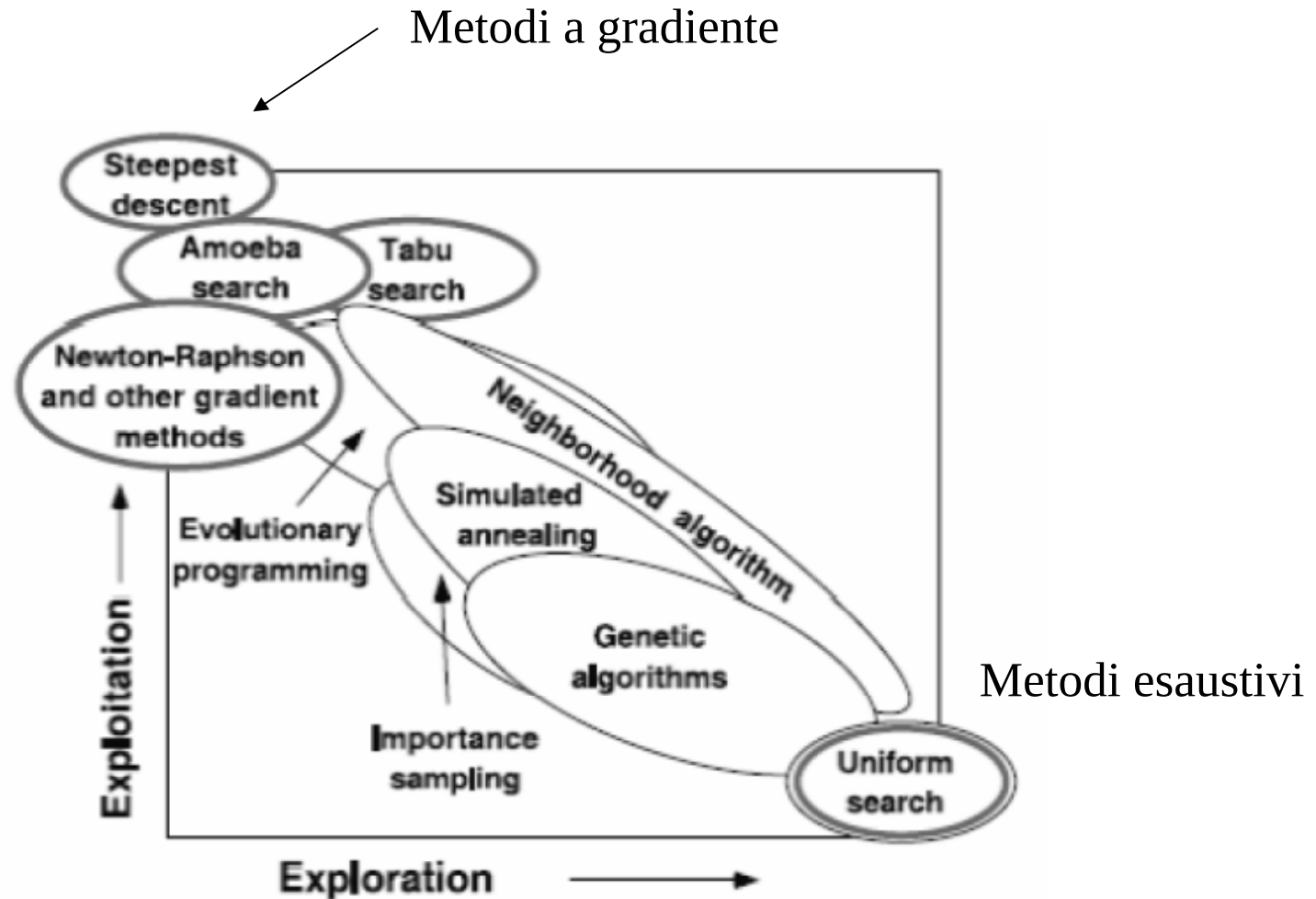
All'estremo opposto ci sono metodi che sfruttano al massimo l'esplorazione e non imparano nulla dall'esperienza (basso sfruttamento)

Il metodo più “stupido” è quello che esplora l'intero spazio possibile delle variazioni dei parametri: di fatto si ricostruisce l'intera superficie della funzione di disaccordo

In realtà, i parametri possono esser molti. Per una stratigrafia a tre strati servono almeno 6 parametri per strato (V_p , V_s , Spessore, densità, smorzamento in P, smorzamento in S) ovvero 18 parametri in tutto

Esplorare tutte le possibili combinazioni è semplicemente fuori dalla portata di qualunque procedura di questo tipo

In generale devono fare moltissime iterazioni la maggior parte delle quali è del tutto inutile (almeno per ridurre il disaccordo o misfit)



Naturalmente sono state proposte procedure di tipo intermedio: per esempio quella degli Algoritmi Genetici



Si tratta di una procedura che “mima” l’evoluzione naturale

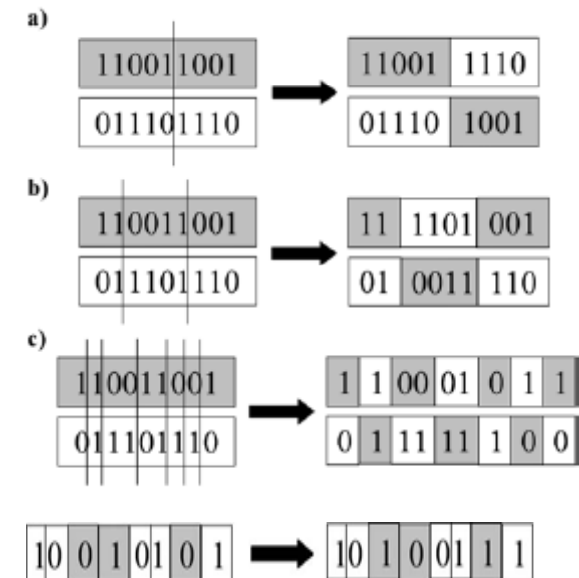
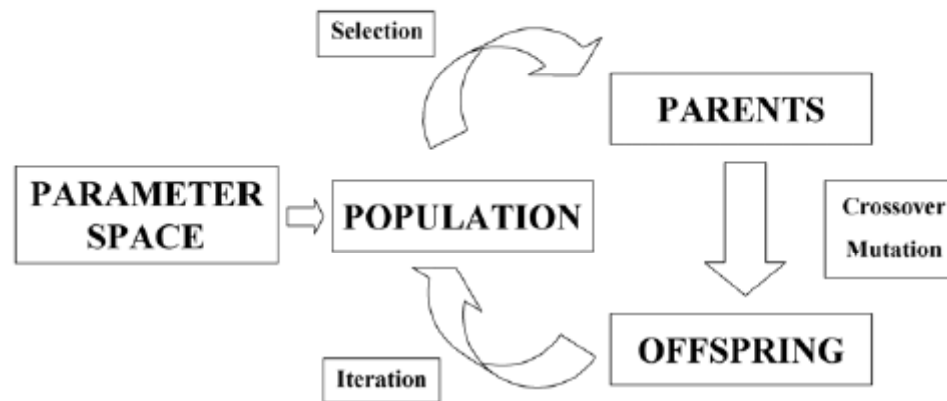
In pratica

1. viene generata casualmente una “popolazione” di modelli possibili (elemento esplorativo)
2. Per ciascun modello (individuo) viene calcolato il valore di misfit
3. Viene costruita una nuova popolazione selezionando i soli individui che hanno raggiunto il minimo misfit nella prima popolazione (elite-selection) e “combinando” gli altri casualmente (cross-over) ma in modo da favorire quelli con migliore adattamento alle curve sperimentali. Inoltre alcuni individui della nuova popolazione sono variati (di poco) casualmente (mutazione). Questo è l’elemento di “sfruttamento” delle informazioni pregresse
4. Si ritorna alla fase 2

In questa procedura, (che aspira a simulare la selezione naturale) ogni popolazione è “più adatta” rispetto all’obiettivo della ricerca

Algoritmi Genetici

Metodo di ottimizzazione basato su concetti di tipo evolutivo
(selezione, mutazione e crossover)

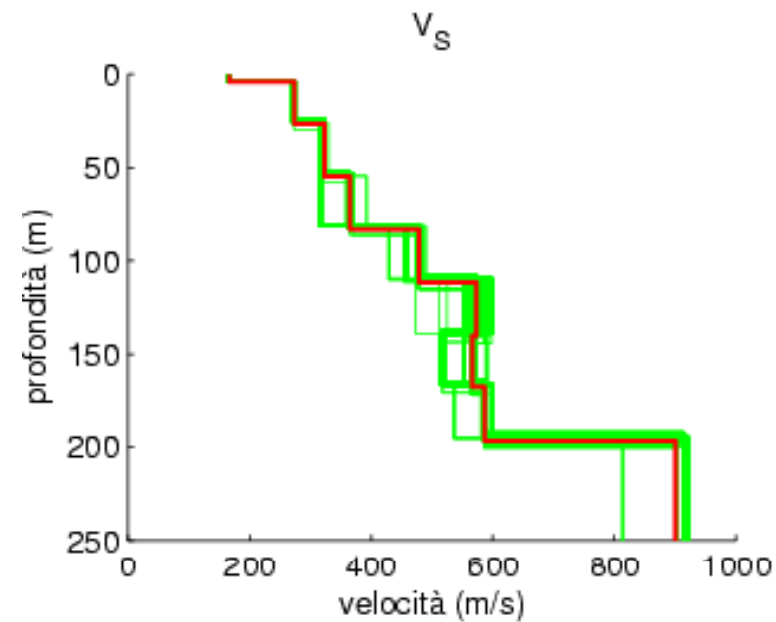
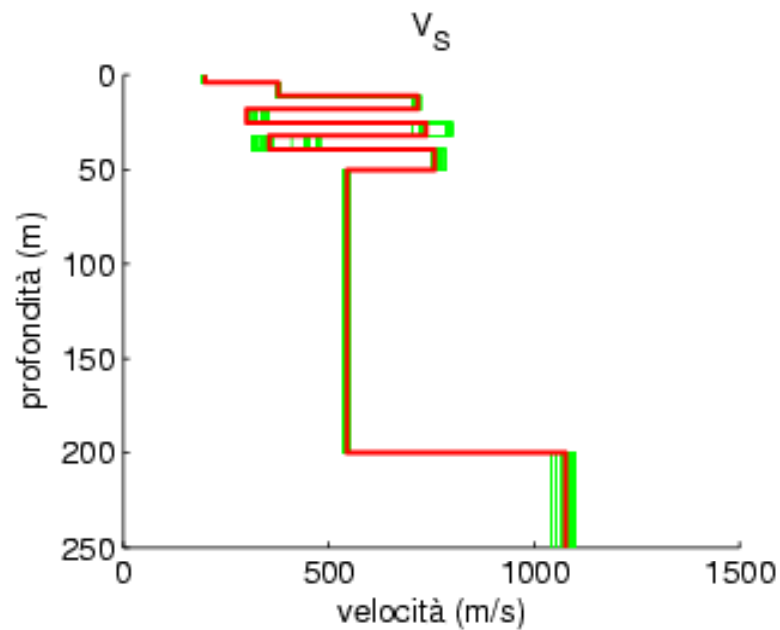
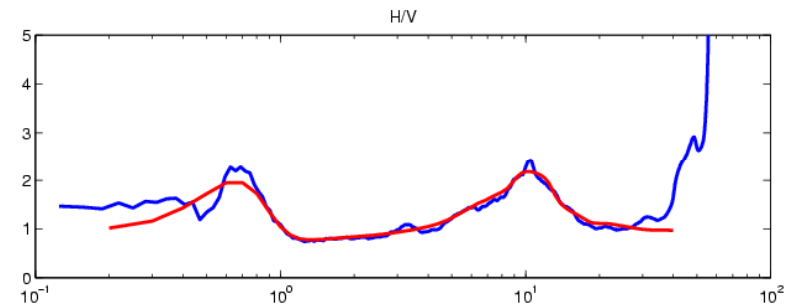
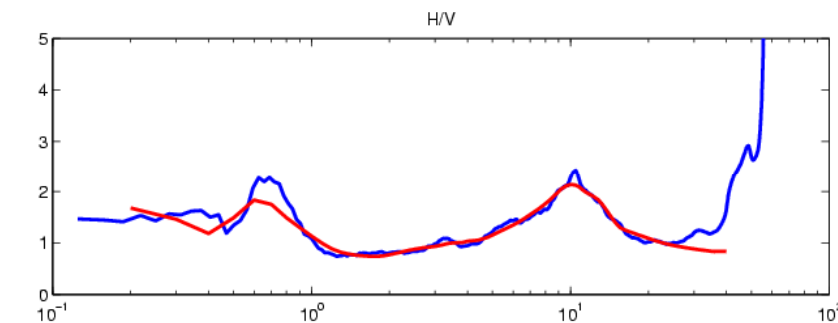


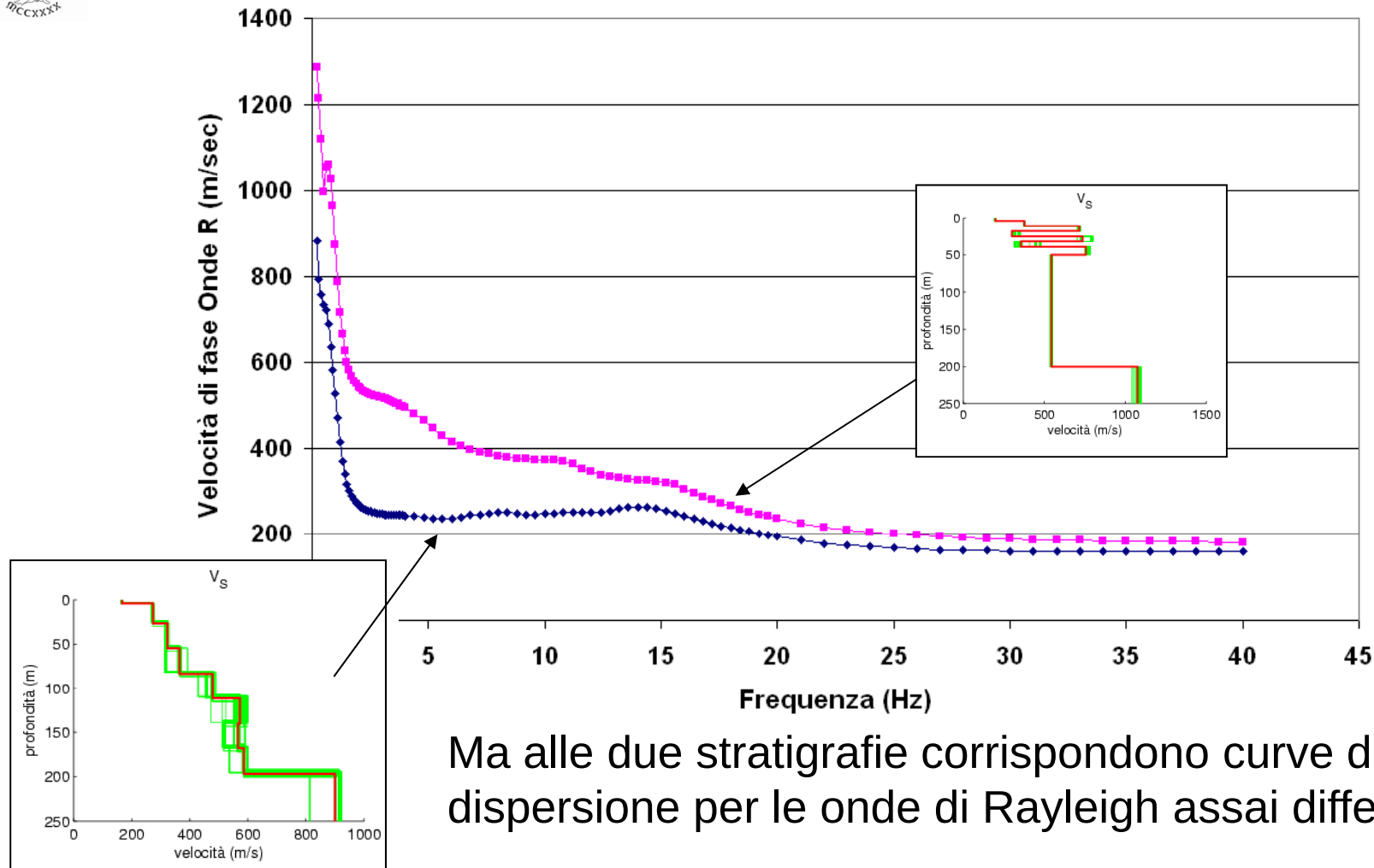
- Tecnica esplorativa dello spazio dei modelli
- Risoluzione di problemi non lineari
- Non vincolata da un modello iniziale



Posso applicare una delle strategie di inversione alla curva di HVSR

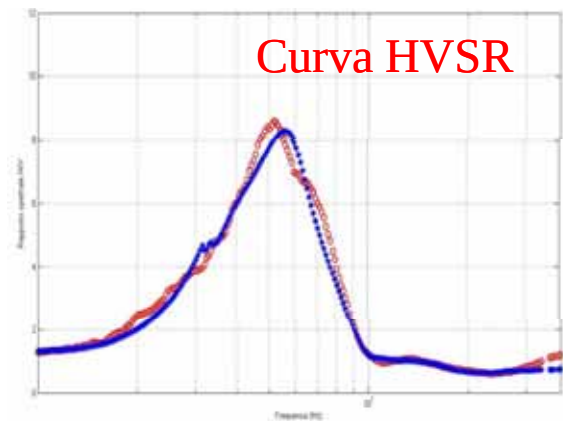
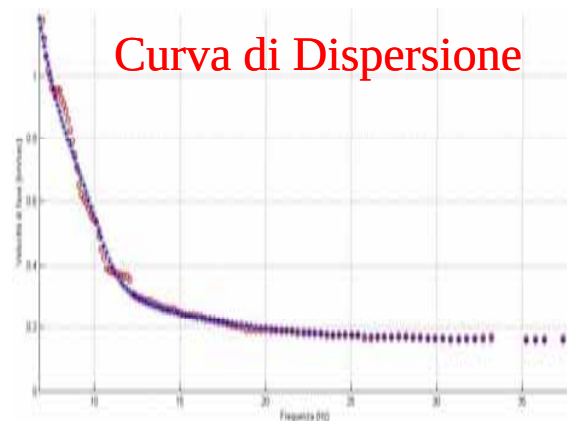
Va comunque ricordato che il legame fra la struttura del sottosuolo (comunque intesa a strati piano-paralleli) e curve osservate è fortemente non univoco: molte configurazioni producono la stessa curva osservata



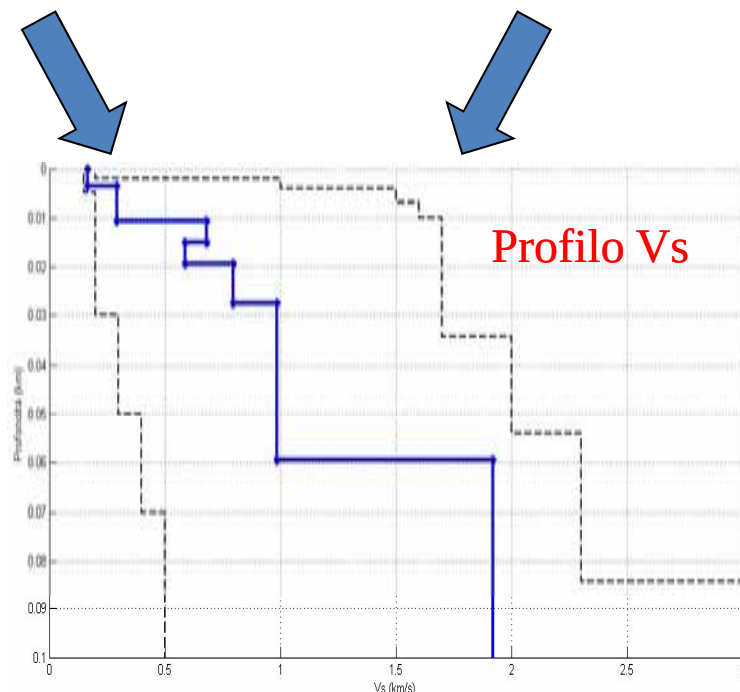


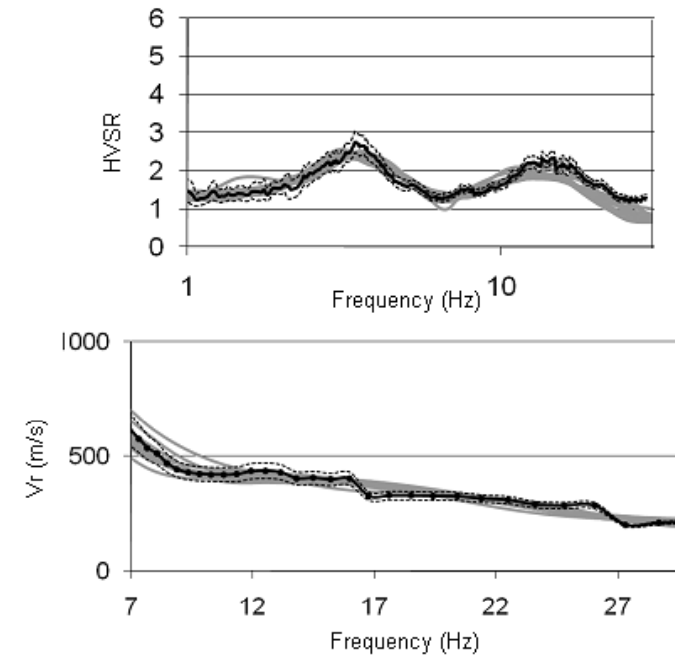
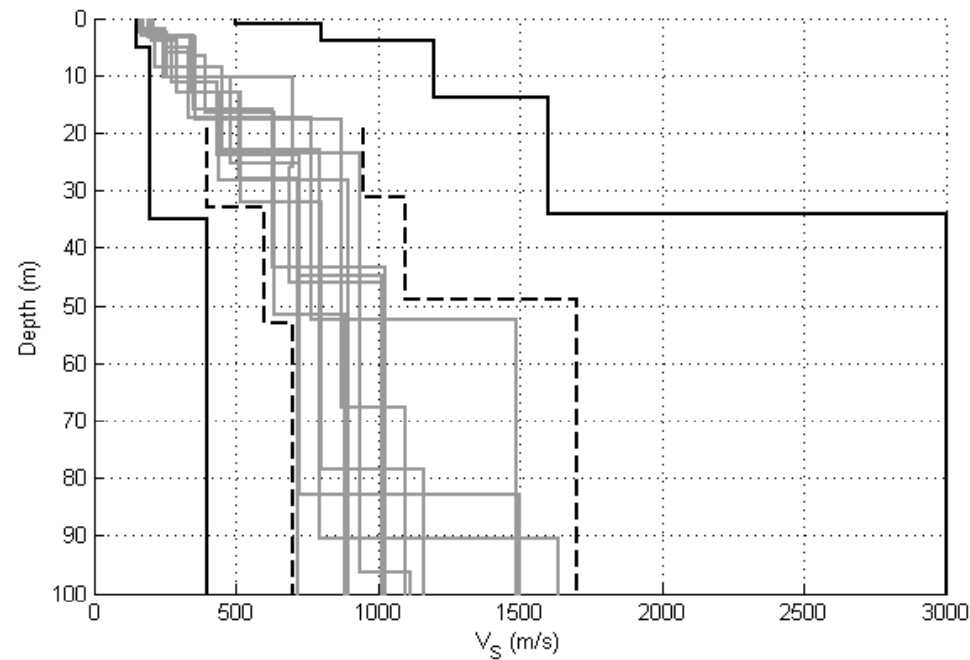
Ma alle due stratigrafie corrispondono curve di dispersione per le onde di Rayleigh assai differenti

E' possibile quindi vincolare maggiormente il profilo di velocità locale considerando congiuntamente curve di dispersione e curve HVSR



Attualmente, la ricerca è dedicata allo sviluppo di procedure numeriche di inversione congiunta





Esempio di inversione congiunta con il metodo degli algoritmi genetici: la non univocità della soluzione si manifesta nella molteplicità di soluzioni ugualmente compatibili con le osservazioni



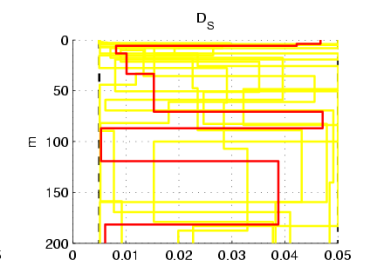
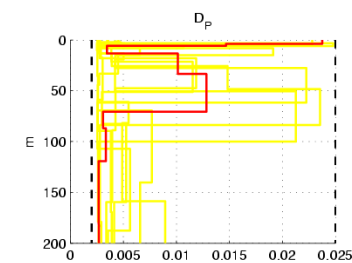
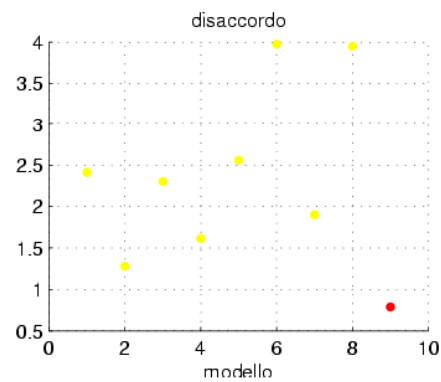
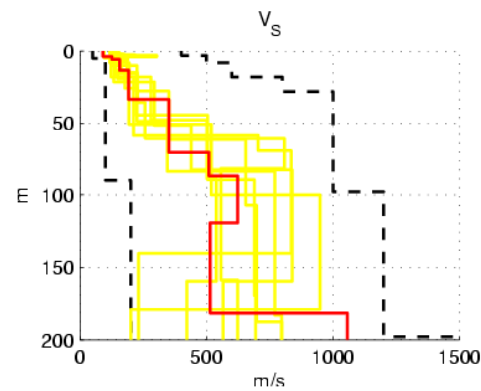
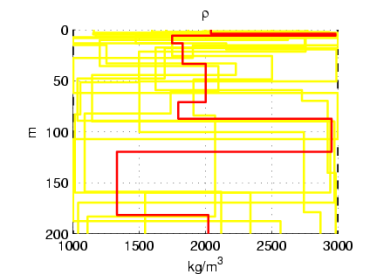
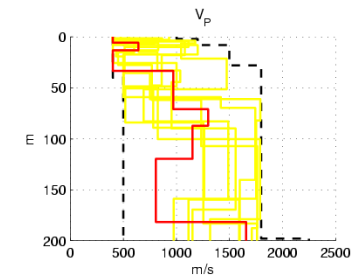
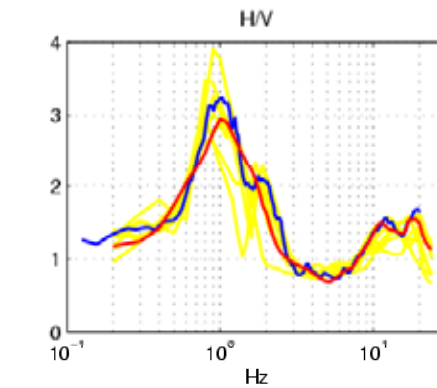
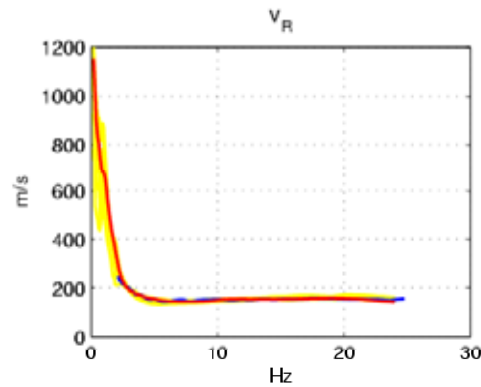
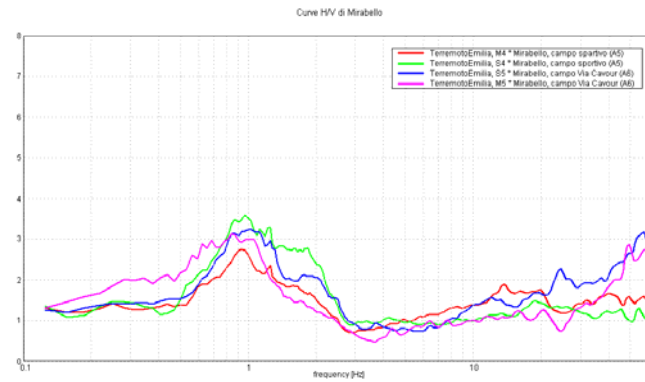
Bisogna mettere in evidenza che anche considerando forme di inversione congiunta, esiste sempre una molteplicità di situazioni compatibili con le osservazioni (non univocità): questa mancanza di univocità può essere ridotta (magari a partire da considerazioni geologiche o utilizzando congiuntamente osservabili differenti) ma non eliminata

Il problema diretto è particolarmente complesso dal punto di vista fisico e i tempi di calcolo necessari per la stima dei diversi parametri possono diventare proibitivi (soprattutto quando si ricorre a metodi molto esplorativi): questo rende necessaria l'adozione di modelli semplici (eterogeneità unidimensionali, modelli con sole onde superficiali) che limitano il valore del modello trovato

Infine, se si escludono procedure di ricerca esaustiva, non è possibile escludere forme di "intrappolamento" nella fase di esplorazione delle soluzioni. Per questo motivo è utile ripetere la procedura di inversione a partire da nuove generazioni delle stratigrafie iniziali (nel caso delle inversioni con Algoritmi Genetici) o utilizzando piccole variazioni dei parametri



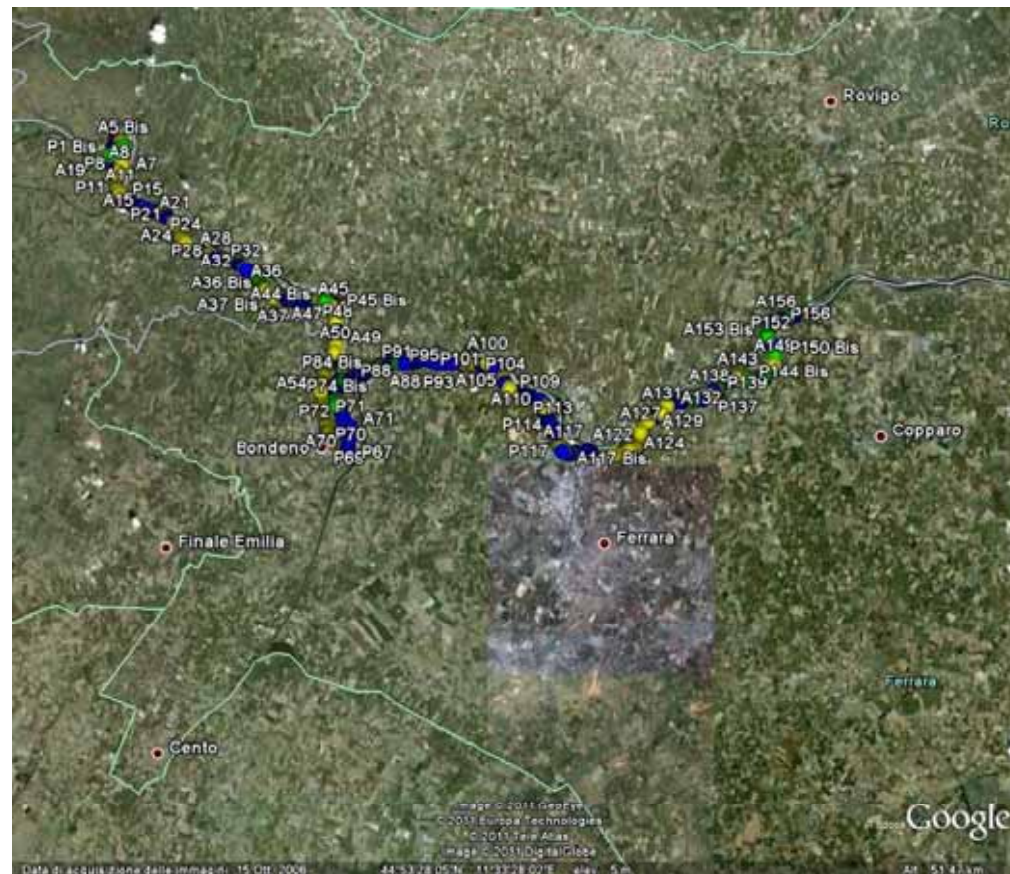
Comune di Mirabello (FE)



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)

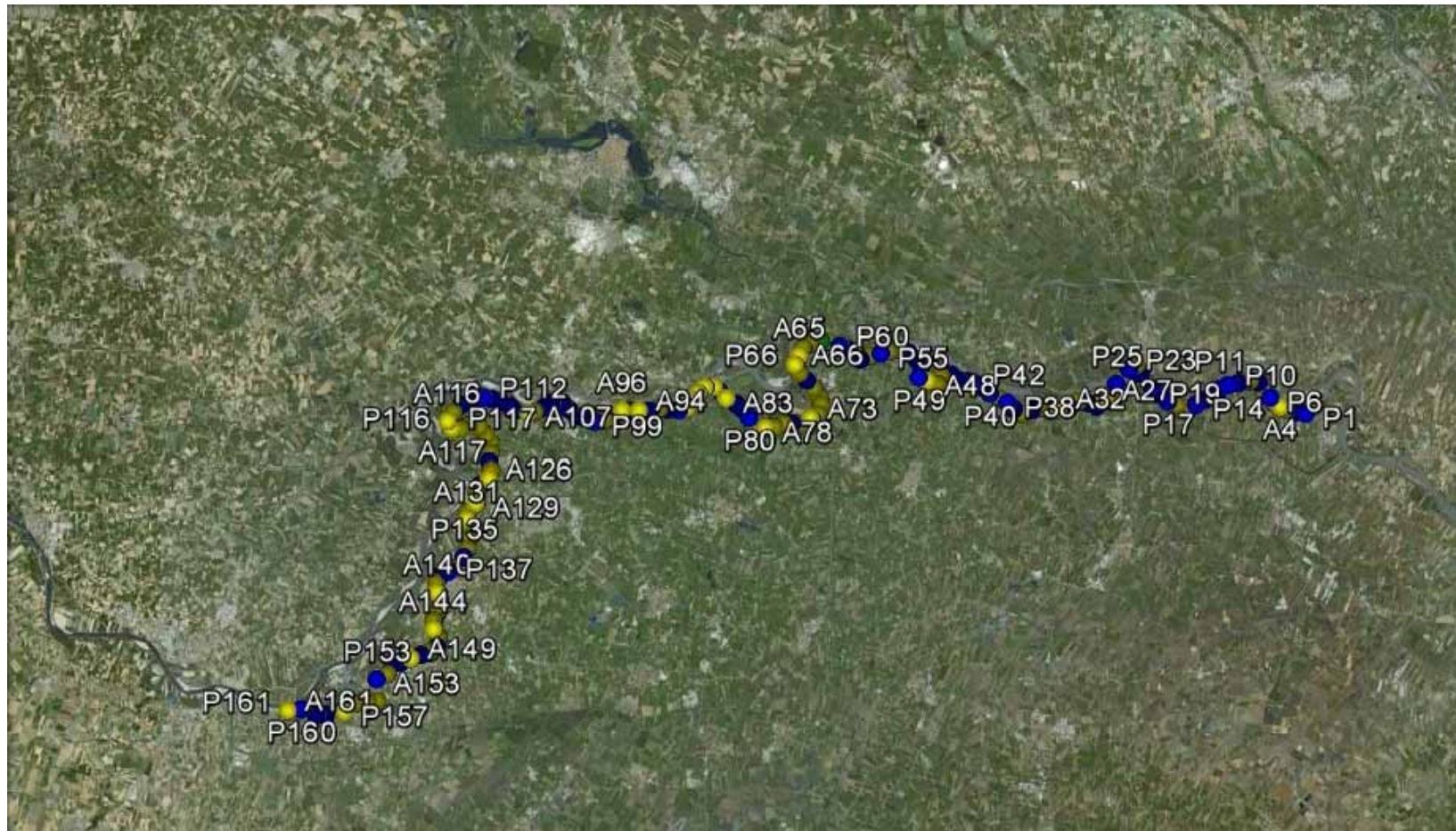
Per ogni posizione sono state eseguite almeno due misure da 20 minuti: una sull'argine ed una ai piedi di quest'ultimo





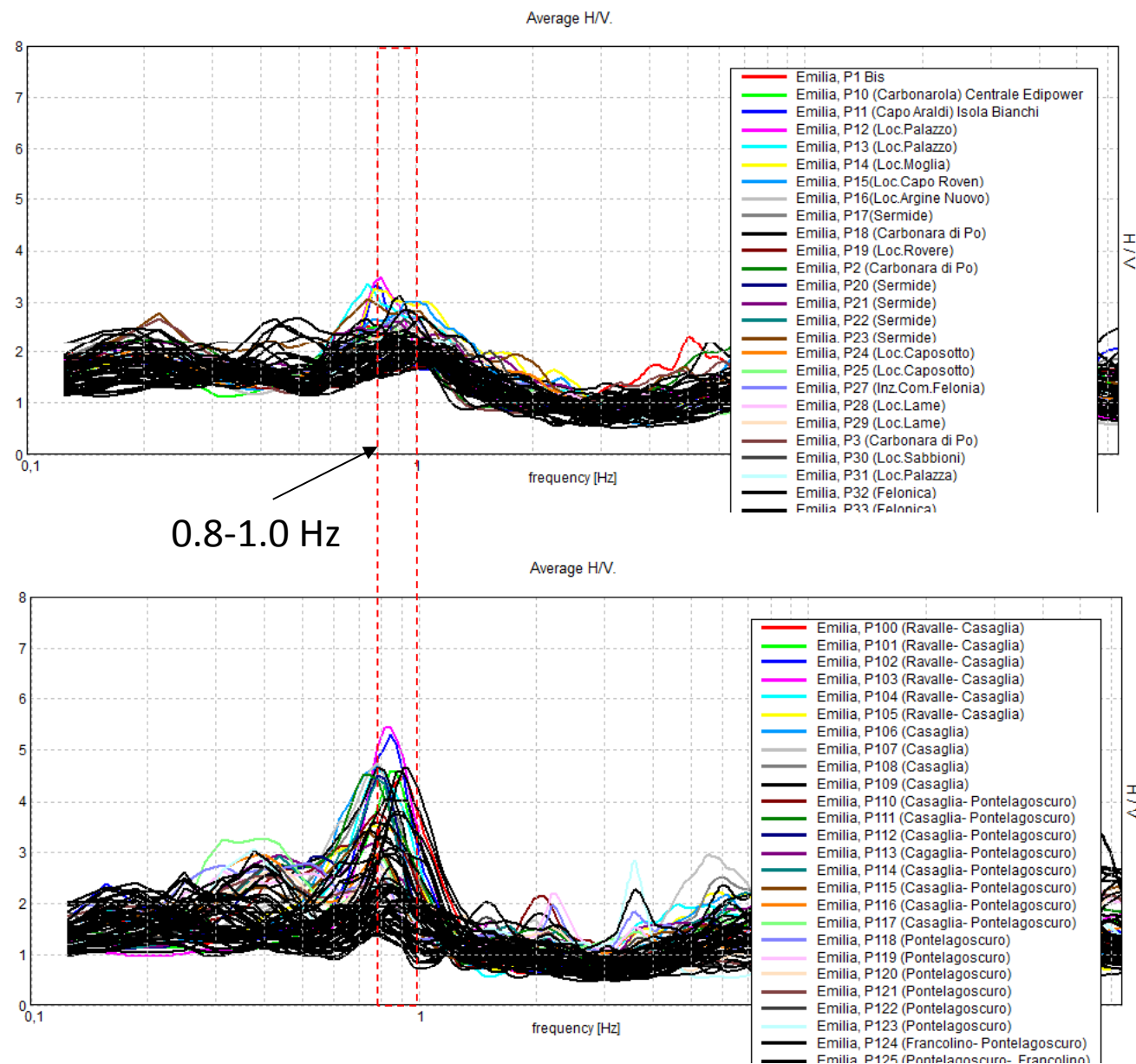
In una seconda fase sono stati considerati complessivamente altri 161 punti di misura HVSR su vibrazioni ambientali fra Carbonara Po (RE) e Boretto (RE)

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

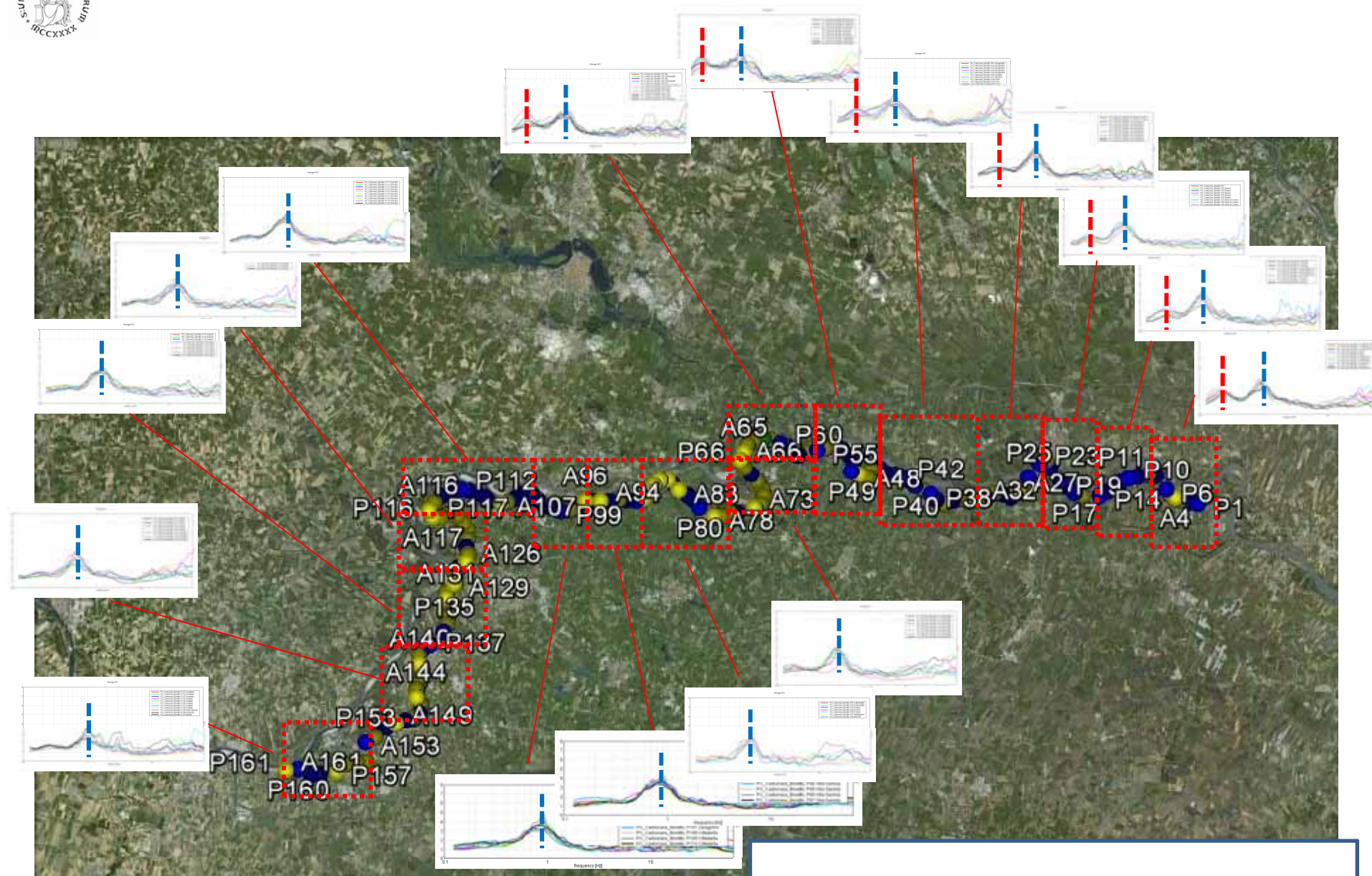




In tutte le misure è presente almeno un massimo della curva HVSR nell'intervallo 0.8-1.0 Hz

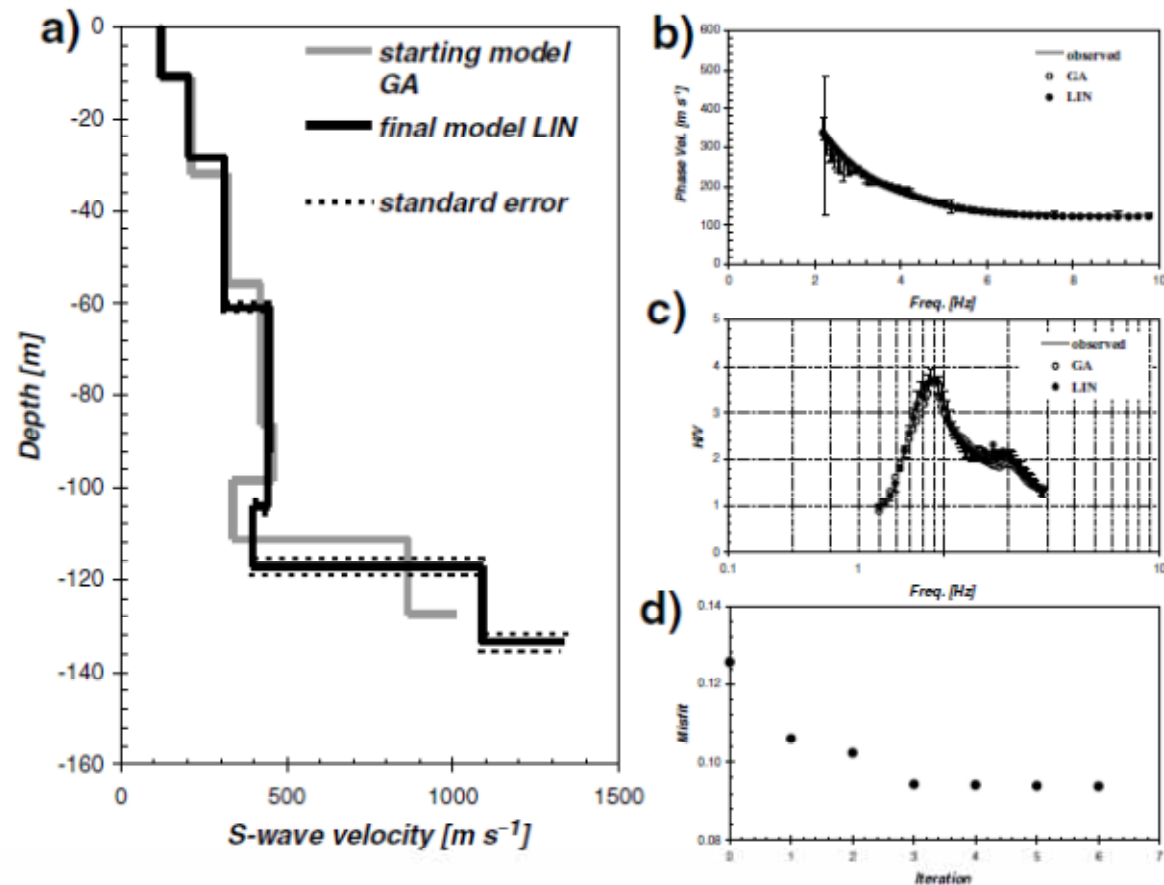






Tratta Carbonara Po - Boretto

Sono stati anche eseguite misure su antenna sismica in corrispondenza di alcune misure down-hole disponibili (Casaglia, 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 eventualmente disponibili al sito

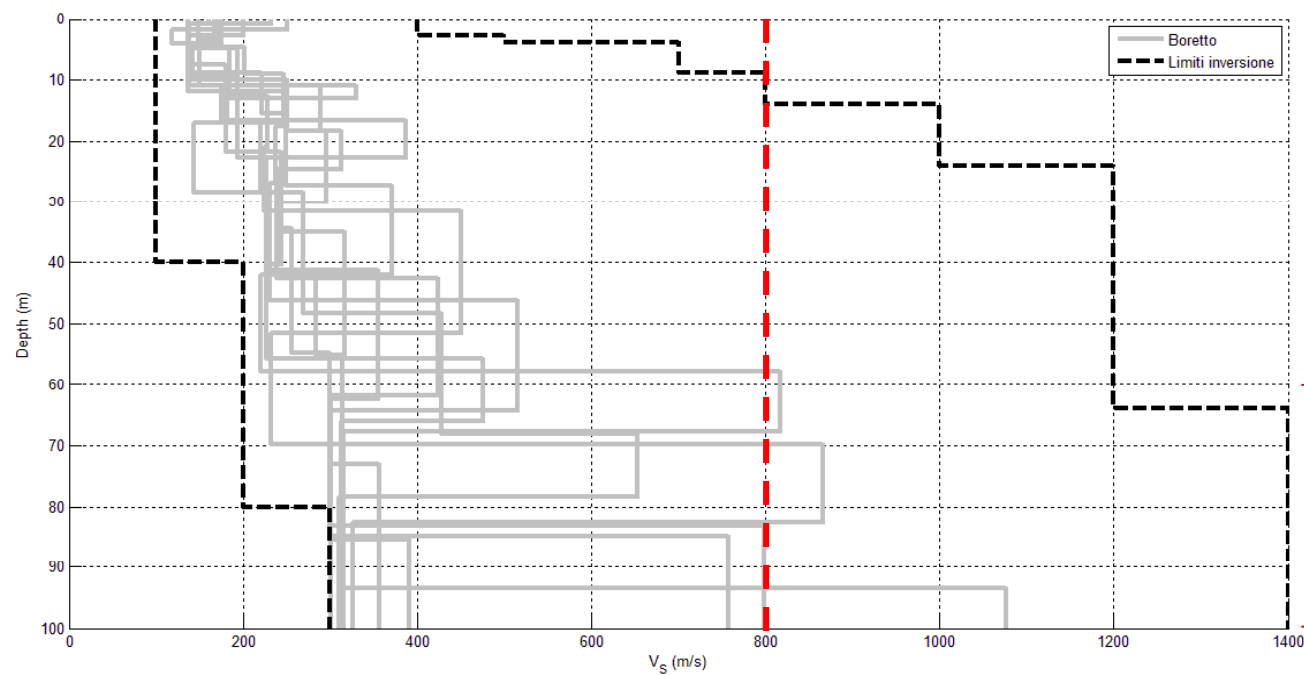
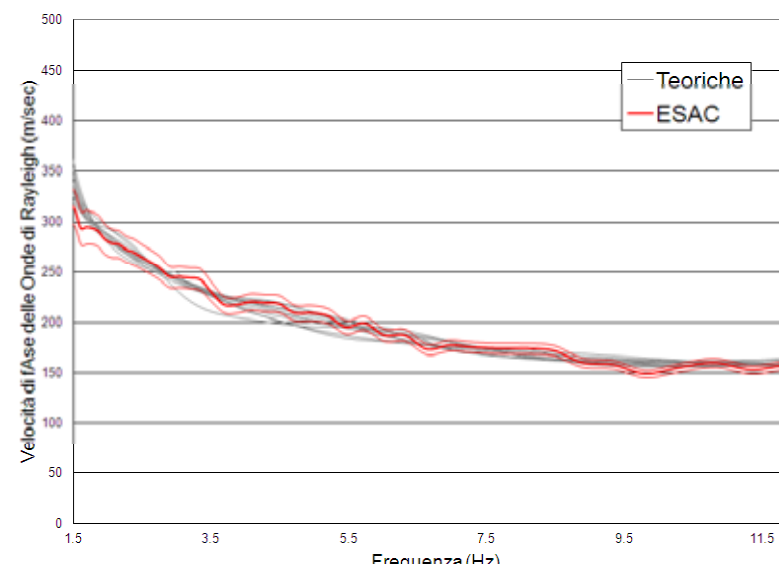
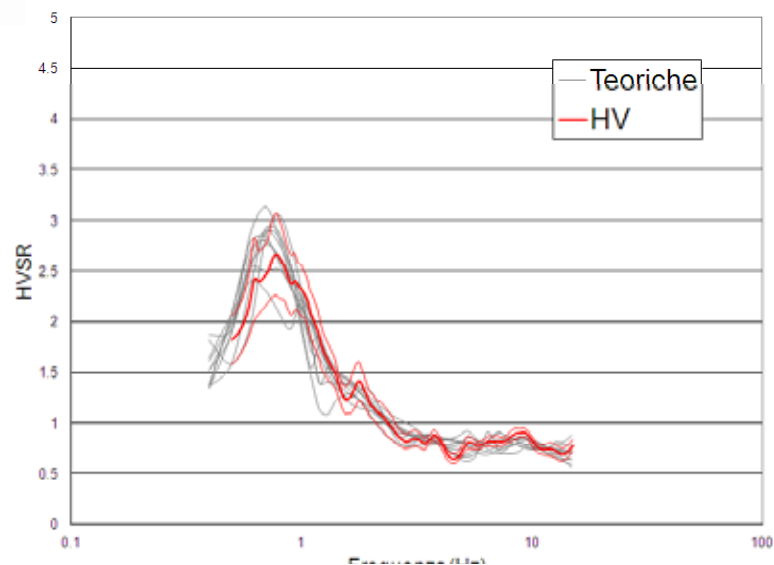
Casaglia



Boretto (RE)



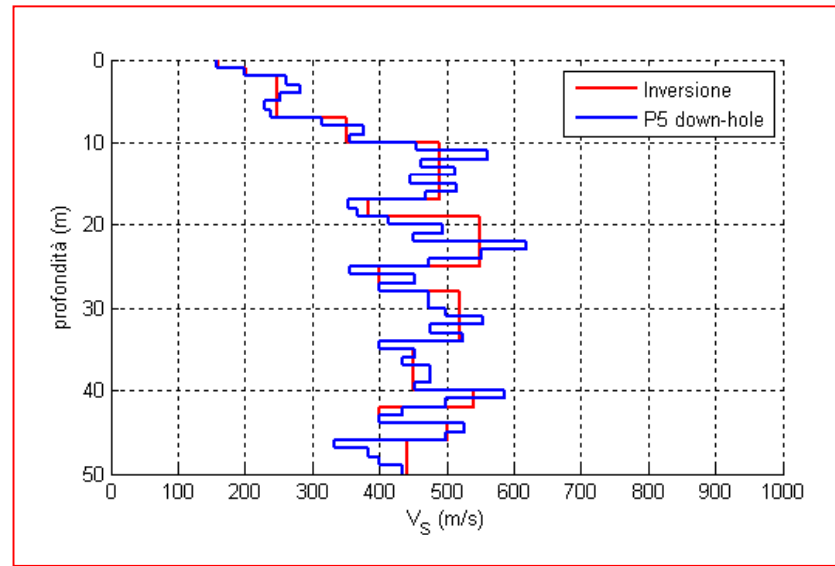
Risultati Inversione Boretto



Possibile
Bedrock



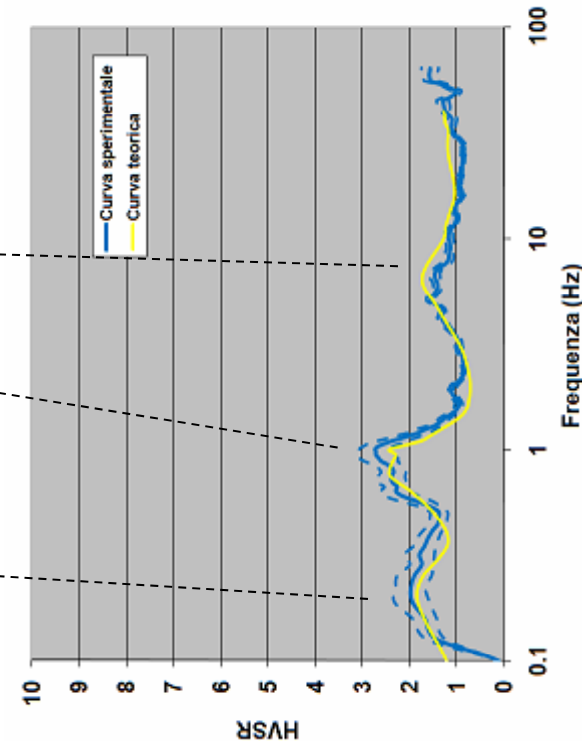
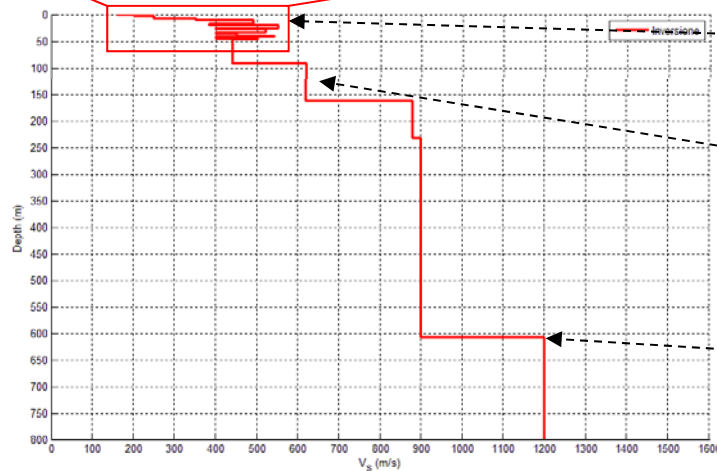
Sono state anche eseguite inversioni delle curve di dispersione effettiva utilizzando dati down-hole come vincolo



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

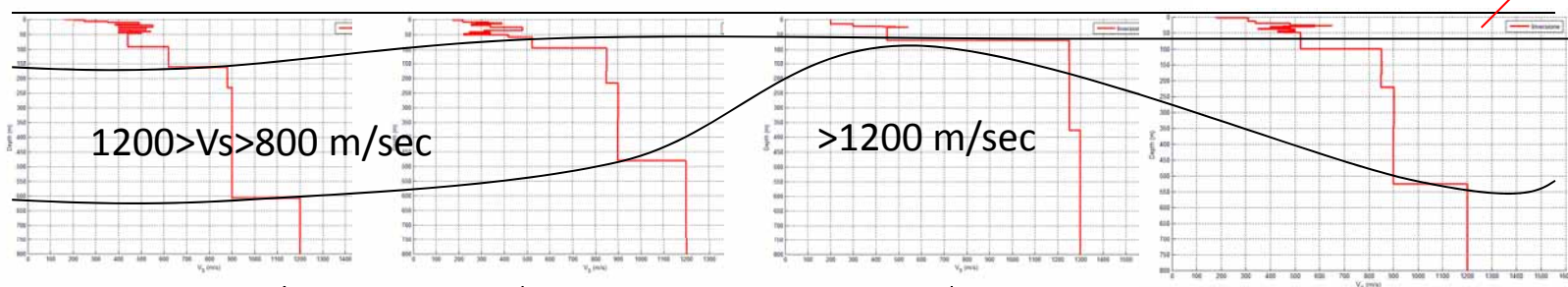


Carbonara Po

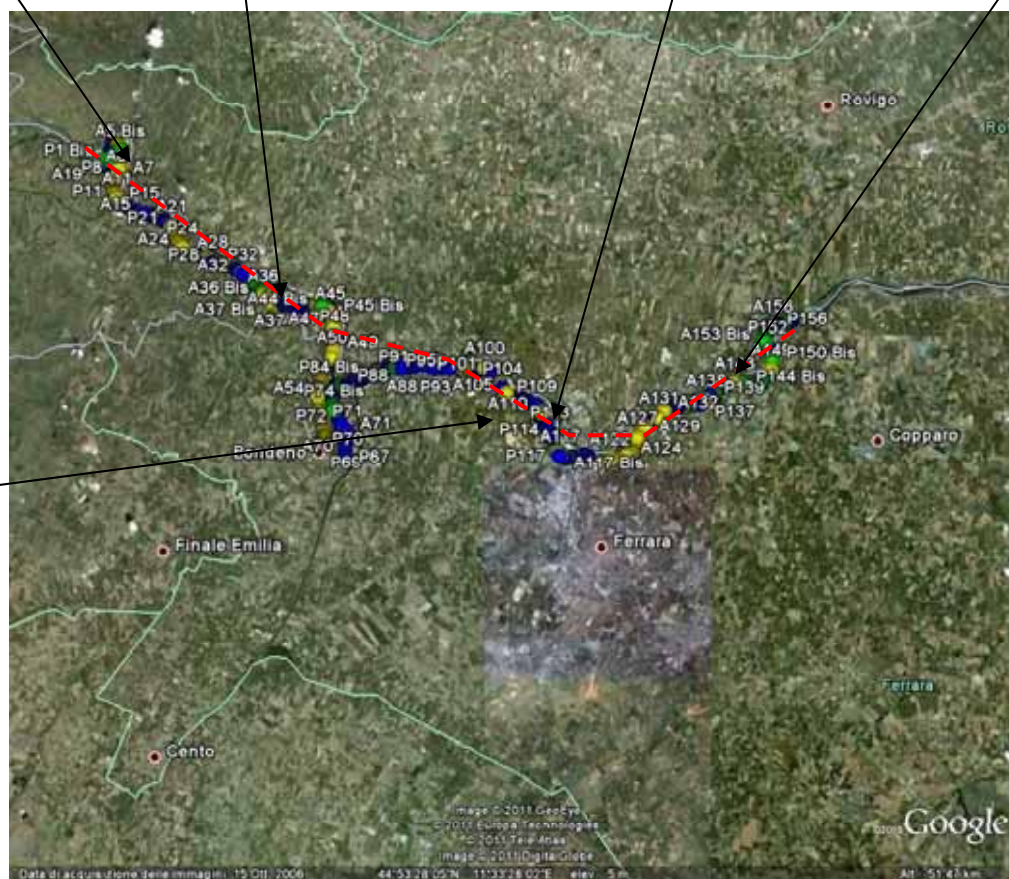
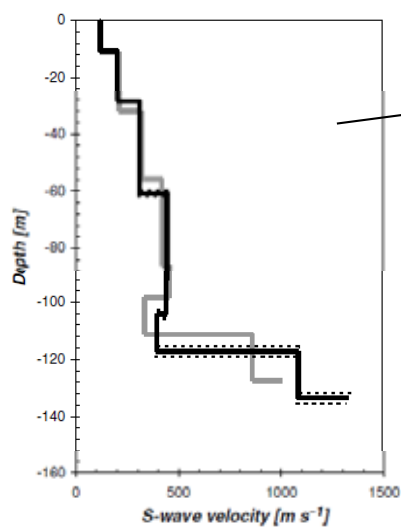
Ficarolo

Occhiobello

Canaro



Casaglia





Boretto

Gorgo

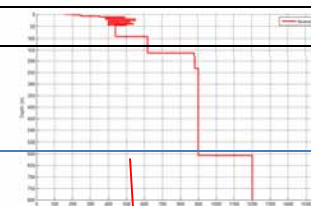
Carbonara Po



<600 m/sec

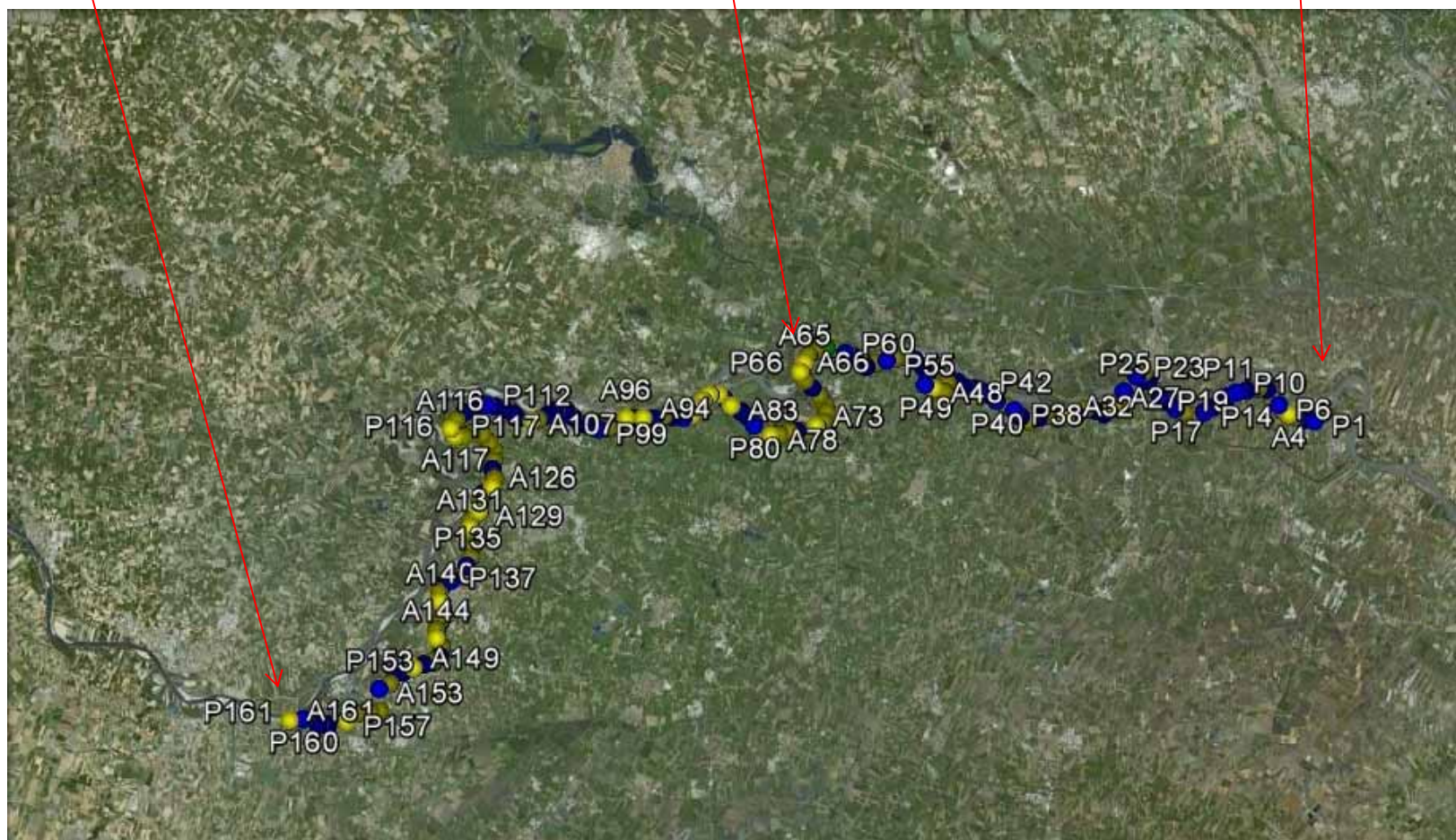
1200 > Vs > 800 m/sec

>1200 m/sec



80 m

>500 m



Supplemento alla rivista trimestrale



ingegneria sismica

Anno XXVIII - n. 2 - 2011

www.patroneditore.com

A cura di:

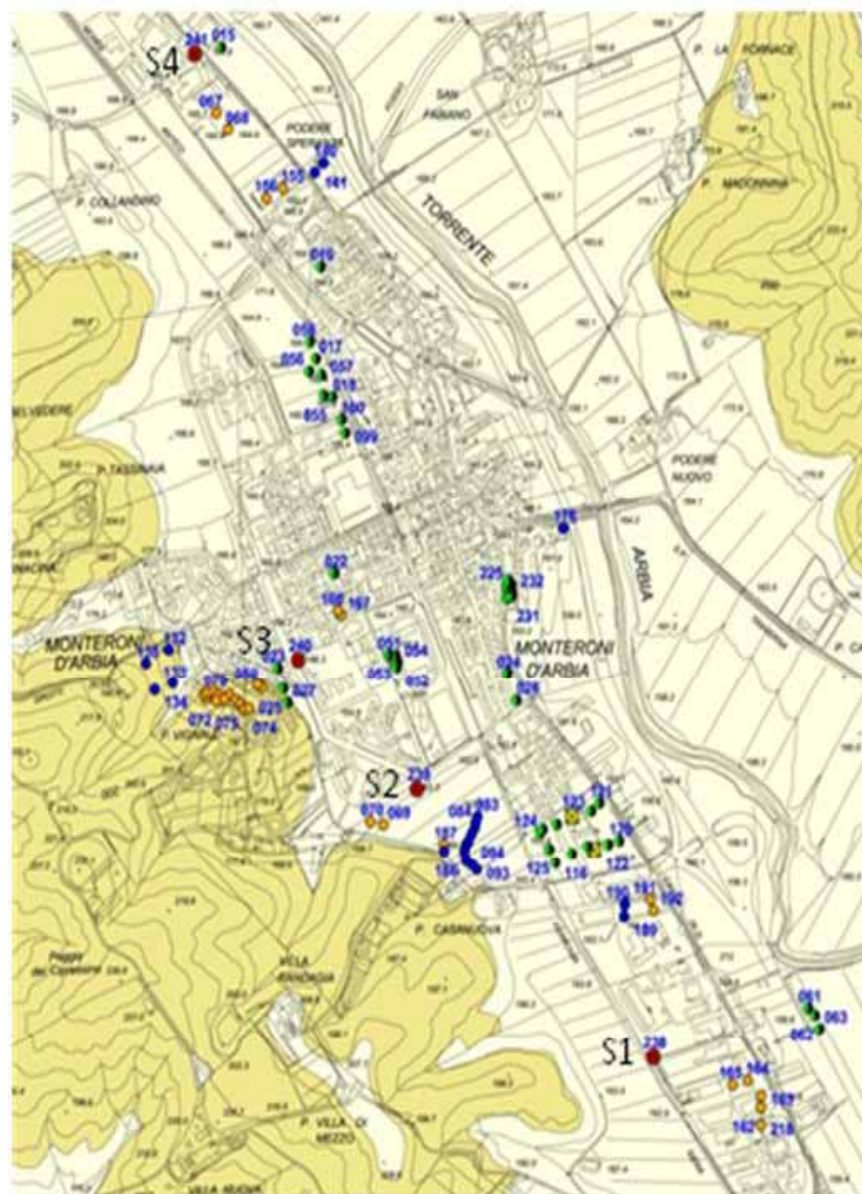
Mauro Dolce
Dario Albarello
Silvia Castellaro
Sergio Castenetto
Antonio Colombi
Massimo Compagnoni
Michele Di Filippo
Maria Di Nezza
Claudio Eva
Sebastiano Foti
Guido Martini
Giuseppe Naso
Floriana Pergalani
Filippo Santucci de Magistris
Gabriele Scarascia Mugnozza
Francesco Silvestri

Introduzione <i>M. Dolce</i>	pag	3
"Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica": un riferimento per la caratterizzazione sismica del territorio <i>S. Castenetto</i>	pag	6
La carta geologico tecnica per gli studi di MS <i>G. Martini, S. Castenetto, G. Naso</i>	pag	14
Rilievi gravimetrici per la microzonazione sismica (livello 1) <i>M. Filippo, M. Nezza, G. Scarascia Mugnozza</i>	pag	18
Valutazione degli standard di esecuzione e dell'efficacia delle indagini di sismica attiva e passiva <i>S. Foti, F. Santucci de Magistris, F. Silvestri, C. Eva</i>	pag	23
Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola <i>D. Albarello, S. Castellaro</i>	pag	32
Procedura semiquantitativa per stabilire la qualità di una carta di MS di livello 1 <i>D. Albarello, S. Castenetto, G. Naso</i>	pag	63
Risposta sismica locale: la MS come strumento discriminante per l'utilizzo di approcci semplificati o di specifiche analisi <i>A. Colombi, M. Compagnoni, F. Pergalani</i>	pag	65



Alcune indicazioni metodologiche e bibliografiche possono essere reperite sul sito del Dipartimento della Protezione Civile Nazionale

<http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/microzonazione.wp>



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

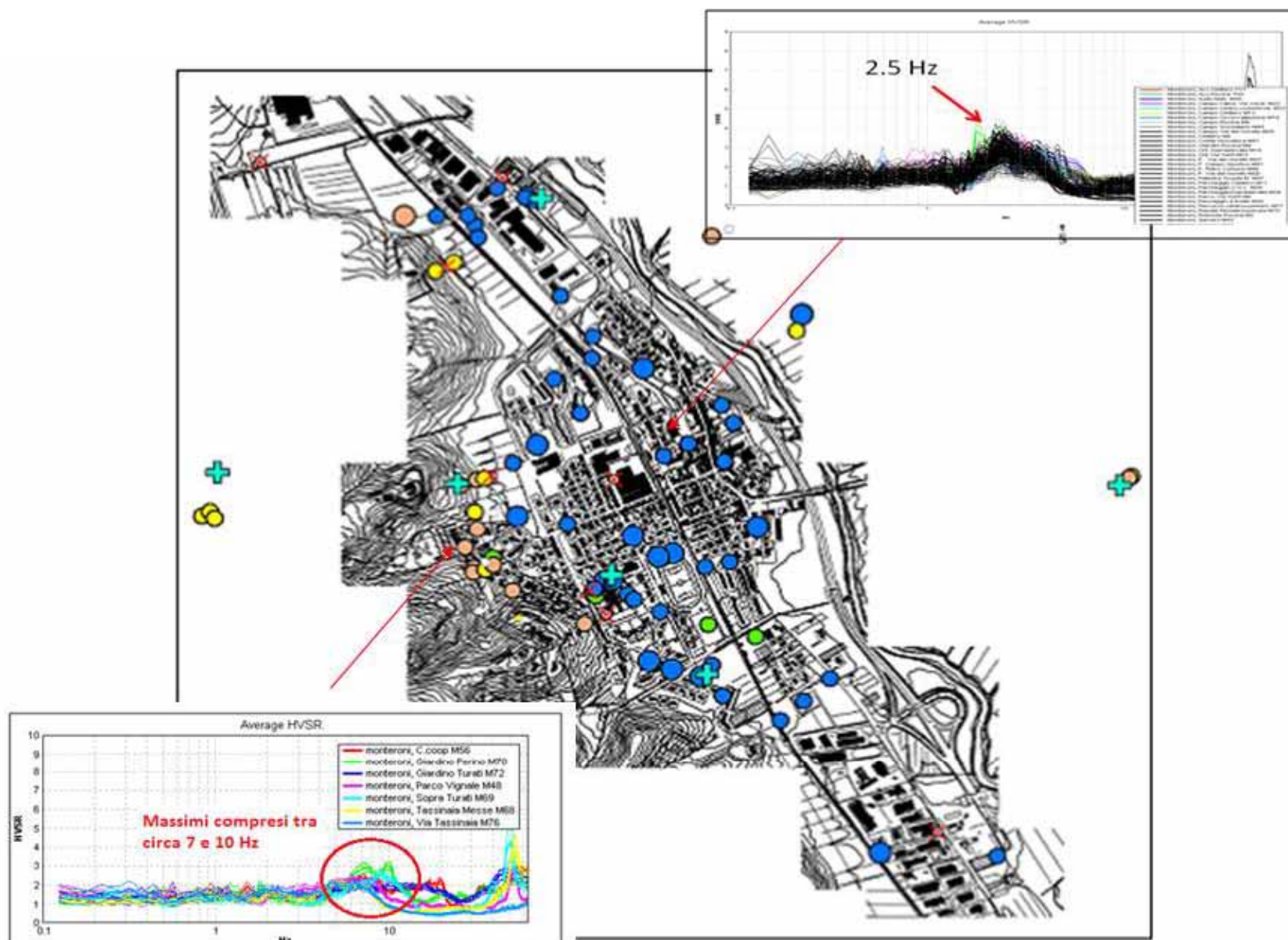
INDAGINI GEOGNOSTICHE

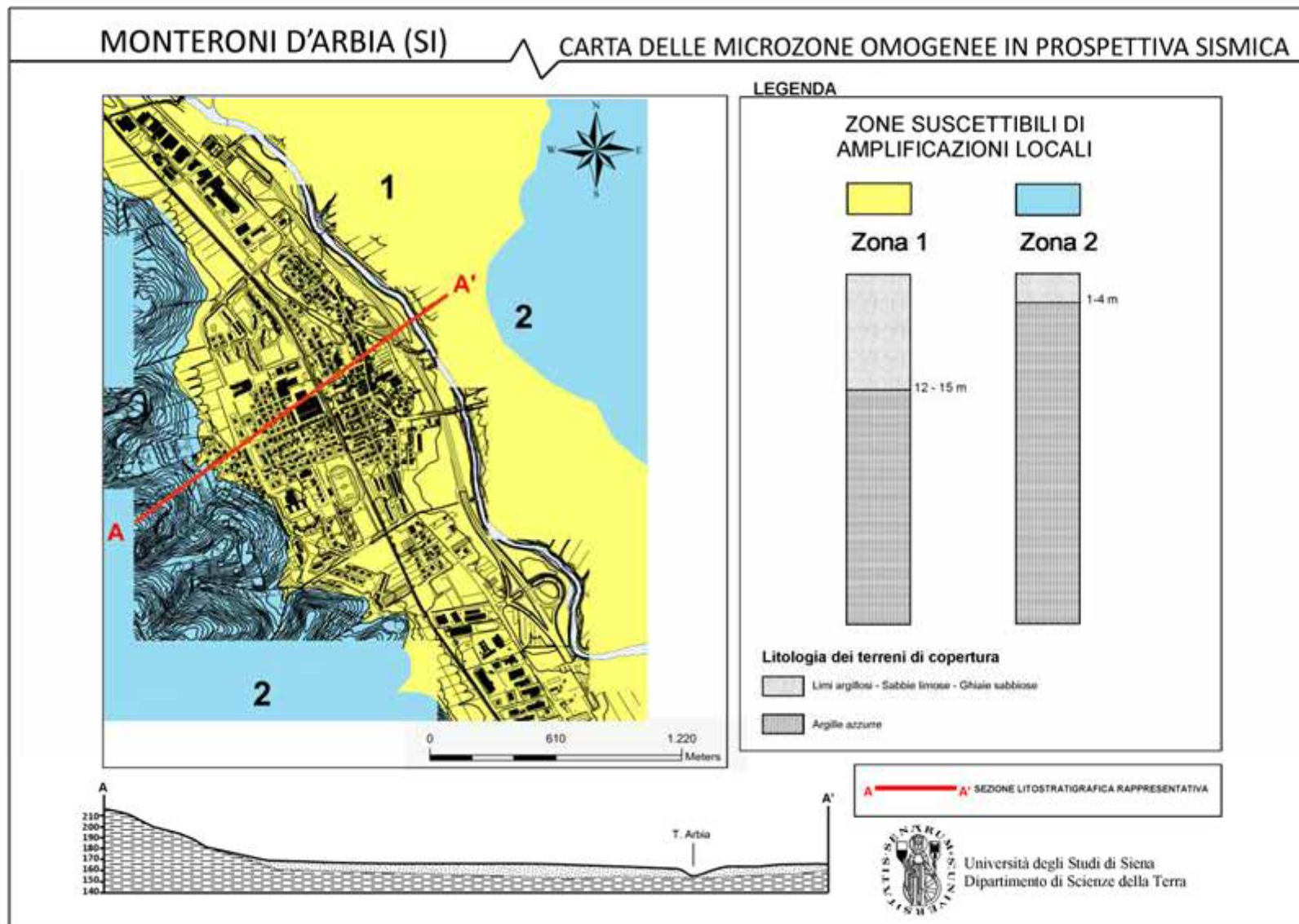
- Sondaggio a carotaggio
- Prova penetrometrica statica CPT
- Prova penetrometrica dinamica DP
- Profilo sismico
- Trincea esplorativa

PROGRAMMA DOCUP TOSCANA 2000-2006

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

Il caso di Monteroni D'Arbia (Si)





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



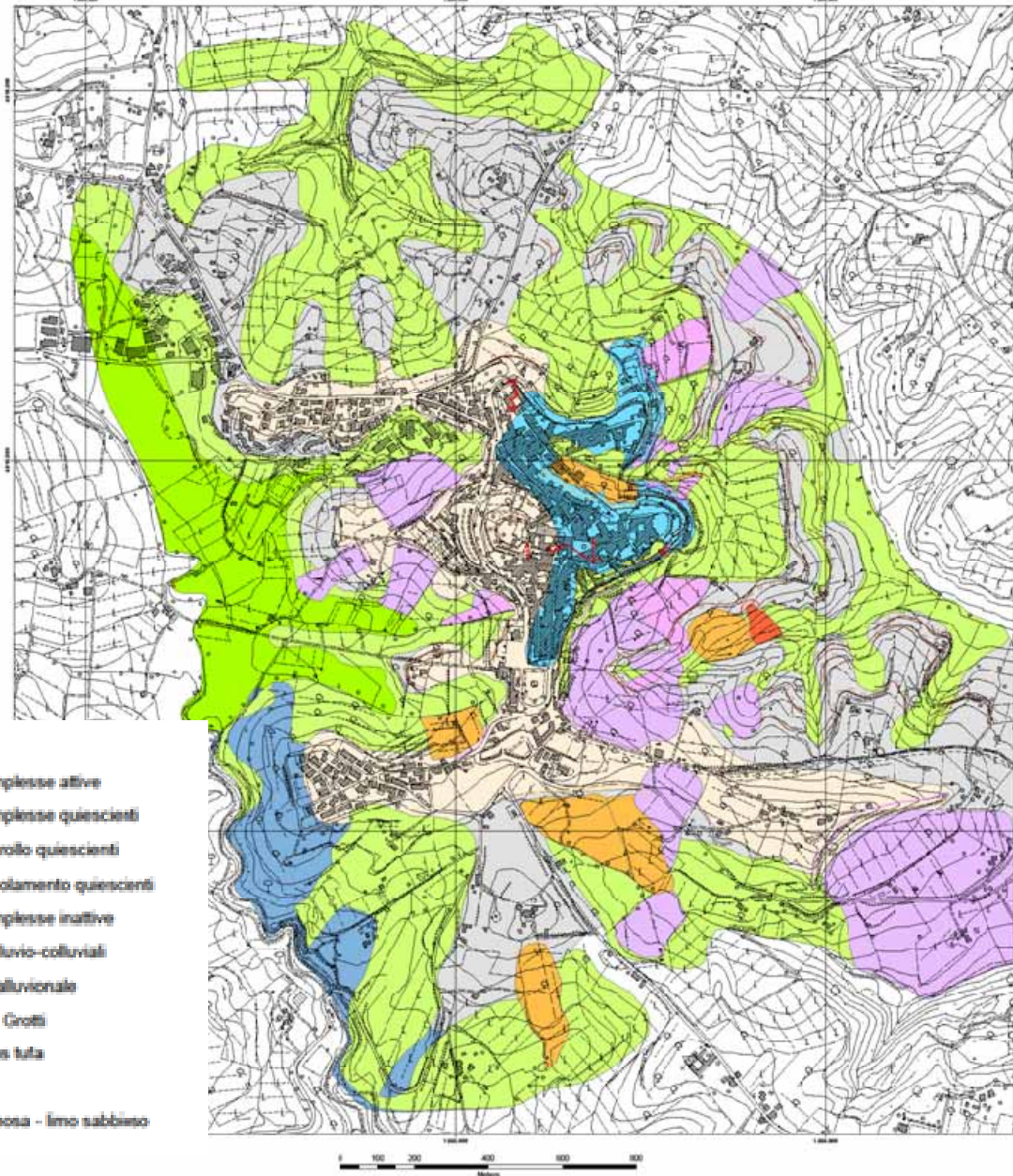
Le torri medioevali di S.Gimignano rappresentano infatti un patrimonio UNESCO e sono una importante attrazione turistica della Toscana

Carta Geologica

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

Legenda

- | | |
|---|---|
|  traccia di cavità antropica |  Frane complesse attive |
|  Scarpata antropica |  Frane complesse quiescenti |
|  Scarpata di frana attiva |  Frane di crollo quiescenti |
|  Scarpata di frana di colamento quiescente |  Frane di colamento quiescenti |
|  Scarpata di frana di crollo quiescente |  Frane complesse inattive |
|  Scarpata di frana quiescente |  Depositi eluvio-colluviali |
|  Scarpata di frana inattiva |  Deposito alluvionale |
|  Orlo di scarpata morfologica(10-20 m) |  Breccia di Grotti |
|  Scarpata fluviale |  Calcareous tufa |
| |  Sabbia |
| |  Sabbia limosa - limo sabbioso |



Sono state identificate 4 formazioni principali



Sintema Campiglia dell'Elsa (Calcarei 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.

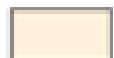
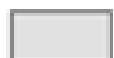


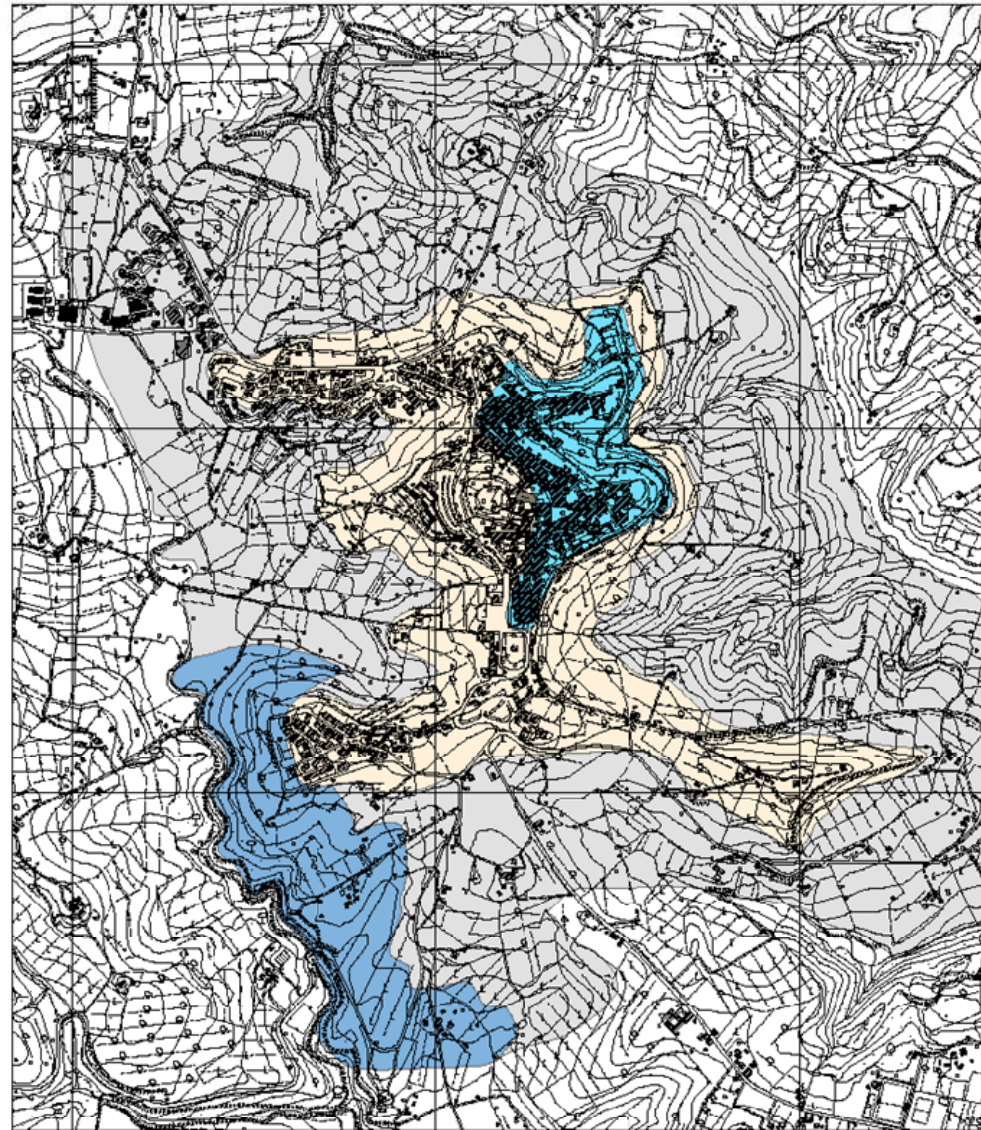
Breccia di Grotti (breccia calcarea, Miocene) => formazione continentale di clasti e detriti di rocce carbonatiche (essenzialmente Calcare Cavernoso). I clasti hanno dimensioni fra pochi cma qualche dm con alterazione. La matrice sabbiosa e poco comune e consistse di sabbia medio-grossolana

Carta Litologica

Dalla carta geologica
è stata estratta una
carta litologica

Legenda

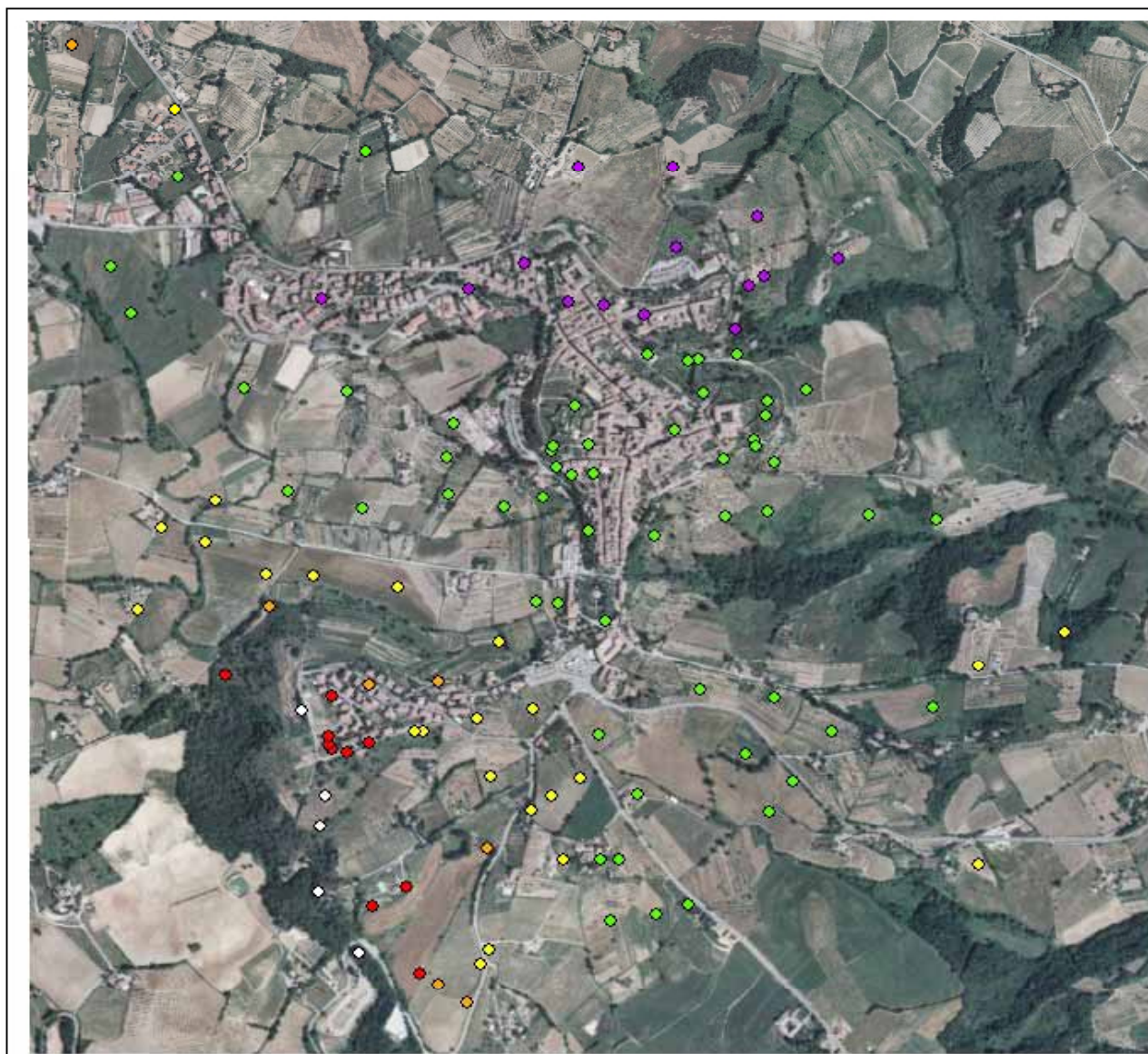
-  Grotti's Breccia
-  Calcareous tufa
-  Sand
-  Silty sand



0 100 200 400 600 800
Meters

Misure HVSR

Abaco preliminare



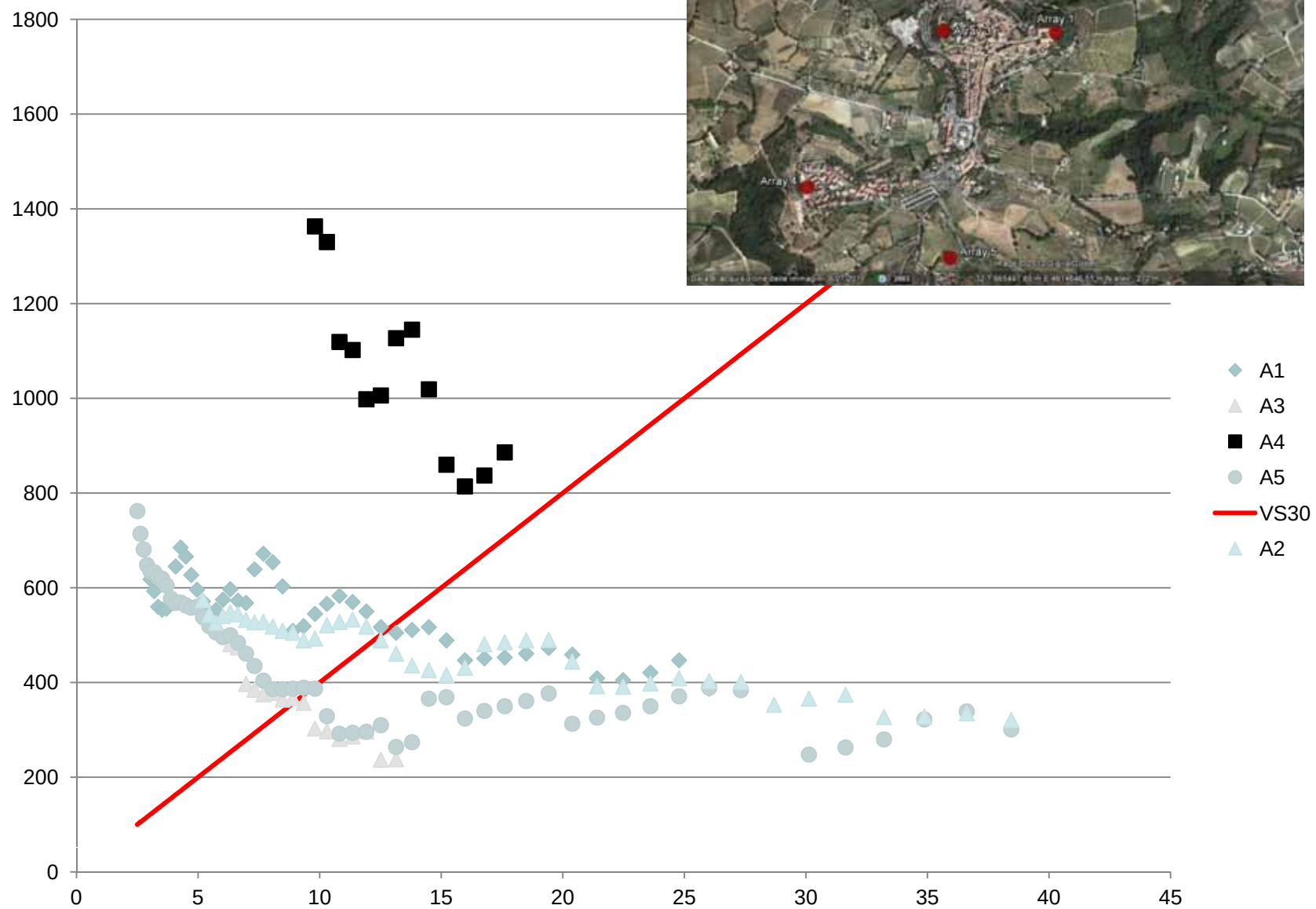
Legenda

- <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

Misure su antenna sismica

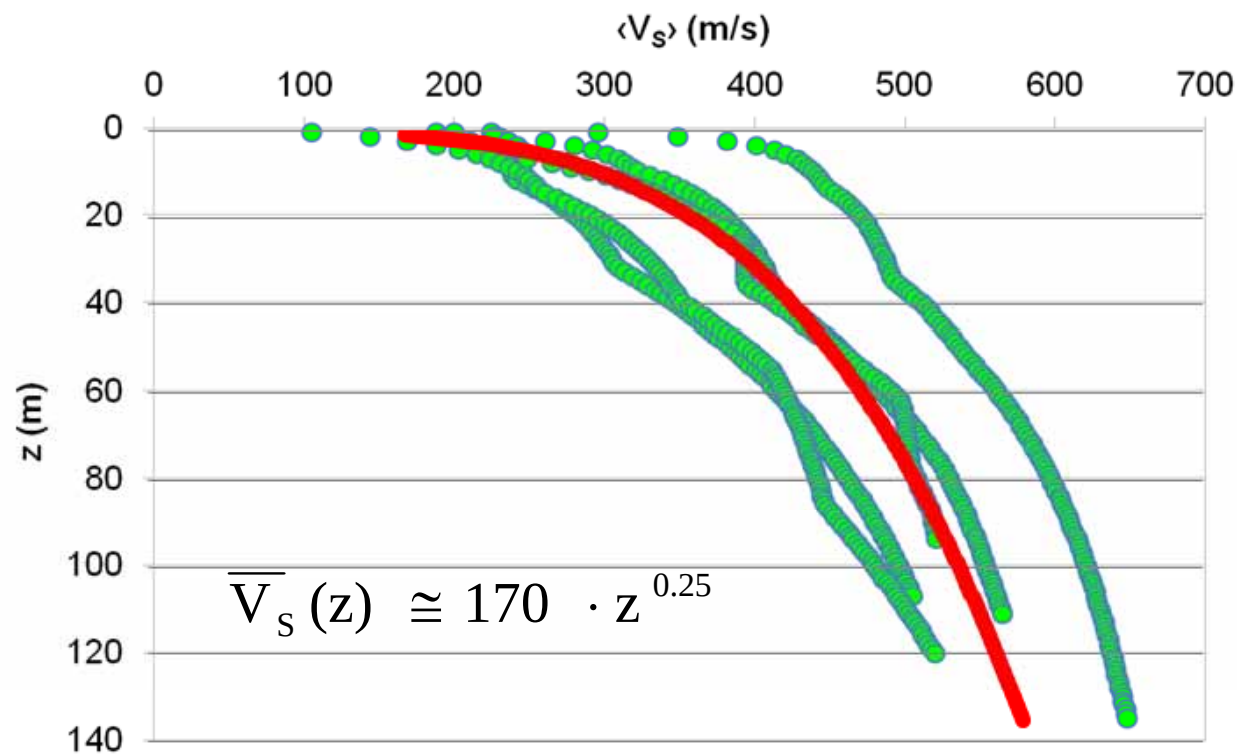






Sono state anche eseguite inversioni congiunte delle curve di dispersione e HVSR

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



$$H \approx A v^B$$

Batimetria del basamento

San Gimignano
Batimetria del substrato risonante

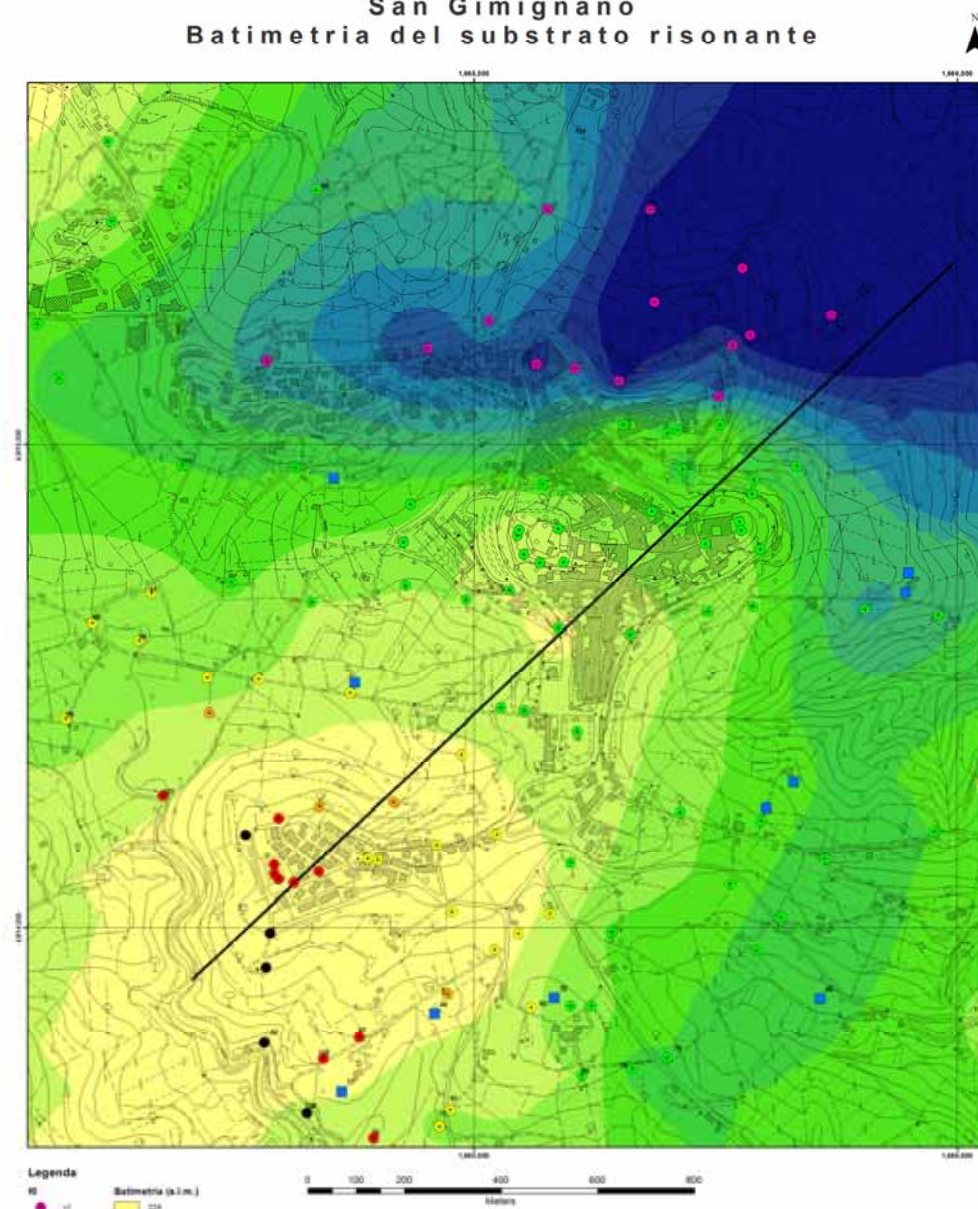
Legenda

f0

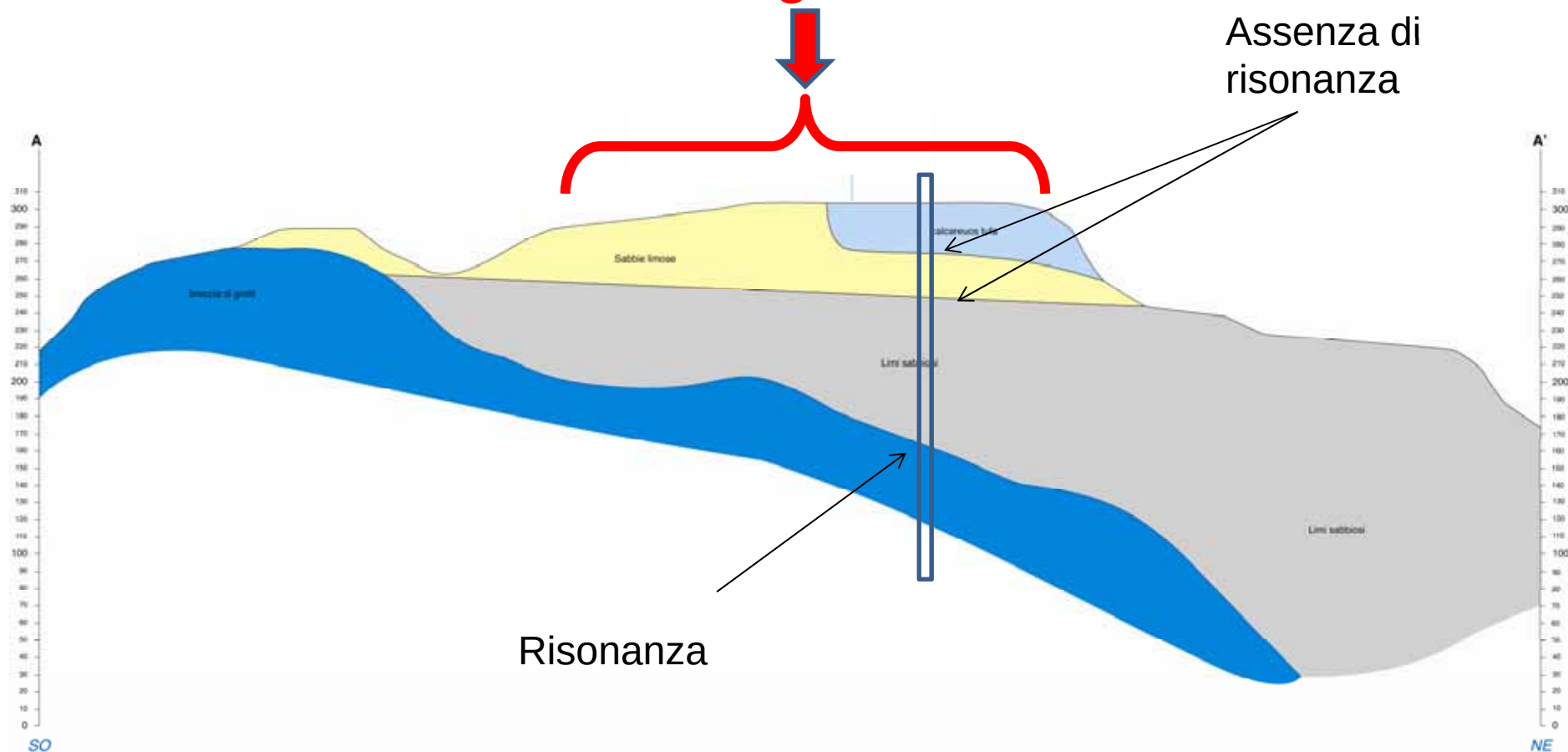
- <1
- 1-2
- 2-4
- 4-8
- >8
- no_picco
- geol

Batimetria (s.l.m.)

- 225
- 200
- 175
- 150
- 125
- 100
- 75
- 50
- 25
- 0
- 25



San Gimignano



SW

NE