

Corso di Formazione

Le indagini geofisiche per la Microzonazione sismica di livello II

Prof. Dario Albarello

*Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e
dell'Ambiente - Università degli Studi di Siena*

dario.albarello@unisi.it

Colle Ameno (Ancona) 5 Giugno 2018

Il livello II di approfondimento si pone due obiettivi:

- *compensare alcune incertezze del livello 1 con approfondimenti conoscitivi;*
- *fornire quantificazioni numeriche, con metodi semplificati (abachi), dei fenomeni di amplificazione del moto sismico atteso indotti dalla configurazione sismostratigrafica locale 1D (ovvero legate alla presenza di variazioni verticali del valore di impedenza sismica dei materiali presenti ne sottosuolo) o ad effetti legati alla morfologia superficiale.*

Questo permette di differenziare le Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) delineate al primo livello di approfondimento, tenendo conto del livello relativo di pericolosità sismica determinato dalle specifiche condizioni sismostratigrafiche locali ed identificare la zone di maggiore criticità dove orientare studi più approfonditi.

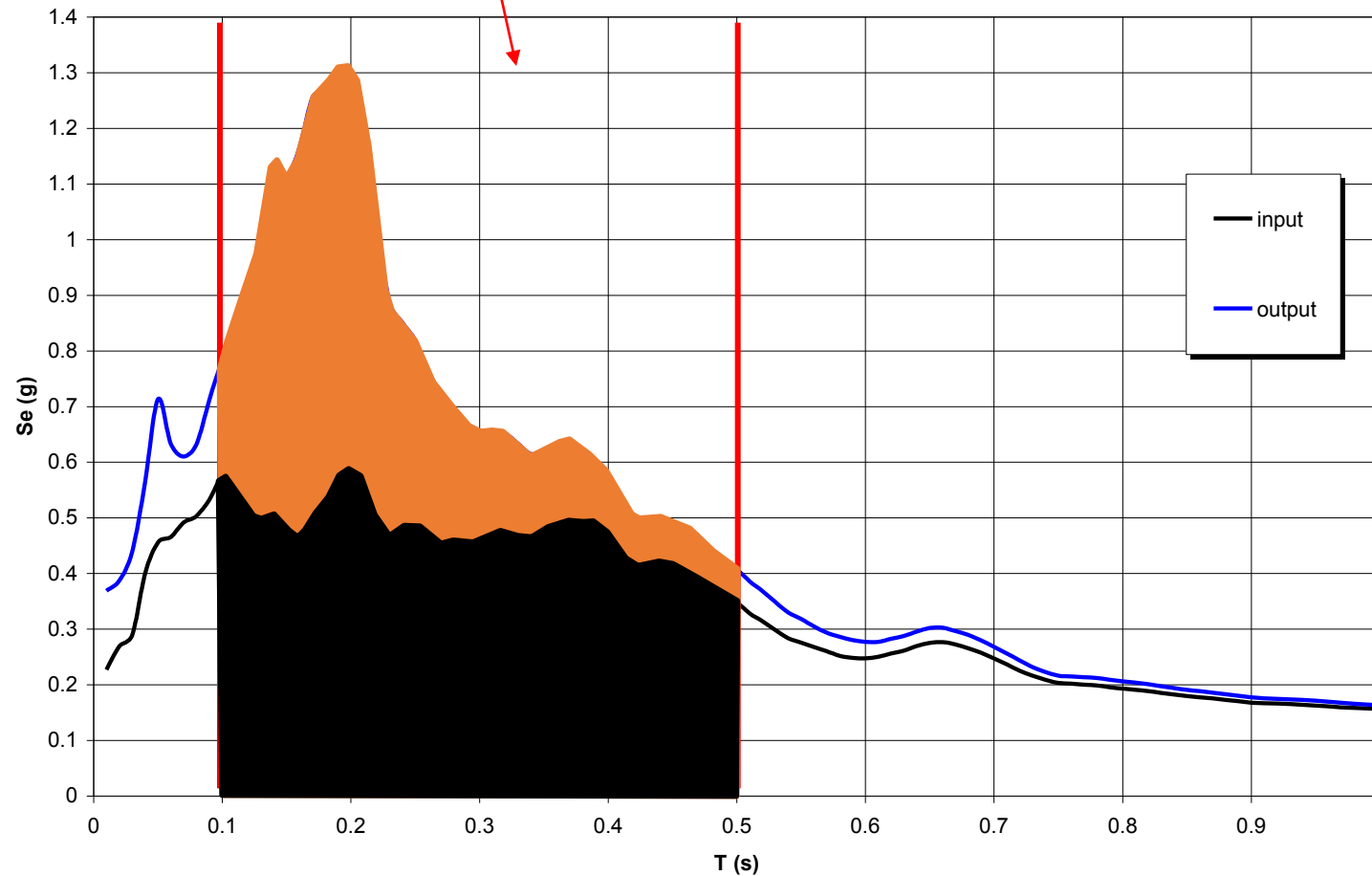
Si tratterà comunque di una valutazione approssimativa che non terrà conto della possibile presenza di effetti dovuti a complessità locali (variazioni laterali delle proprietà sismiche del sottosuolo, effetti di instabilità, ecc.).

La parametrizzazione quantitativa del livello di amplificazione del moto del suolo ha la forma di opportuni fattori numerici detti Fattori di Amplificazione (FA) che verranno attribuiti alle diverse zone soggette alle analisi di MZS di livello II utilizzando opportuni Abachi

Gli abachi sono tabelle che consentono la determinazione dei valore di FA corrispondente ad una data posizione o ad una data MOPS in funzione di alcuni parametri da determinare sperimentalmente mediante tecniche geofisiche leggere (prospezione sismica di superficie in configurazione attiva e/o passiva)

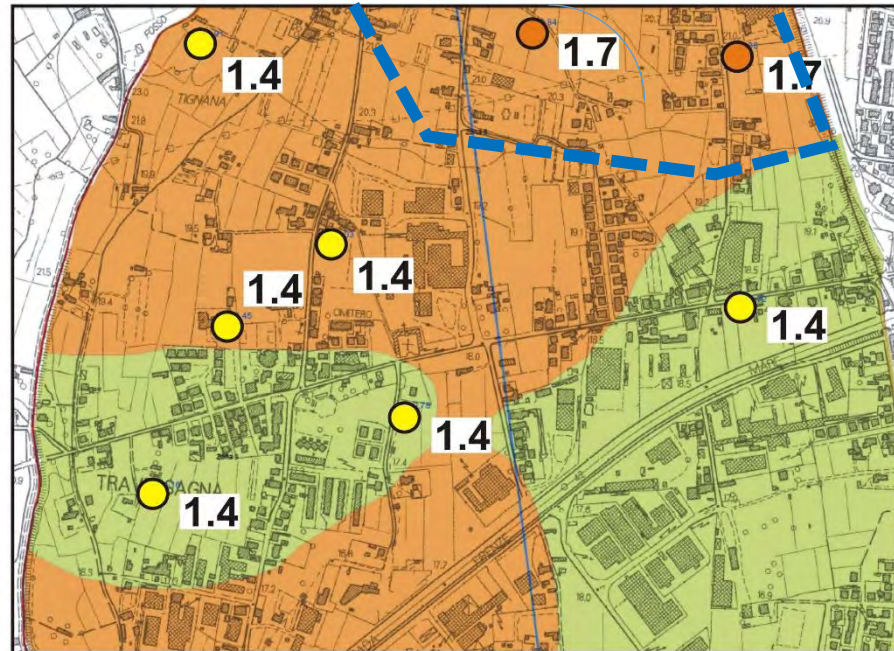
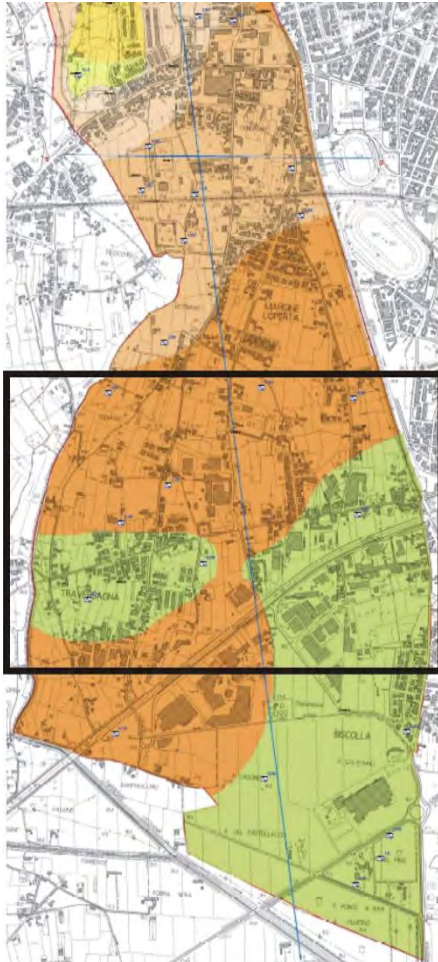
$$FA_{T_1 T_2} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} Sa_{out}(T) dT}{\int_{T_1}^{T_2} Sa_{in}(T) dT}$$

Il fattori di amplificazioni (FA) rappresentano un indice integrale del livello di amplificazione indotto dalle condizioni litostratigrafiche e/o morfologiche locali



Il fattore di amplificazione è un indice di **pericolosità sismica relativa** valido all'interno di un dato territorio comunale

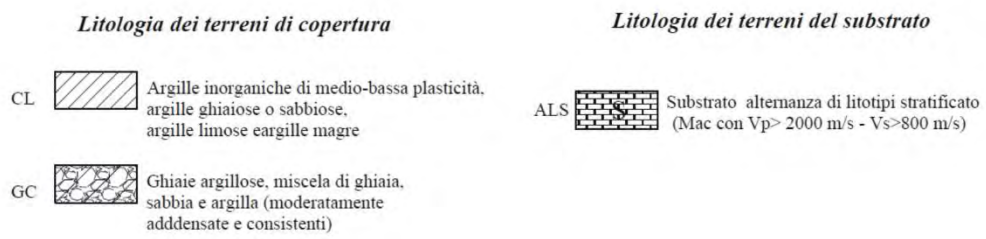
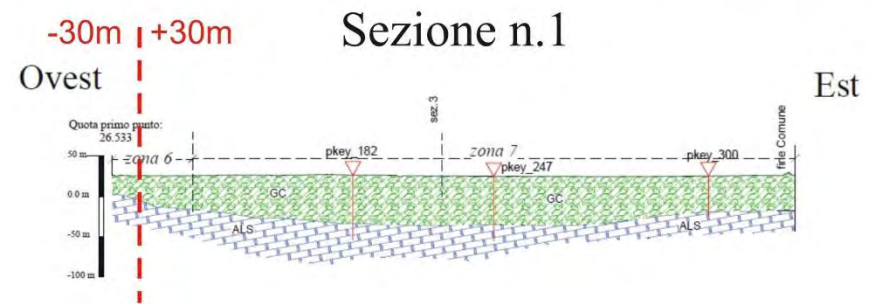
Il risultato di questo livello di analisi è la Carta di microzonazione sismica, ottenuta associando una quantificazione numerica degli effetti di amplificazione alle zone, o a parti di esse, alle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica delineate al primo livello di analisi. **I fenomeni di instabilità non vengono analizzati a questo livello di indagine**



Le stime ottenute possono suggerire variazioni nella geometria delle zone di livello 1

Sono previste almeno 2 carte di FA in funzione dell'intervallo di periodi di vibrazione considerati dagli abachi (0.1-0.5s, 0.5-1.0s)

Allo stesso modo, le indagini condotte nell’ambito della MZS di Livello II e la loro interpretazione possono portare a delle modifiche del modello geologico messo a punto nel livello I di analisi soprattutto quando questo è stato condotto a partire da una base sperimentale ridotta



Gli abachi sono stati costruiti dalla Regione Marche sulla base di una approccio numerico finalizzato alla definizione dei valori di FA associati alle situazioni lito-stratigrafiche presenti nel territorio regionale

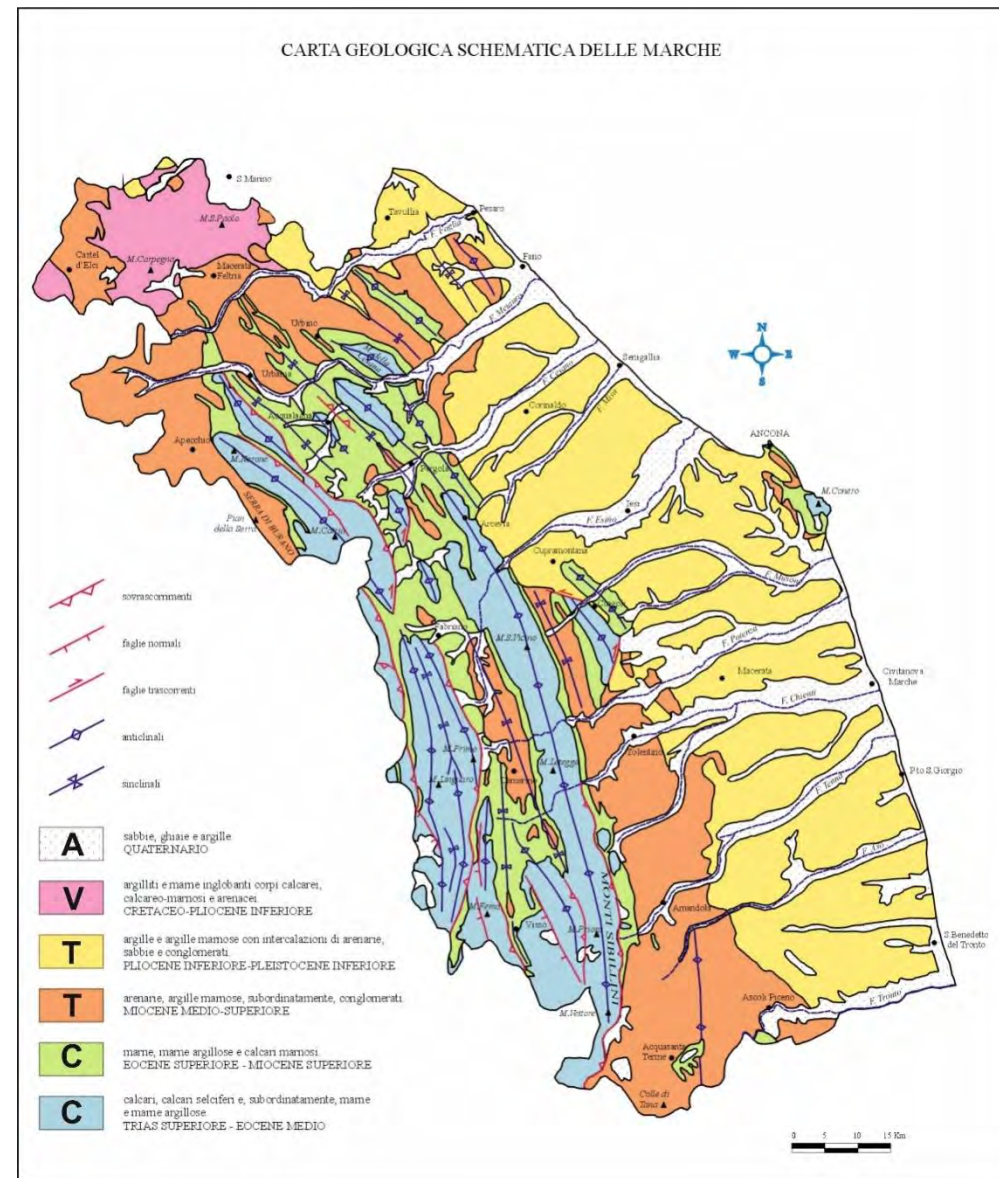
Gli abachi sono differenziati in funzione dell'ambiente tettonico e sedimentario all'interno del quale sorge il Comune. In particolare, sono state indentificati quattro domini:

V- dominio della Val Marecchia

T- dominio terrigeno;

C- dominio calcareo

A- dominio alluvionale

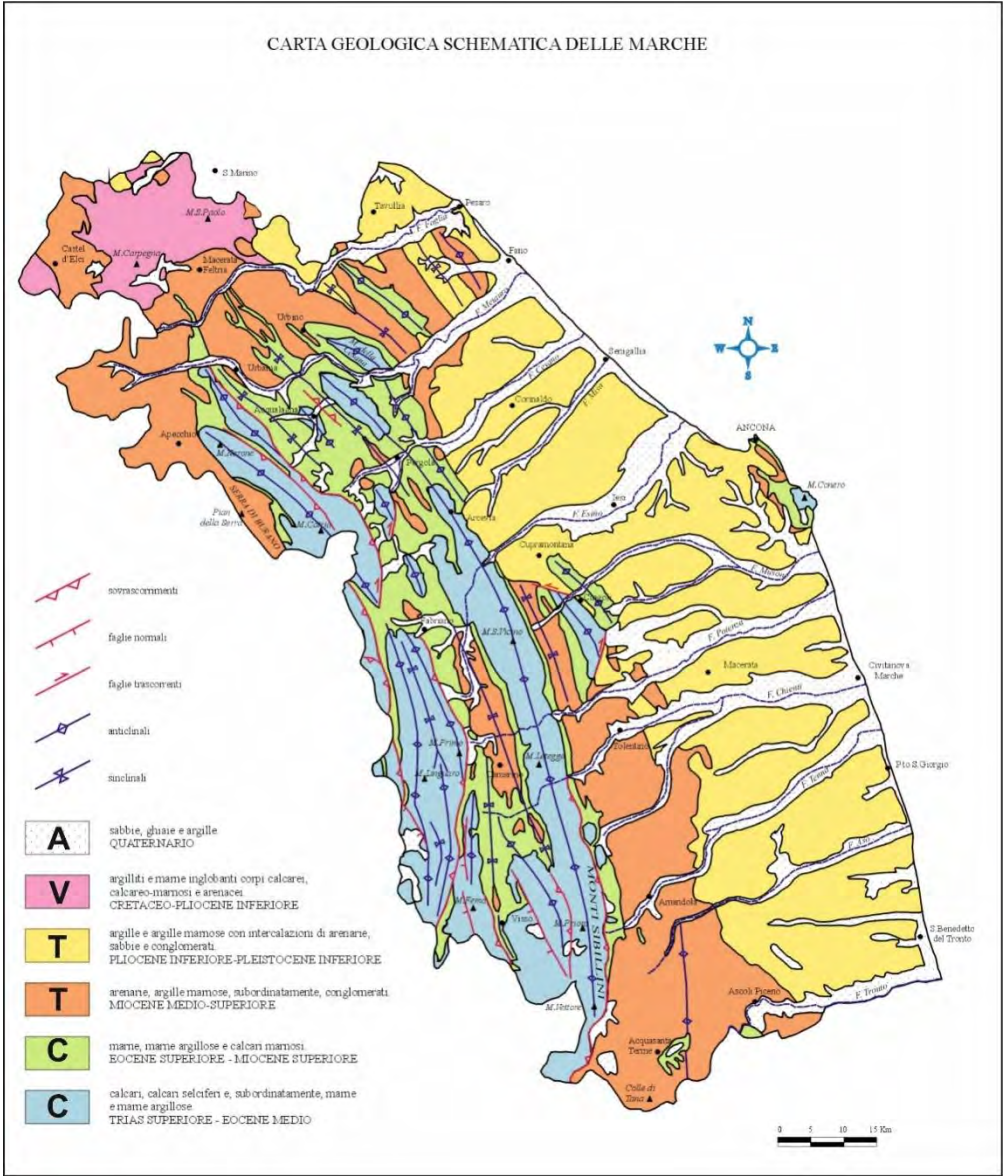


In dominio della Val Marecchia non viene al momento considerato

L'attribuzione dei vari comuni ai domini così definiti è fornita dall'Autorità regionale

COMUNI	SITUAZIONE LITO-STRATIGRAFICA C- Dominio Calcereo; A- Dominio Alluvionale; T- Dominio Terrigeno; V- Dominio "Valmarecchia"
Provincia di Ancona	
Agugliano,	T
Ancona,	A
Arcevia,	C
Barbara (AN),	T
Belvedere Ostrense,	T
Camerano (AN),	A + T
Camerata Picena,	T
Castel Colonna,	T
Castellino,	A + T
Castelfidardo,	A + T
Castelleone di Suasa,	A + T
Castelplanio,	T
Cerreto d'Esi,	A
Chiaravalle (AN),	A
Corinaldo,	T
Cupramontana,	T

In alcune situazioni più complesse, lo stesso comune è stato attribuito a più domini



Per ciascun dominio sono stati quindi costruiti due classi di abachi in funzione della profondità del tetto del **substrato sismico** che corrisponde a quello delle formazioni caratterizzate da valori di velocità di propagazione delle onde S non inferiori a 800 m/s

In particolare sono state distinte due situazioni: quelle in cui il substrato sismico si trova a meno di 30 m/s dal piano campagna e quelle dove questo giace a maggiori profondità. Nelle situazioni nelle quali il substrato sismico si trova a meno di tre metri dal piano campagna questo è stato assunto come sub-affiorante

Laddove il basamento è affiorante o sub-affiorante, gli unici affetti di amplificazione attesi sono quelli dovuti alla **morfologia superficiale**. In questi casi, il fattore di amplificazione viene calcolato mediante una opportuna procedura descritta di seguito

Una volta identificata la zona di appartenenza e lo spessore delle coperture, allora vengono univocamente definiti abachi che permettono il calcolo del valore di FA relativo a specifici intervalli di periodi di vibrazione in funzione di due parametri da determinare sperimentalmente in ciascun sito: il valore della **frequenza di risonanza** fondamentale (f_0) ed valore della **velocità media** (media dei tempi di tragitto) della onde S fino al substrato sismico (V_sH) se questo è meno profondo di 30m o fino a 30 m (V_s30) se questo è più profondo

“Zona Calcareo”

Basamento sismico a profondità > 30 m

FA calcolato per corti periodi (0.1 < T < 0.5 s)											
		f0 (Hz)									
		<1	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	= 8	75° perc.
Vs30 (m/s)	<200										
	300	1.1	1.5	2.0	2.2	2.4	2.5	2.3	2.2	1.9	2.1
	500	1.0	1.3	1.3	1.4	1.6	1.5	1.4	1.6	1.6	1.4
	700		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3
	=800				1.2	1.2					1.2

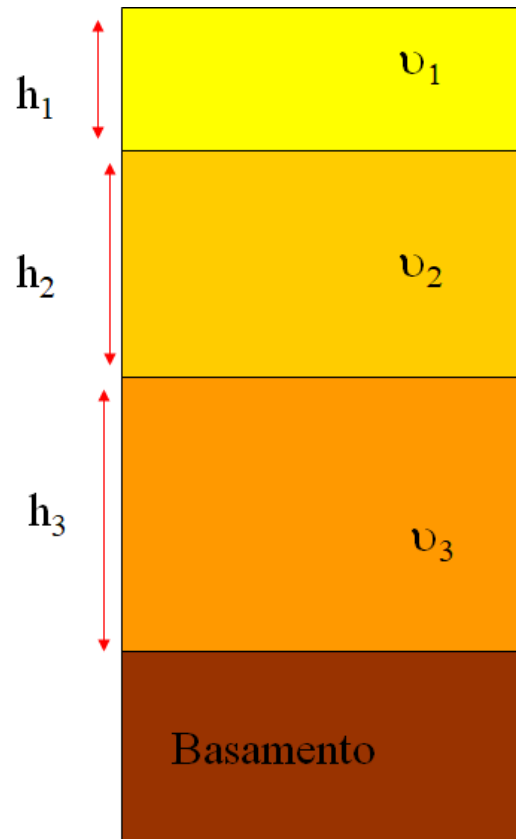
FA calcolato per lunghi periodi (0.5 < T < 1 s)											
		f0 (Hz)									
		<1	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	= 8	75° perc.
Vs30 (m/s)	<200										
	300	1.6	2.0	2.3	2.3	2.3	2.0	1.8	1.6	1.6	1.8
	500	1.6	1.7	1.5	1.4	1.9	1.6	1.5	1.5	1.4	1.6
	700		1.5	1.3	1.2	1.2	1.1	1.3	1.3	1.2	1.3
	=800				1.1	1.1					1.1

Le stime vengono effettuate per classi di frequenza e spessore

Classi		
frequenza (Hz)	f0 < 1	
	1.5	1 ≤ f0 < 2
	2.5	2 ≤ f0 < 3
	3.5	3 ≤ f0 < 4
	4.5	4 ≤ f0 < 5
	5.5	5 ≤ f0 < 6
	6.5	6 ≤ f0 < 7
	7.5	7 ≤ f0 < 8
velocità (m/s)	≥ 8	
	Vs < 200	
	300	200 ≤ Vs < 400
	500	400 ≤ Vs < 600
	700	600 ≤ Vs < 800
	Vs ≥ 800	

Ricordo che per **velocità media** (sui tempi di tragitto) delle onde S fino ad una profondità H (VsH) si intende il risultato della relazione

$$V_{sH} = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_i}}$$



“Zona Calcareia”

Basamento sismico a profondità > 30 m

Situazione non considerata nella modellazione

Situazioni rare e quindi FA poco affidabili

Valori utilizzabili quando non è possibile determinare un valore di f_0 (curva sperimentale piatta)

		FA calcolato per corti periodi ($0.1 < T < 0.5$ s)									
		f_0 (Hz)									
		<1	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	= 8	75° perc.
Vs30 (m/s)	<200										
	300	1.1	1.5	2.0	2.2	2.4	2.5	2.3	2.2	1.9	2.1
	500	1.0	1.3	1.3	1.4	1.6	1.5	1.4	1.6	1.6	1.4
	700		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3
	=800				1.2	1.2					1.2

		FA calcolato per lunghi periodi ($0.5 < T < 1$ s)									
		f_0 (Hz)									
		<1	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	= 8	75° perc.
Vs30 (m/s)	<200										
	300	1.6	2.0	2.3	2.3	2.3	2.0	1.8	1.6	1.6	1.8
	500	1.6	1.7	1.5	1.4	1.9	1.6	1.5	1.5	1.4	1.6
	700		1.5	1.3	1.2	1.2	1.1	1.3	1.3	1.2	1.3
	=800				1.1	1.1					1.1

L'abaco non è utilizzabile laddove la specifica combinazione di parametri non è prevista
In questi casi, i valori di FA vanno stimati mediante il calcolo della **risposta sismica locale**

Alcune considerazioni generali sugli abachi delle Marche

I due parametri di accesso agli abachi ($V_{s_{30}}/V_{sH}$ e f_0) sono stati scelti perché relativamente facili da determinare per un professionista e comunque rappresentativi della situazione locale: entrambi vanno comunque determinati e solo quando **non si evidenziano fenomeni di risonanza** si può usare il solo valore di V_{s30} o V_{sH}

I fattori di amplificazione forniti hanno carattere conservativo: infatti corrispondono al 75° percentile della popolazione dei valori ottenuti dalla simulazione numerica

Non tutte le combinazioni dei due parametri di ingresso ($V_{s_{30}}/V_{sH}$ e f_0) sono presenti negli abachi (ovvero non corrispondono a situazioni effettivamente riscontrate): nei casi in cui dovessero verificarsi sperimentalmente, il professionista è invitato a compiere studi specifici di risposta sismica locale per attribuire il corretto valore di FA

Per la determinazione del valore di FA relativa ad un punto di misura è quindi necessario:

1. Definire la profondità del **substrato sismico** (che non necessariamente corrisponde al substrato geologico), stabilendo se questo si trova a profondità maggiori o minori di 30m dal piano campagna
2. Definire il valore della **minima frequenza di risonanza** f_0
3. Definire la velocità media delle onde S fino al basamento sismico (se lo spessore delle coperture è inferiore a 30m) o fino a 30m se questo è superiore (V_{sH} o V_{s30})

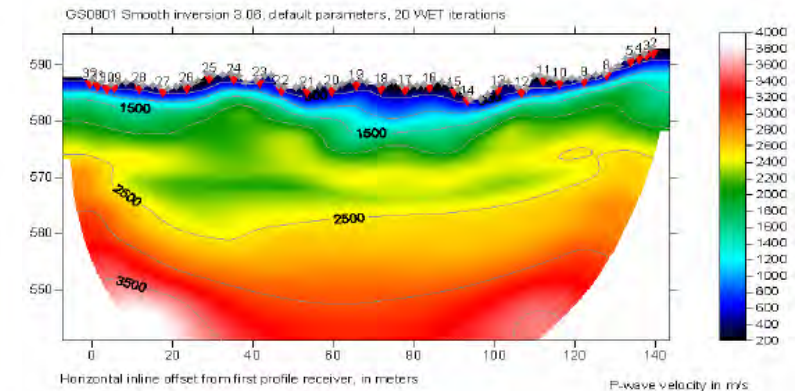
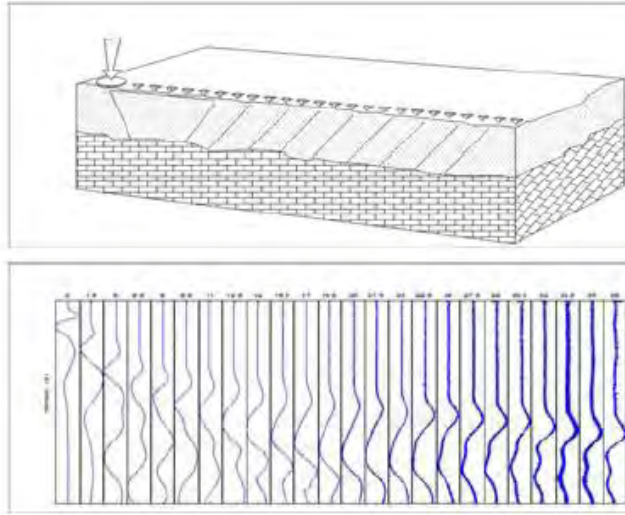
Si tratta in tutti i casi di parametri che possono essere determinati con misure di superficie di tipo geofisico (corredati da opportune informazioni di tipo geologico) e quindi con costi relativamente contenuti

Esistono ovviamente varie possibili scelte delle misure geofisiche per la definizione dei parametri da utilizzare per la stima di FA, ma solo alcune di queste sono effettivamente collegate più o meno direttamente all'oggetto dell'indagine

1. **Misure sismiche in onde S** (*Misure in foro e misure sismiche attive da superficie in onde S*) forniscono indicazioni **più strettamente** legate all'oggetto dell'indagine
2. **Misure sismiche in onde superficiali** (MASW, HVSr, ESAC/SPAC, REMI, FTAN, ecc.) che forniscono indicazioni **indirette** riguardo alle velocità di propagazione delle onde S
3. **Misure di tipo non sismico** (Gravimetria, Georadar, ERT, Rifrazione e riflessione in onde P) utili per la ricostruzione delle geometrie sepolte ma molto debolmente legate all'oggetto dell'indagine

c.	Indagini geofisiche
	ERT
	Dilatometria sismica
	Prova penetrometrica con cono sismico
	Down-hole
	Cross-hole
	<u>HVSr</u>
	ESAC/SPAC
	Sismica a riflessione SH
	Sismica a rifrazione SH
	Sismica a riflessione Onde P
	Sismica a rifrazione Onde P
	Georadar
	Rilievo gravimetrico o microgravimetrico
	<u>MASW</u>
	REMI
	FTAN

Le misure sismiche in onde S sono generalmente condotte con sorgenti artificiali di onde S ed utilizzano i soli primi arrivi sia in configurazione standard che tomografica



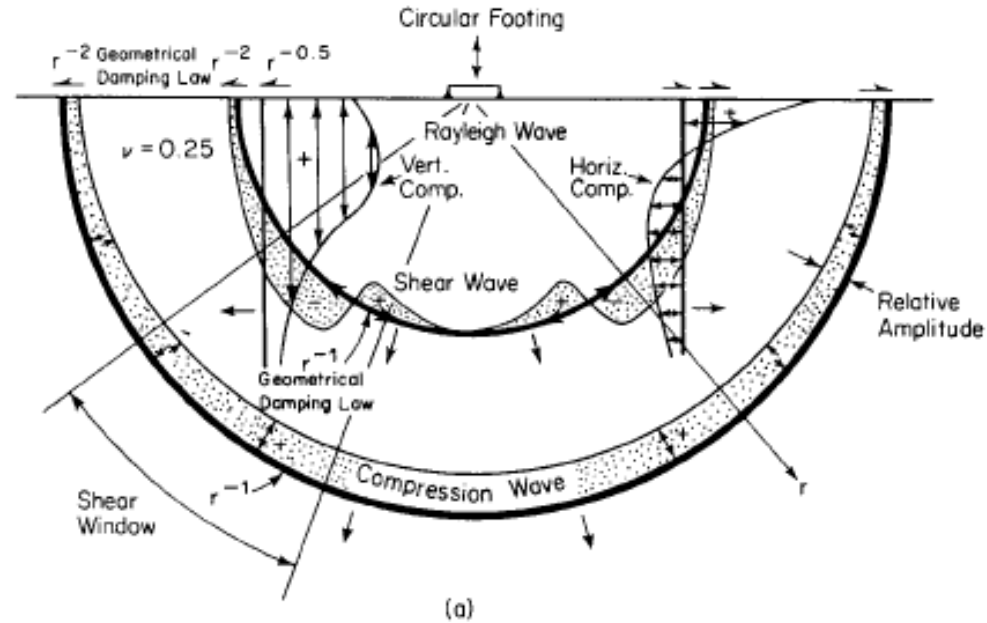
Si tratta di una tecnica assai raffinata e capace di fornire vincoli geometrici assai precisi ai contatti fra le diverse formazioni oltre a valori di velocità affidabili
Tuttavia è una tecnica caratterizzata da una relativamente bassa profondità di penetrazione in rapporto alle dimensioni dello stendimento ($1/4$ - $1/8$ circa) le cui dimensioni, per la natura piuttosto debole del segnale, non è possibile estendere a piacimento. Il loro utilizzo diviene allora problematico quando le profondità da raggiungere superano qualche decina di metri quando si opera in contesti antropizzati con elevati livelli di disturbo ambientale

In alternativa ai metodi in onde di volume, è recentemente cresciuto l'interesse per i metodi in **onde superficiali**

Si tratta di tecniche basate sullo studio delle velocità di propagazione delle **onde superficiali** dalle quali è possibile dedurre informazioni riguardo al profilo di velocità delle onde S sfruttando il forte (**ma indiretto**) legame fra questo tipo di onde

Rispetto alle tecniche in onde di volume, le tecniche in onde superficiali possono sfruttare **un segnale più energetico** (essendo canalizzate, le onde di superficie si attenuano assai meno delle onde di volume con la distanza dalla sorgente) e, in rapporto alle dimensioni dello stendimento utilizzato, sono caratterizzate da una maggiore penetrazione

Un limite essenziale dei metodi in onde superficiali è legato all'ipotesi che il mezzo analizzato sia caratterizzato **solo** da eterogeneità **verticali** (modello 1D).



Wave Type	Per Cent of Total Energy
Rayleigh	67
Shear	26
Compression	7

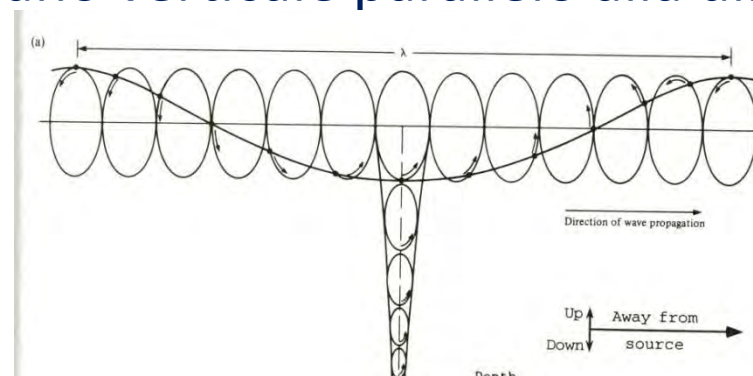
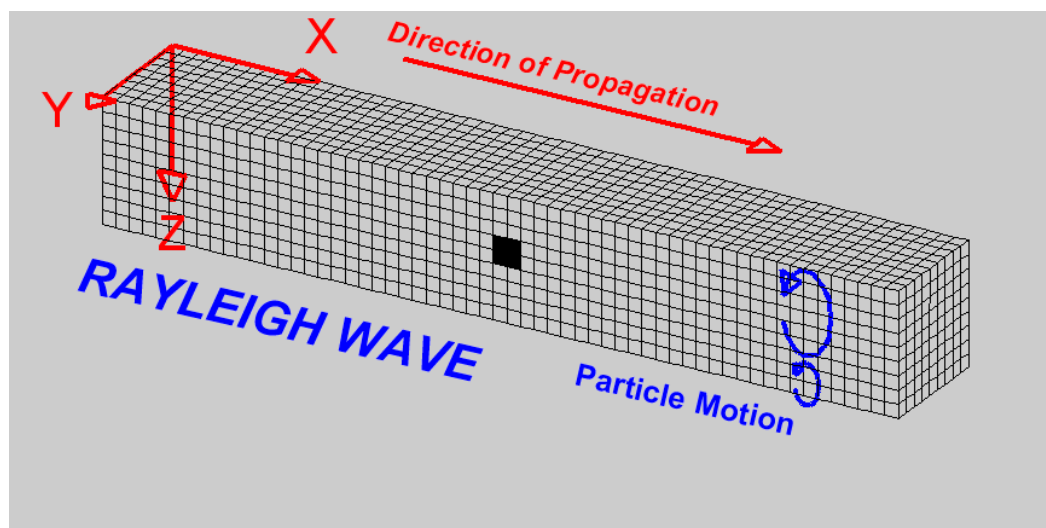
(b)

Inoltre le sorgenti poste alla superficie del suolo tendono a produrre una grande quantità di onde superficiali

Onde di Rayleigh

Dato che sono rilevabili con sensori verticali, l'uso delle onde di Rayleigh è quello più diffuso. Sono generate dall'interferenza costruttiva di onde P e onde S_v (onde S polarizzate sul piano verticale) incidenti sulla superficie libera del terreno

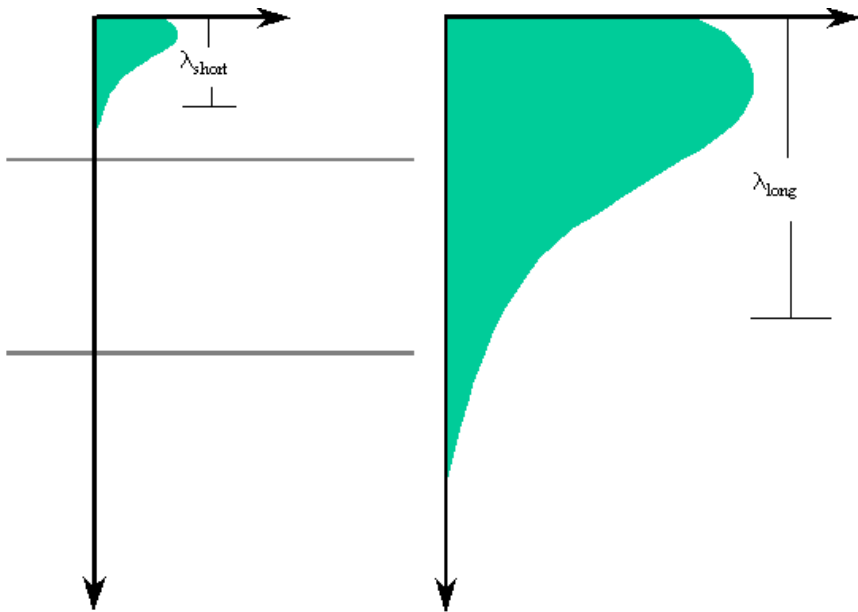
Sono onde con polarizzazione ellittica su un piano verticale parallelo alla direzione di propagazione (ground roll)



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

L'ampiezza delle onde superficiali 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 o della frequenza f dell'onda mediante la relazione

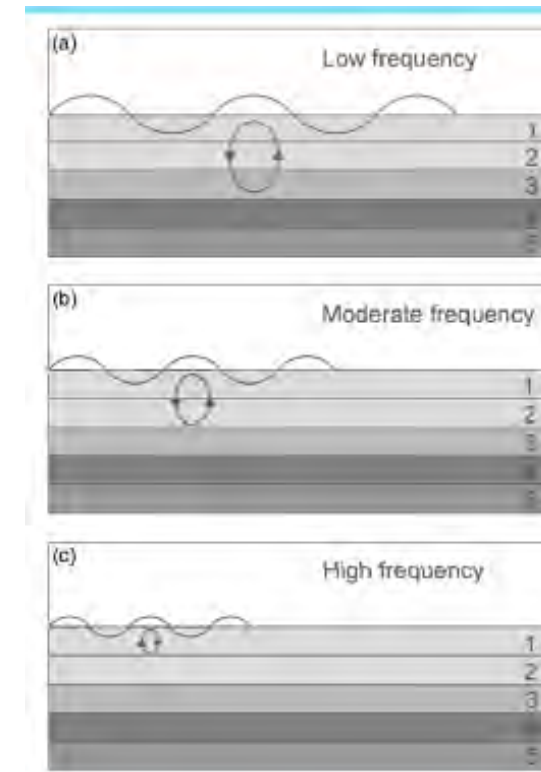
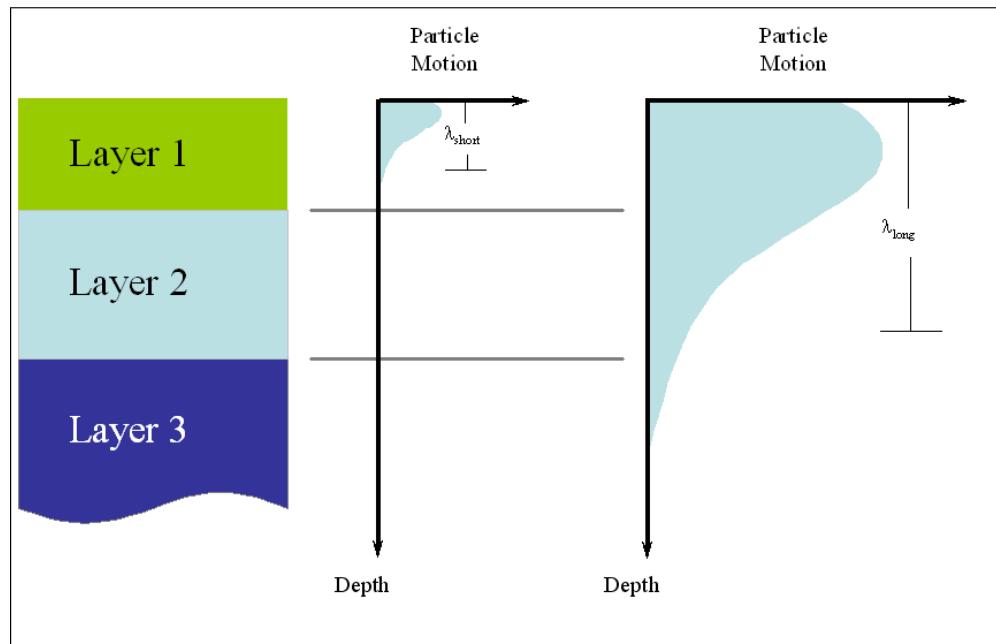
$$\lambda = V_R \cdot T = V_R / f$$

Quindi, a parità di velocità di fase (V_R), 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 $0.5-0.8\lambda$

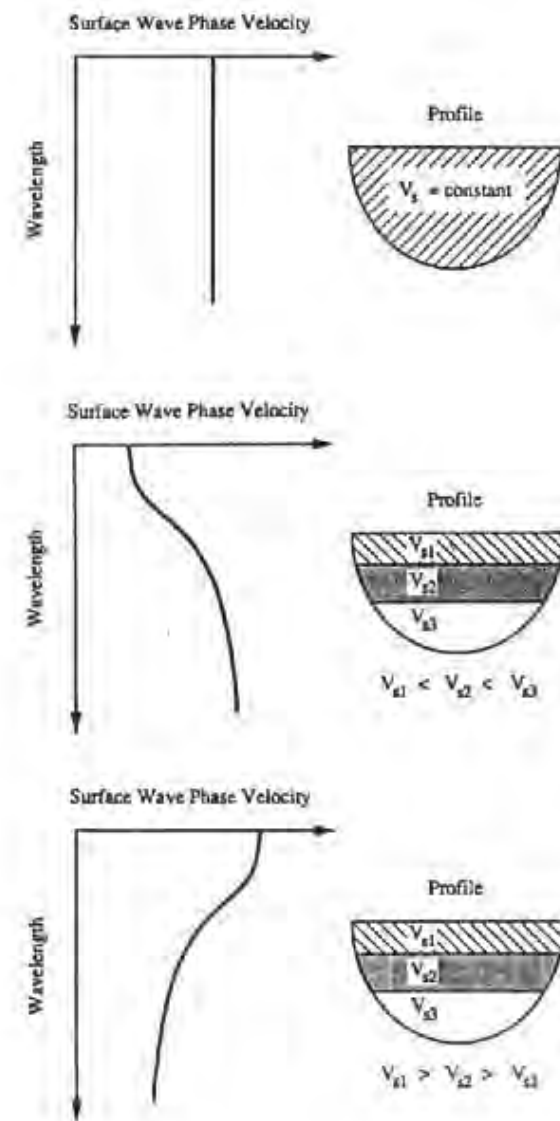
Quindi è ragionevole aspettarsi che, in presenza di variazioni delle velocità di propagazione che cambiano con la profondità, le velocità di propagazione delle onde superficiali cambino in funzione della relativa lunghezza d'onda o del loro periodo o frequenza (**Dispersione**)

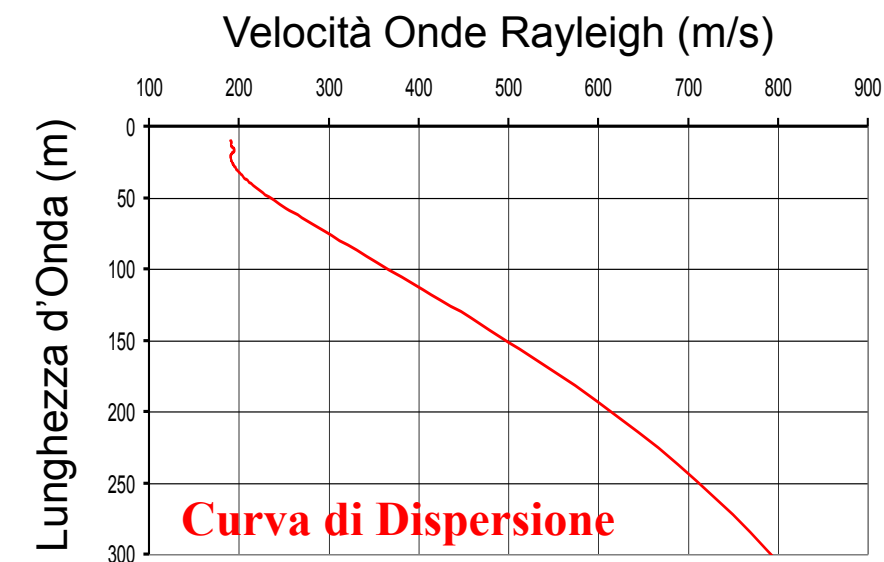
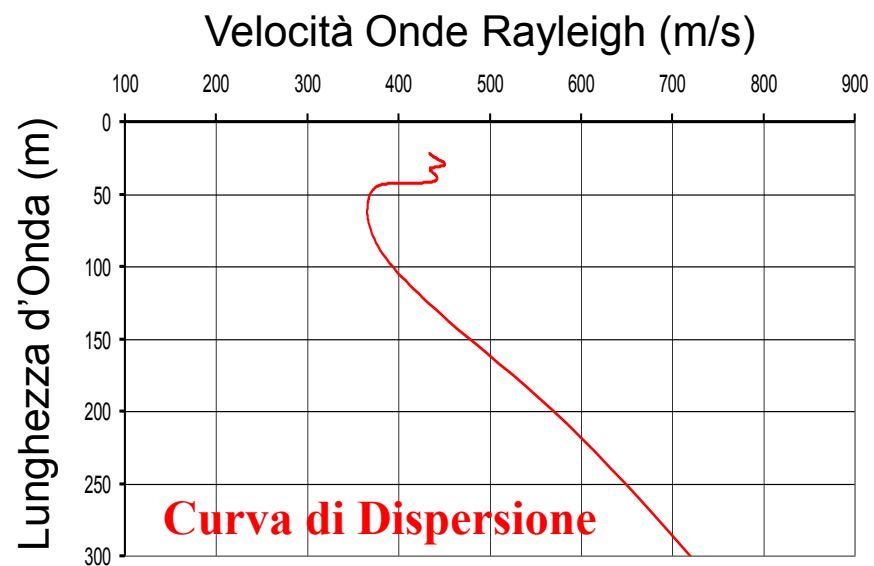
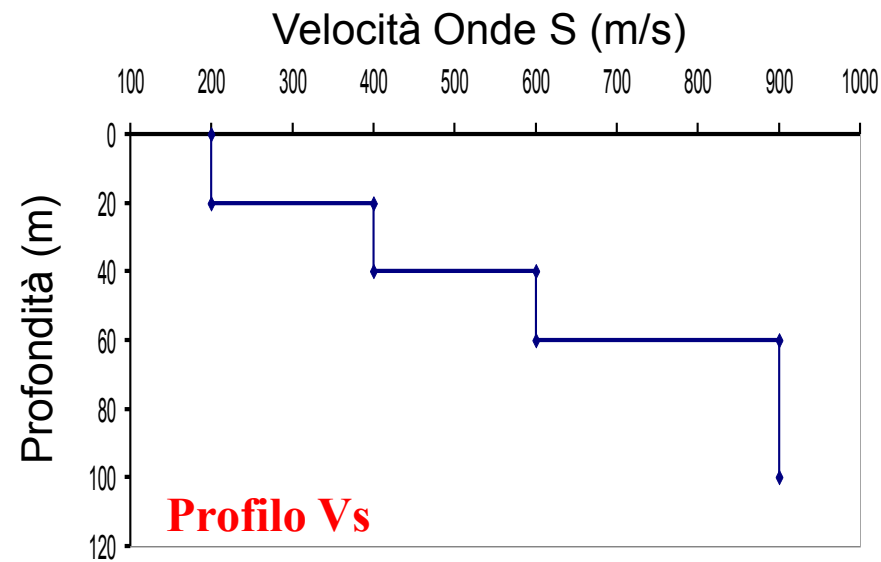
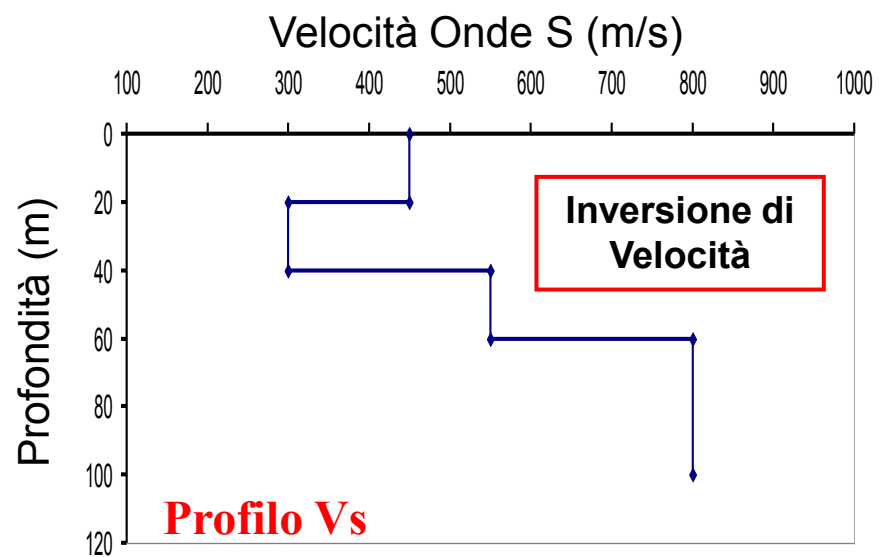


L'andamento delle velocità di fase in funzione della lunghezza d'onda o della frequenza (o del periodo) è detta **curva di dispersione**

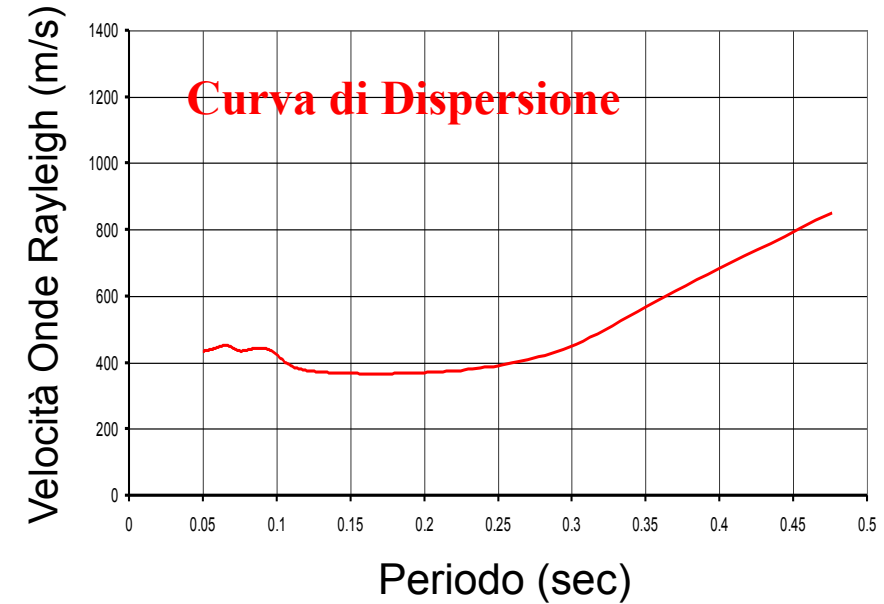
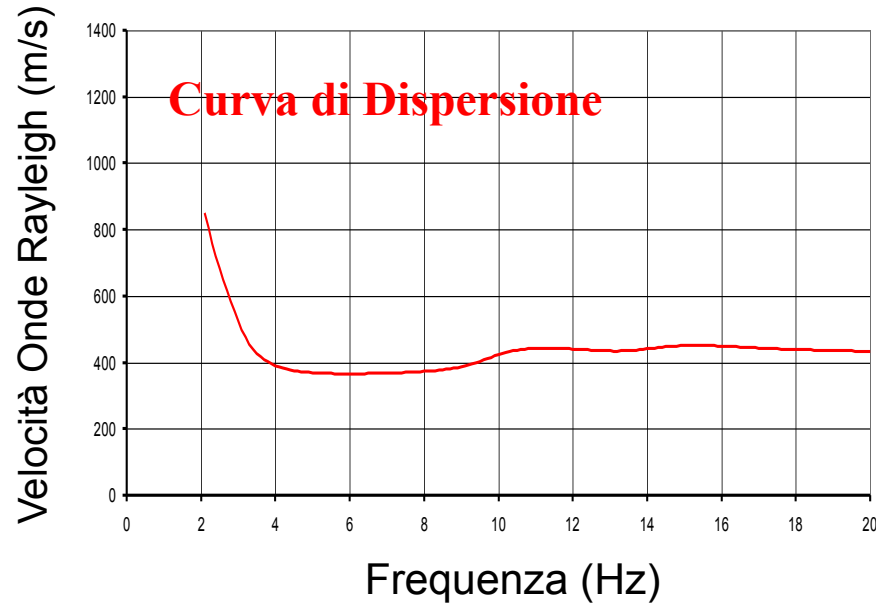
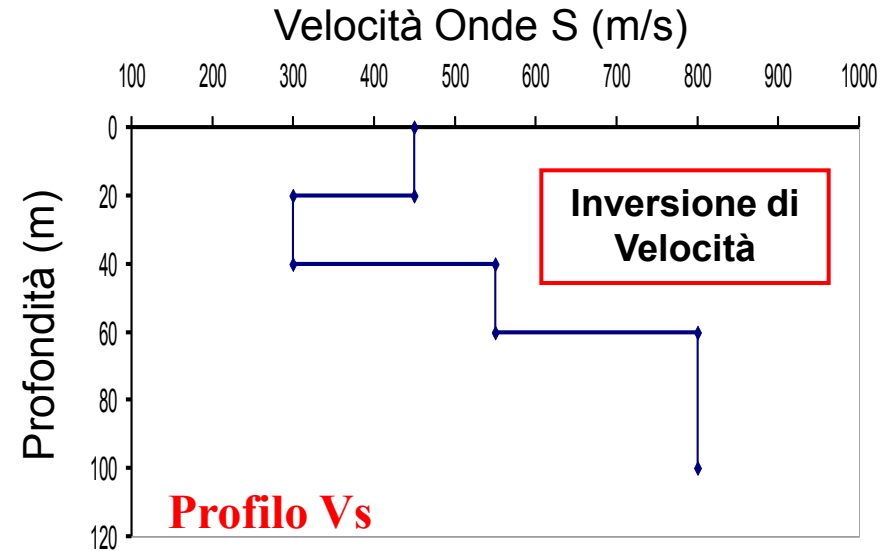
L'andamento della curva di dispersione fornisce informazioni sul profilo di velocità nel sottosuolo

In particolare, si vede che l'andamento della velocità di fase delle onde superficiali in funzione della relativa lunghezza d'onda dipende (in modo non lineare) dal profilo di velocità delle onde S

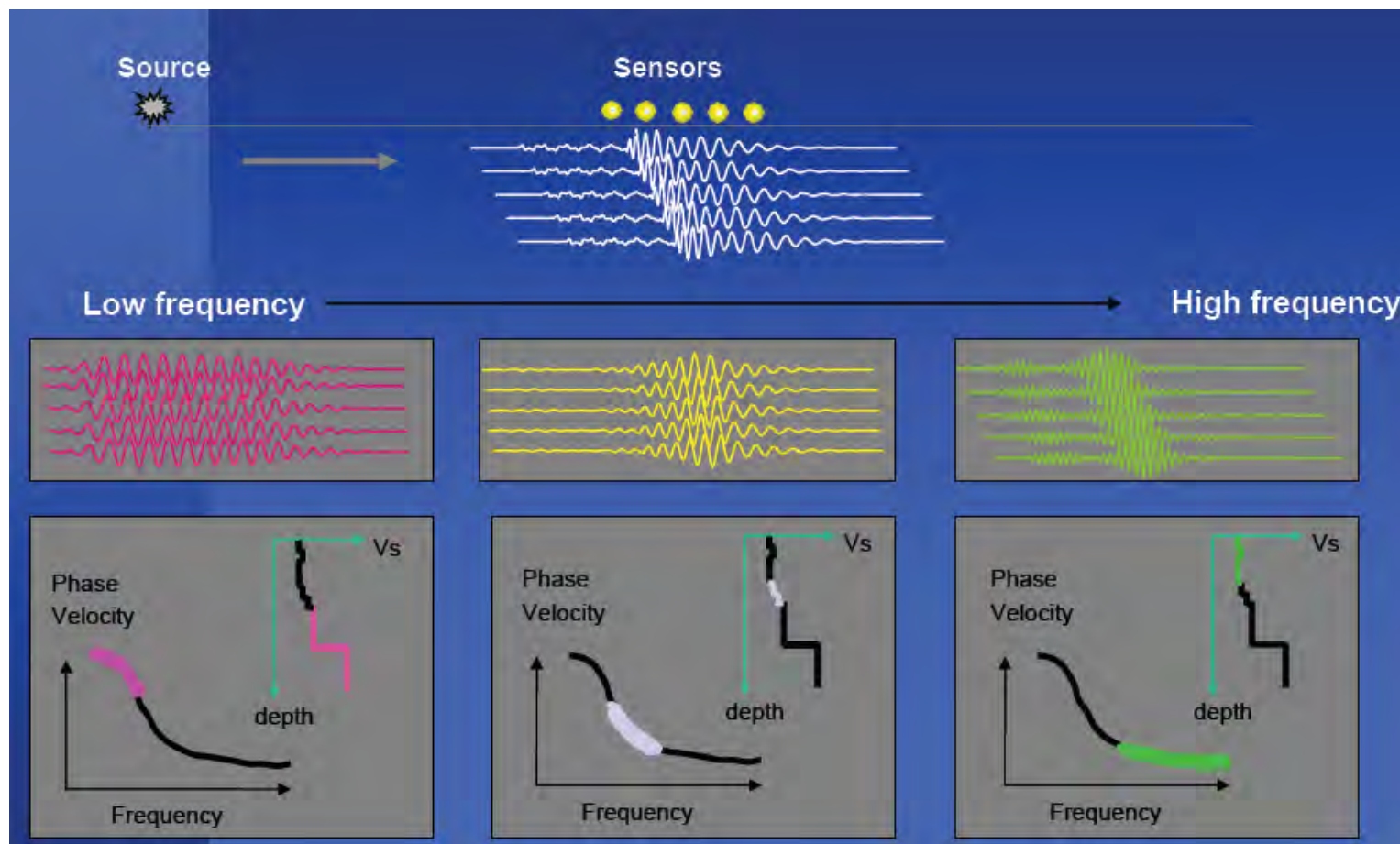




Naturalmente, rappresentazioni della curva di dispersione in termini funzione del periodo o della frequenza sono del tutto equivalenti



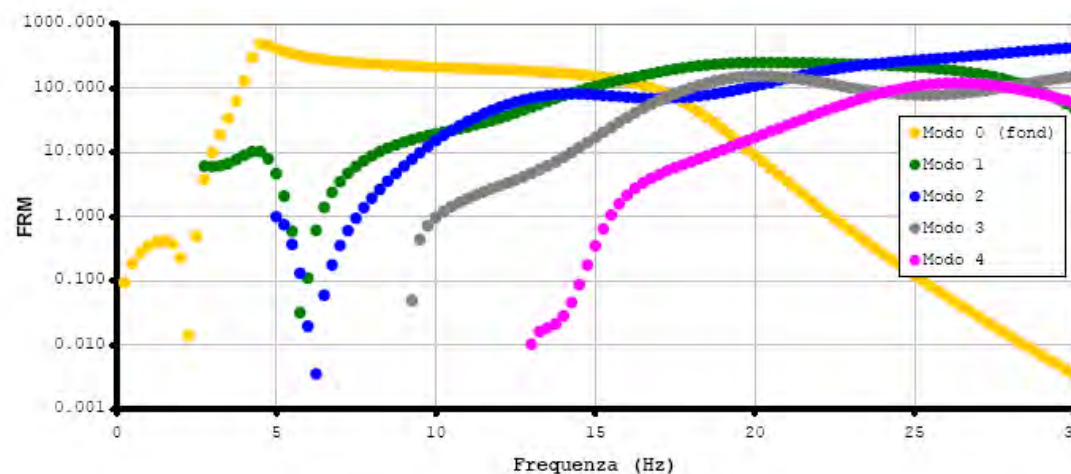
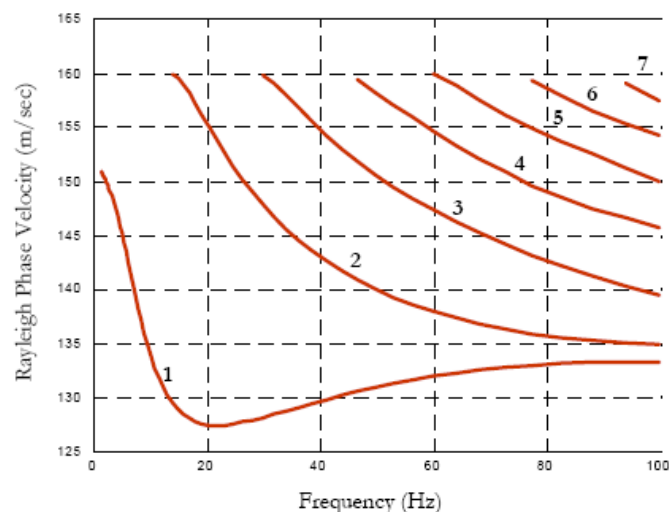
In pratica, è possibile associare a ciascuna parte della curve di dispersione l'effetto di una diversa porzione di sottosuolo: maggiore è la frequenza relativa al valore di V_R curva e minore è la profondità dei materiali che la influenzano



Esiste però una complicazione. In mezzi stratificati l'interferenza delle onde di volume alla superficie può essere più articolata generando onde Superficiali possono che presentano diversi **Modi di Propagazione**

I modi superiori, a parità di frequenza di vibrazione, subiscono l'effetto di strati più profondi rispetto a quelli del modo fondamentale

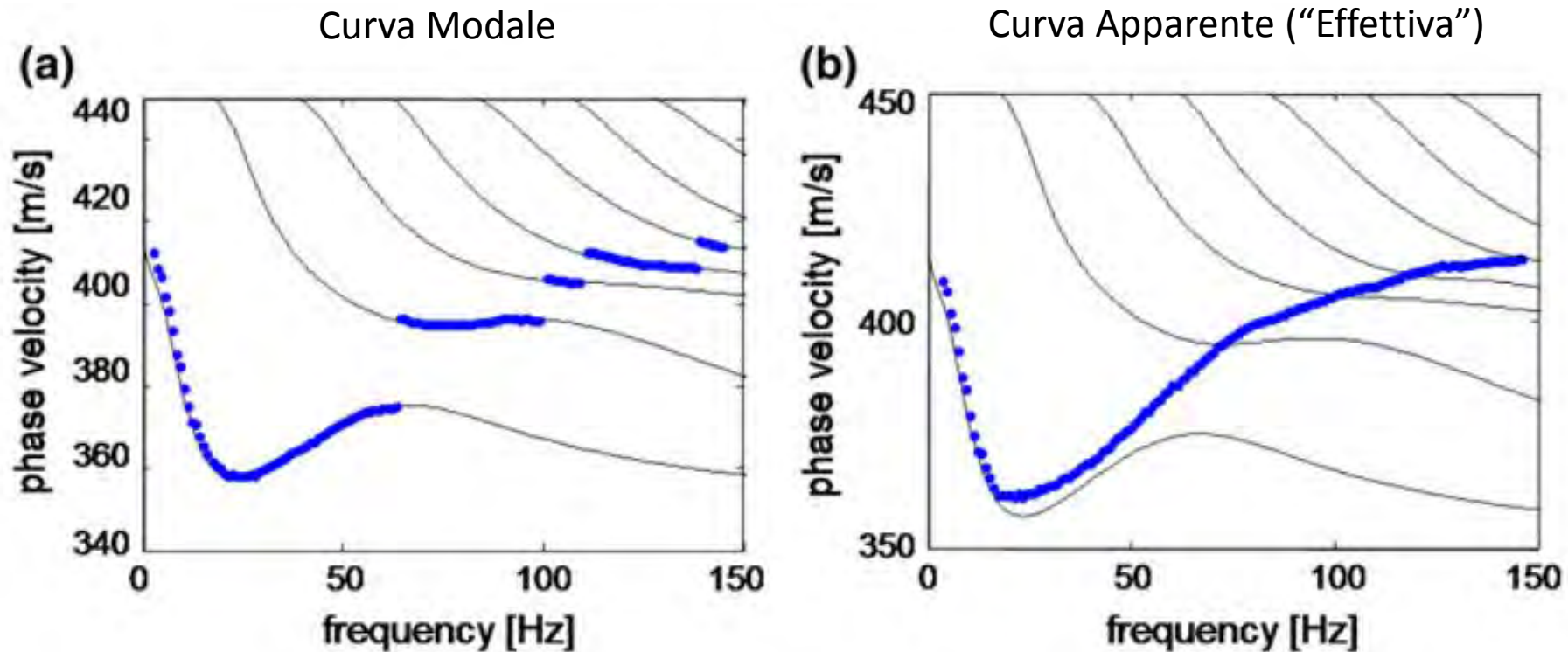
Ciascun modo darà quindi origine ad una propria curva di dispersione ed una propria energia
Nei mezzi con valori di V_s crescenti con la profondità, il modo fondamentale solitamente è quello dominante, ma questo non è vero negli altri casi



Energia
associata ai
diversi modi

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)

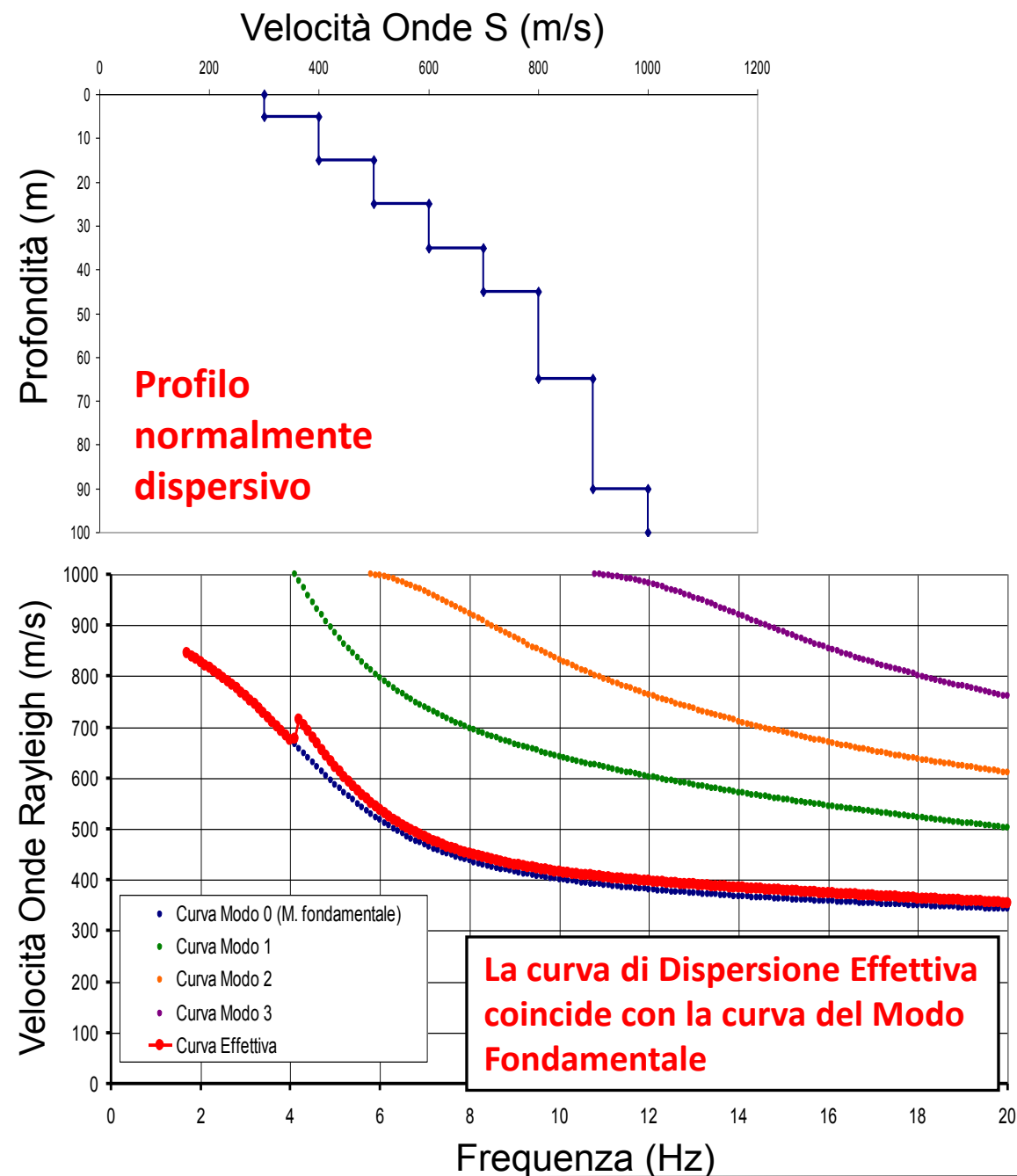
Dato che l'energia si distribuisce fra i modi in modo complesso è necessario disporre di un sistema di acquisizione in grado di distinguere i diversi modi



Più spesso accade che i modi si 'fondano' dando origine a possibili errori di interpretazione

La curva che tiene conto della diversa energia dei modi è detta **curva di dispersione effettiva** nella quale viene evidenziata una velocità “apparente” delle onde superficiali ovvero la velocità equivalente ad un’onda rappresentativa dell’insieme delle onde dei diversi modi.

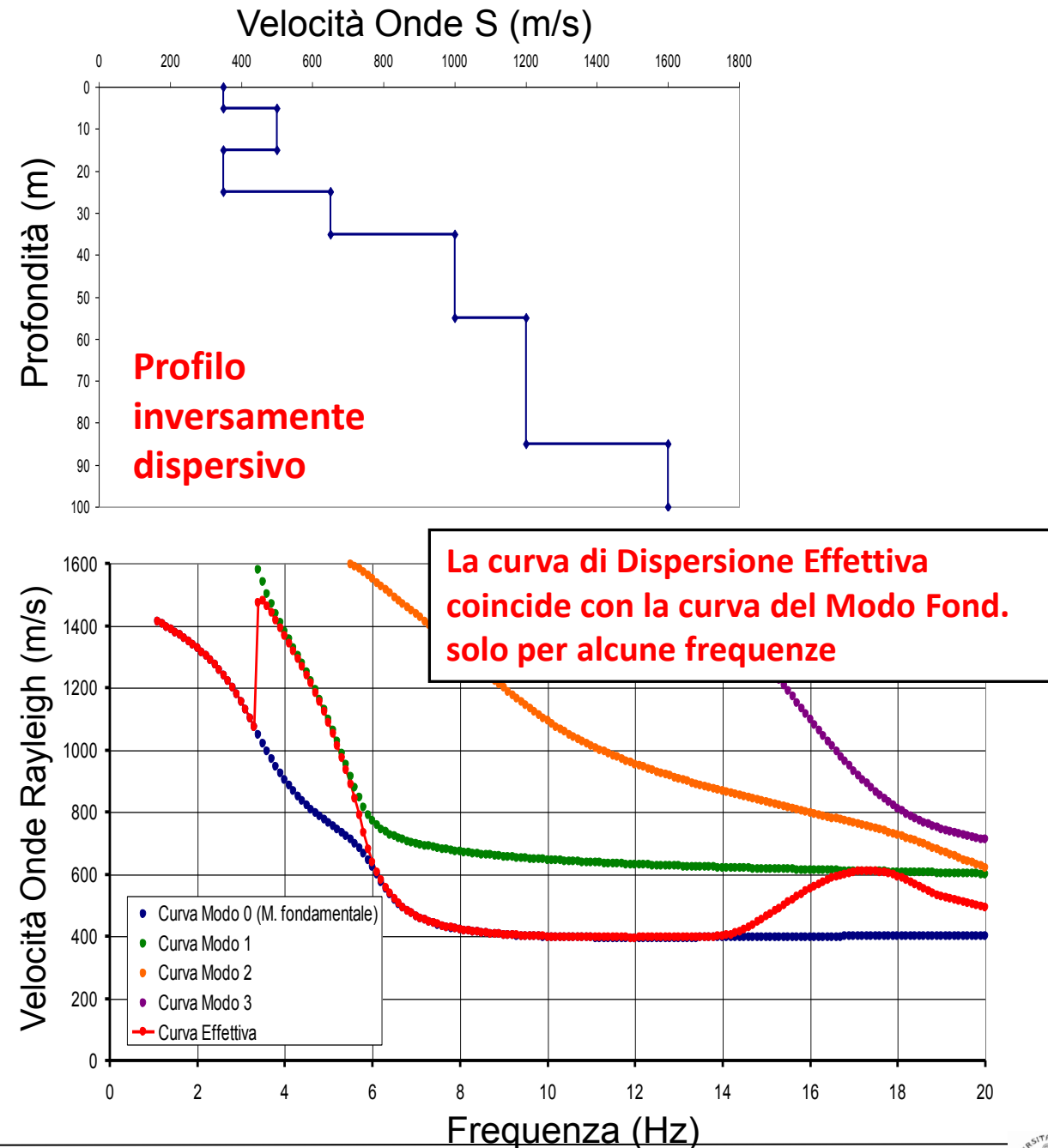
In pratica, la curva effettiva è una combinazione delle diverse curve modali “pesate” in base al loro specifico contenuto energetico nel sito. Nel caso di profili normalmente dispersivi la curva di dispersione effettiva coincide con la curva relativa al modo fondamentale (quello in questo caso più energetico)



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

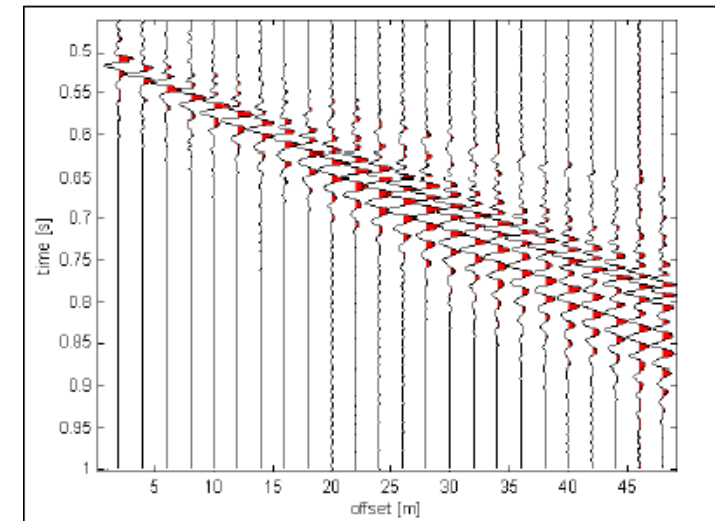
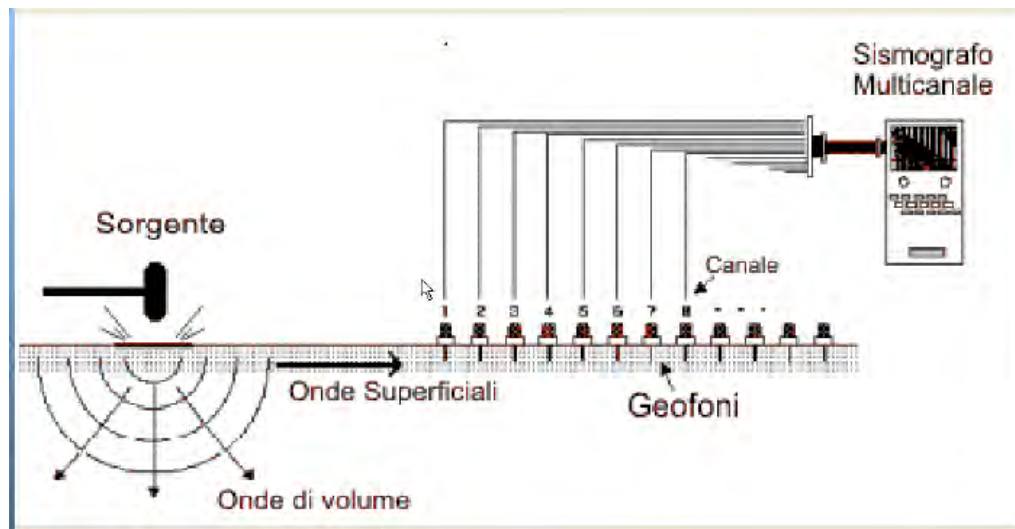
Un vantaggio è che la curva effettiva può essere modellata teoricamente ed utilizzata in apposite procedure di inversione

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

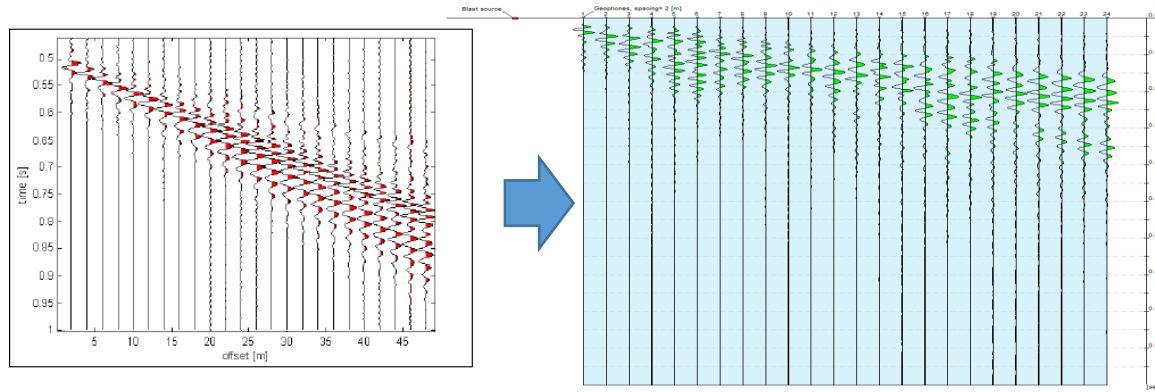


Il problema è ora quello di ricavare sperimentalmente la curva di dispersione delle onde superficiali: questa curva dovrà poi **essere invertita** per risalire al profilo di V_s

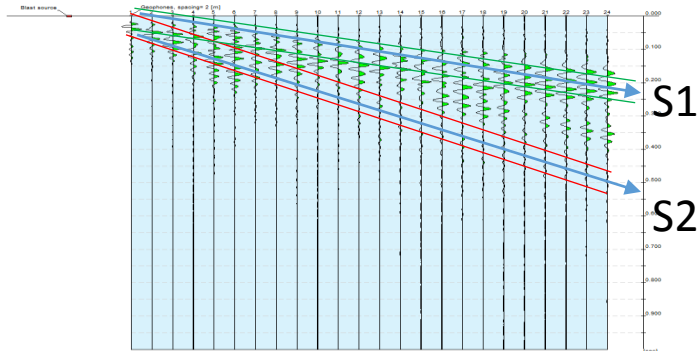
L'approccio ad oggi più utilizzato (anche se non l'unico) è quello di misurare le velocità fase delle onde di Rayleigh generate da una sorgente puntiforme usando un'antenna di geofoni verticali equispaziati disposti in linea (metodo MASW)



In linea di principio, la procedura di analisi è concettualmente quella illustrata di seguito ('slant stack')



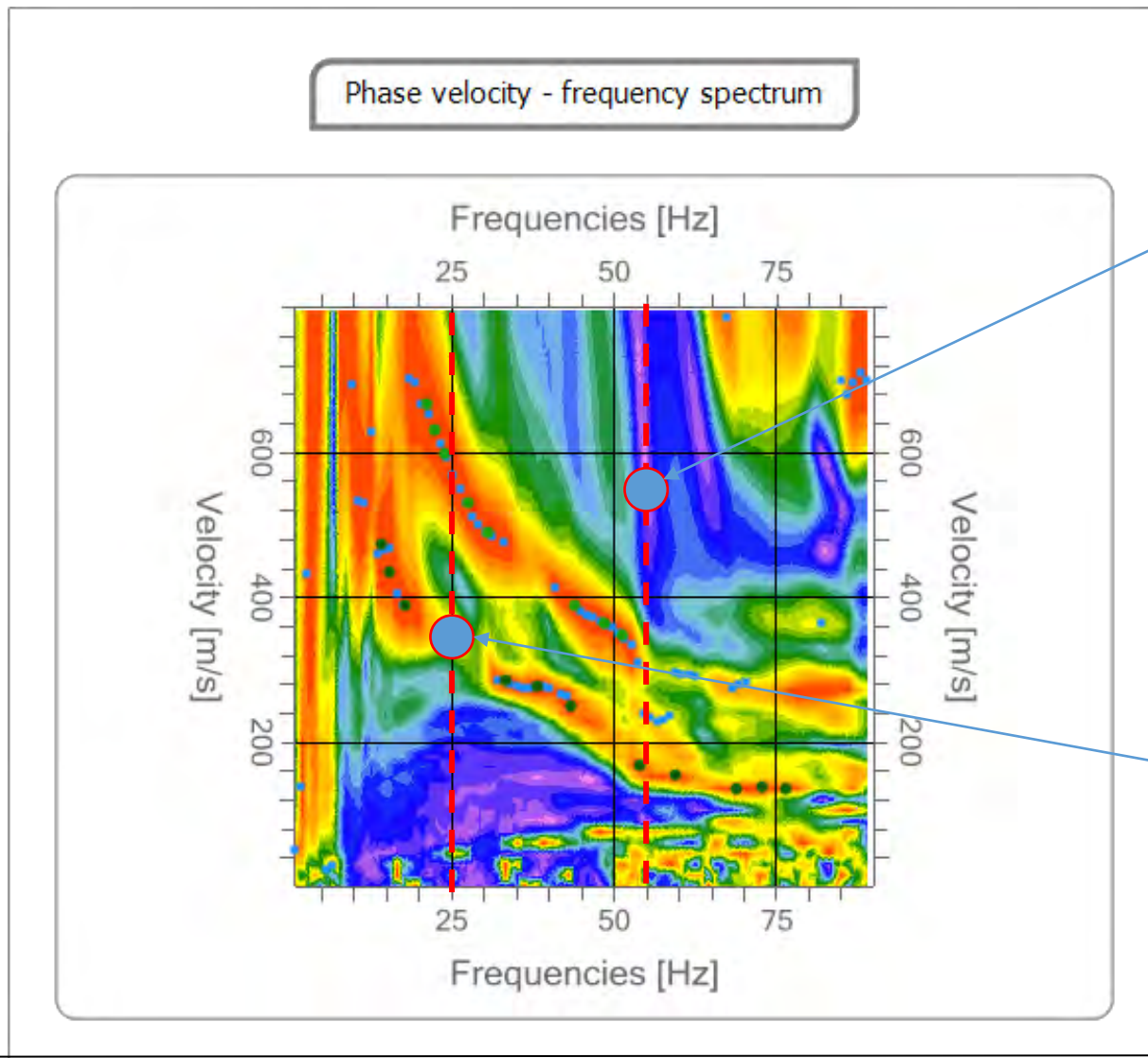
Il segnale registrato a ciascun geofono viene filtrato isolando un piccolo gruppo di frequenze di vibrazione



Dato che le onde superficiali si propagano in linea retta lungo l'antenna la propagazione di una singola fase avviene lungo una retta sul grafico delle dromocrone. Vengono quindi sommati (stacking) i valori osservati lungo diverse bande inclinate a ciascuna delle quali corrisponde una diversa possibile velocità di propagazione

Maggiore è il valore dello stacking (S) e maggiore è la coerenza corrispondente al relativo valore di velocità

I colori corrispondono ai valori della coerenza misurata assumendo una data velocità di propagazione ad una frequenza fissata

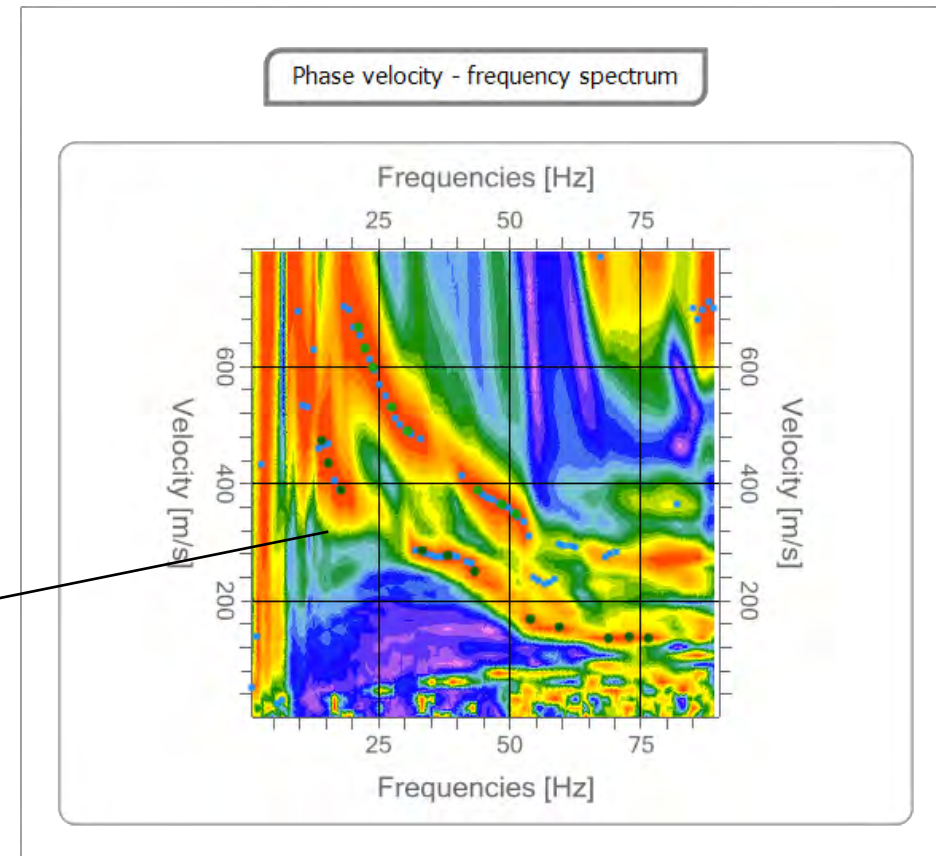
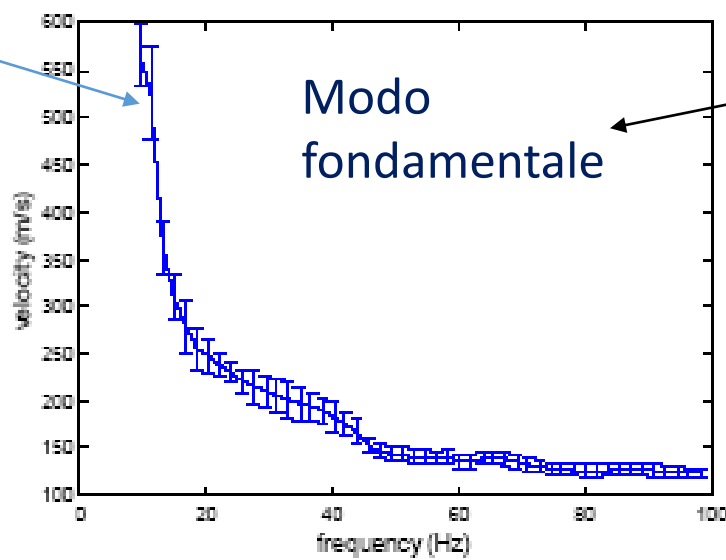


Valore delle somme S per la frequenza di 60 Hz e la velocità di prova di 500 m/s

Valore delle somme S per la frequenza di 25 Hz e la velocità di prova di 350 m/s

Quindi, utilizzando queste tecniche di analisi risulta possibile identificare non solo il modo di vibrazione fondamentale ma anche gli eventuali modi superiori presenti e definirne le relative curve di dispersione

Le barre verticali indicano l'intervallo di valori ugualmente plausibili sulla base delle misure **(Incertezza sperimentale)**



Queste curve andranno poi interpretate ed invertite per ricavare informazioni utili sul profilo di velocità nel sottosuolo

Esistono ovviamente limiti al potere risolutivo del metodo

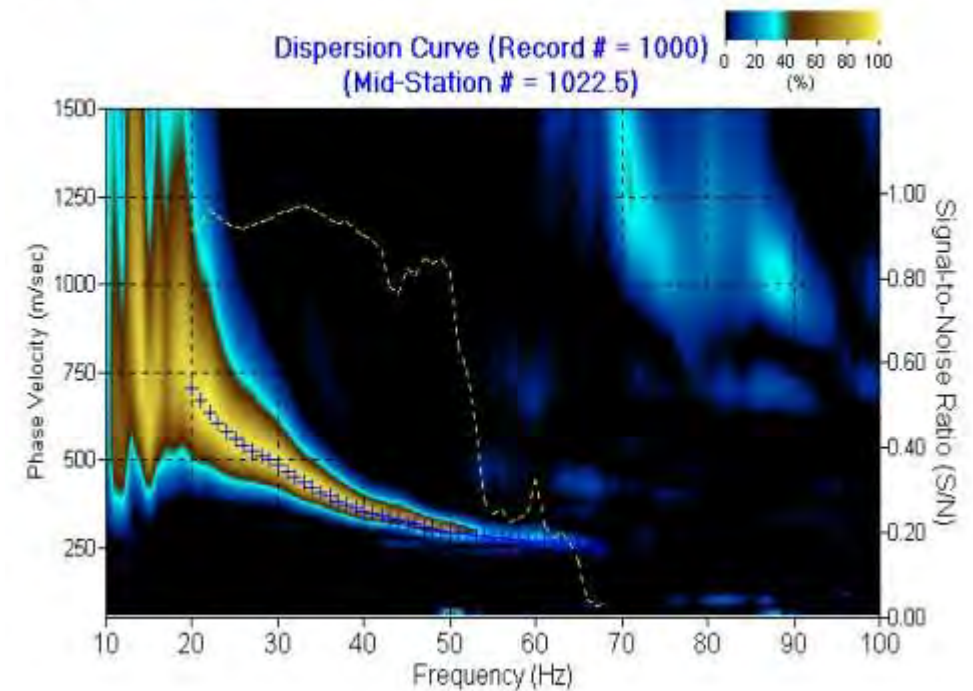
Per esempio, dati due geofoni posti ad una distanza r , maggiore è la velocità di fase delle onde di Rayleigh e maggiore è l'incertezza sul valore di velocità misurabile alla frequenza f_c di campionamento

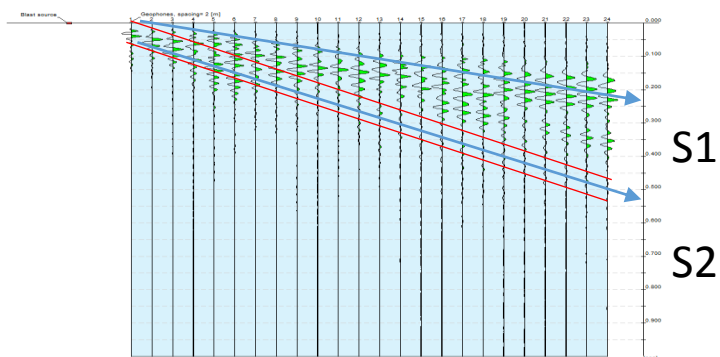
$$\left[\delta V_R(f) \right]_{\min} \equiv \frac{\left[V_R(f) \right]^2}{f_c \cdot \langle r \rangle}$$

Infatti si vede spesso che in bassa frequenza i valori di coerenza sono simili per molti valori della velocità di fase: quindi i valori informativi degli strati più profondi sono quelli meno vincolati

Il problema si aggrava quando le velocità di fase sono più alte: il problema può essere alleviato distanziando maggiormente i geofoni

2. Dispersion Curve Extraction--Frequency-Phase Velocity

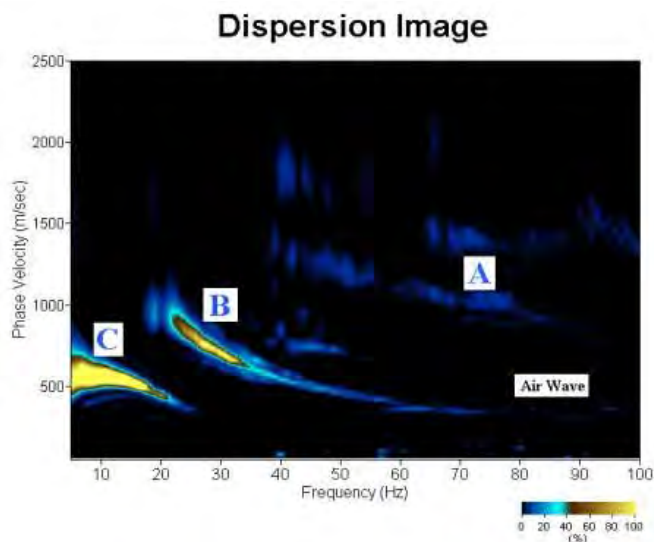




Ovviamente, maggiore è in numero di geofoni e maggiore è il potere risolutivo del sistema: i vari valori dello stacking avranno maggiori differenze

Inoltre, stendimenti lunghi permetteranno di differenziare meglio le fasi che viaggiano a velocità diverse alla stessa frequenza (modi superiori)

Tuttavia, l'uso di stendimenti molto estesi implica l'uso di sorgenti abbastanza energetiche da permettere la registrazioni su distanze grandi e questo diventa difficile in presenza di disturbi ambientali (traffico ecc.)



Per migliorare il rapporto segnale-rumore vale la pena di sommare l'effetto di più energizzazioni prima di eseguire l'analisi. Vale anche la pena di ripetere il tutto posizionando la sorgente all'altro capo dello stendimento e confrontare i due risultati per valutare la possibile presenza di variazioni laterali

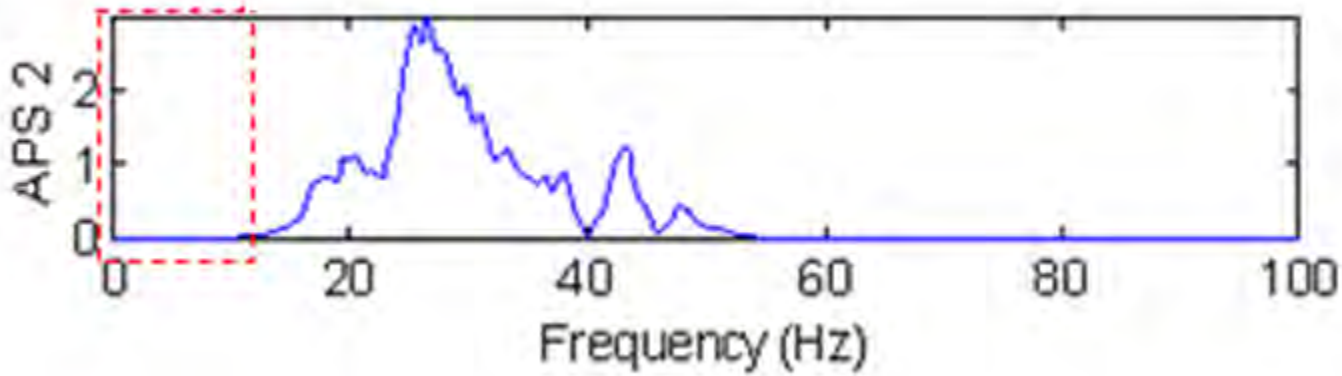
Virtualmente, le profondità di esplorazione raggiungibili dipendono dalla massima lunghezza d'onda misurabile con lo stendimento di sensori disponibile

Stime empiriche hanno messo in evidenza che lunghezze d'onda di dimensioni fino al **doppio della lunghezza massima** dello stendimento sono **effettivamente misurabili**

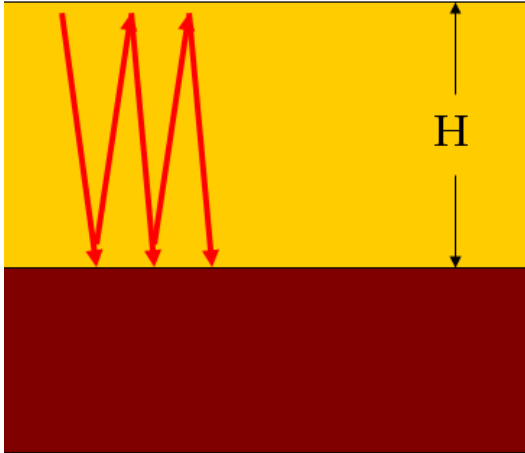
D'altro canto, una stima conservativa della profondità di esplorazione indica un valore pari a circa 0.5-0.8 della massima lunghezza d'onda misurabile

Quindi, in linea di principio, la profondità **massima raggiungibile è circa pari a quelle delle dimensioni** dello stendimento

Esistono però altri importanti limiti alla profondità di esplorazione



Innanzitutto con le sorgenti più comuni è difficile generare segnali con energia significativa in bassa frequenza (<10 Hz) e questo implica che le onde superficiali generate artificialmente hanno in genere lunghezze d'onda corte



Inoltre, la presenza di forti contrasti di impedenza sismica a bassa profondità produce un intrappolamento dell'energia sismica nello strato sovrastante vicino alla superficie. Data la relazione fra frequenza e lunghezza d'onda, le frequenze più corte saranno meno energetiche di altre fino a scomparire nel caso di contrasti di impedenza particolarmente intensi e questo rende il sistema 'cieco' riguardo alle proprietà del mezzo più profondo

In sostanza risulta difficile scendere sotto i 30m di profondità con il metodo MASW e comunque non è possibile avere informazioni sulle formazioni al di sotto di un forte contrasto di impedenza sismica

Per valutare quindi la qualità di una misura della curve dispersione è necessario disporre di diversi elementi che vanno definiti a corredo della misura. Per semplificare la memorizzazione di queste informazioni, il Centro MS ha predisposto delle schede che verranno fornite ai professionisti

Profilo Campagna sismologica: RISP/PAZ/IONV/MAJ/V

COORDINATE

Campagna		Data	
Profilo		Operatore	
Strumento		Condizioni Meteo	
Sorgente		Forma Dhr	
Frequenza Grendi		Spaziatura Geofoni	
Esig. Campionamento		Long. registrazione	

Coordinate

Inizio Profilo		Fine Profilo	
Latitudine		Latitudine	
Longitudine		Longitudine	
Quota		Quota	

Mappa

Foto

Scheda grafica

Esposizione 01

Esposizione

Esposizione N°	Posizione Esposizione	Nome file	Posizione Ricevitori	Tracce multiple	Note (Rumore, Esposizione, stack, Esposizione)

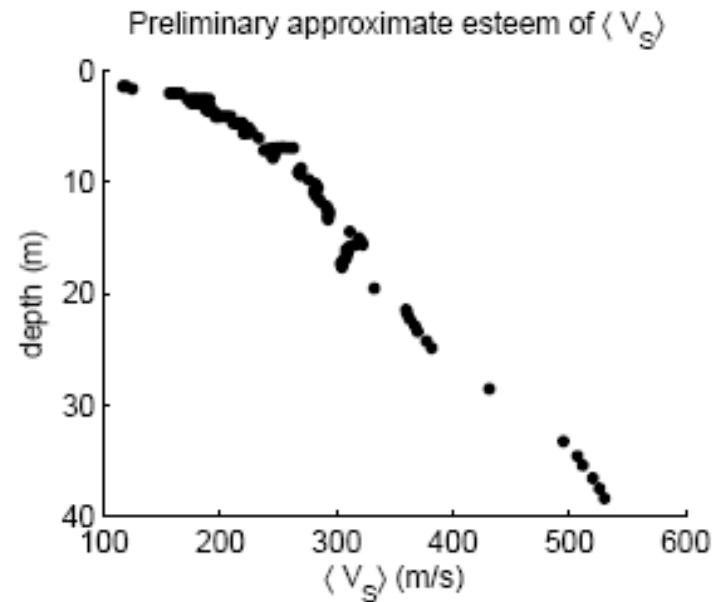
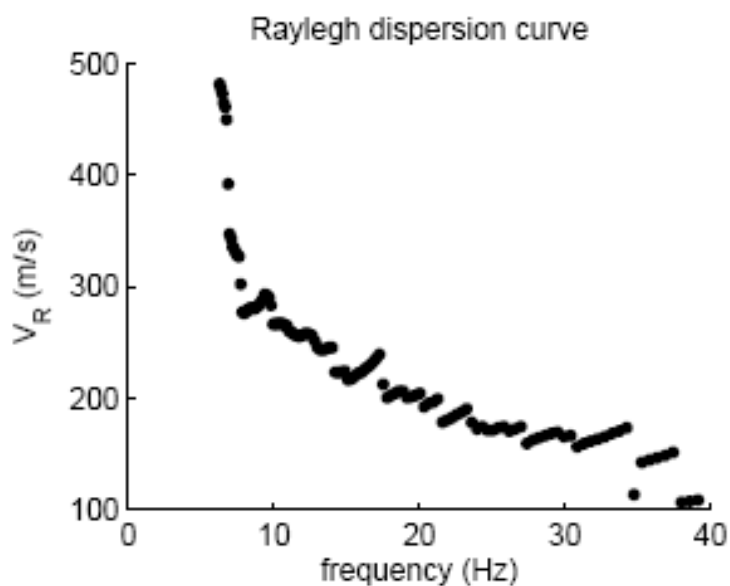
Continua

Si ricorda che i dati originali registrati dall'apparato andranno comunque consegnati in formato standard a corredo della stima della curva dispersione

Può essere interessante disporre di una prima interpretazione semi-qualitativa e diretta della curve di dispersione senza ricorrere a procedure di inversione più sofisticate

L'idea di base è che la velocità delle onde di Rayleigh corrispondenti ad una certa lunghezza d'onda λ siano rappresentative della velocità media V_{sh} delle onde S fino ad una profondità dell'ordine h di una frazione di λ ($h \approx C \cdot \lambda$ dove $C=0.5-0.8$)

In questa ipotesi, la curva di dispersione $V_r(f)$ può essere convertita in una curva V_{sh} (velocità media delle onde s fino alla profondità h) nelle coperture



$$h \approx 0.8 \frac{V_r(f)}{f}$$
$$V_s h \approx 1.1 V_r(f)$$

Questa curva può essere regolarizzata assumendo un andamento del tipo

$$V_s h \approx e^a h^b \qquad V_s(h) \approx \frac{e^a}{1-b} (1+h)^b$$

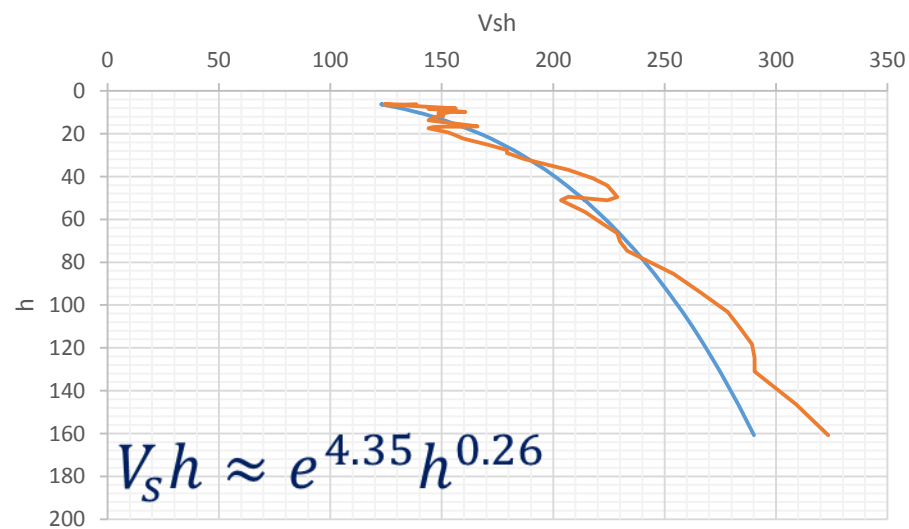
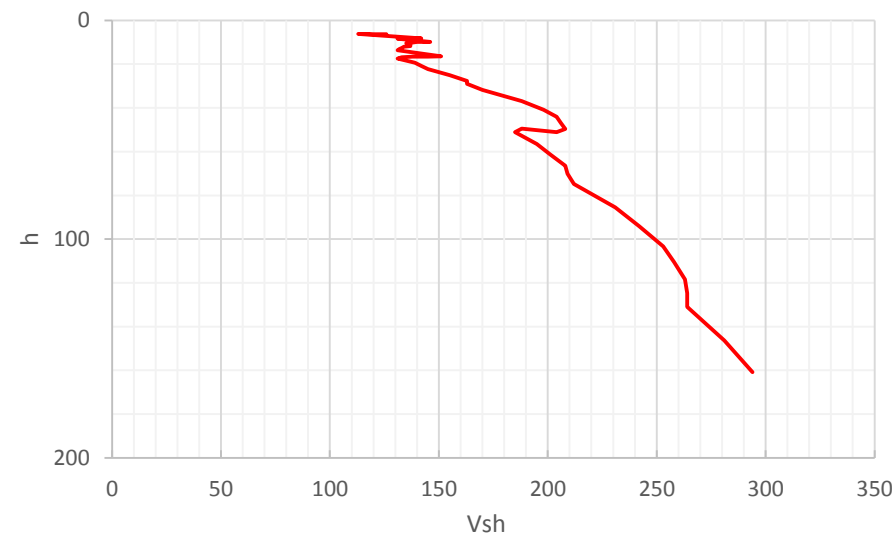
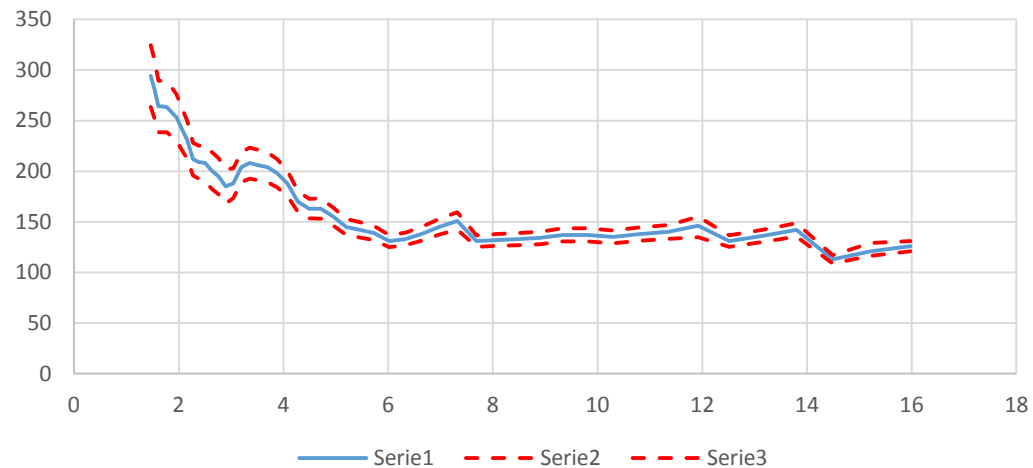
Dove $V_s(h)$ è il profilo di **velocità equivalente** alla curva delle velocità medie $V_s H$
I parametri a e b possono essere determinati empiricamente dalla curva di dispersione convertita

In particolare, ricavare a e b mediante una regressione lineare sulle coppie di valori $\ln(h)$, $\ln(V_s h)$ dove $\ln$ indica il logaritmo naturale dell'argomento

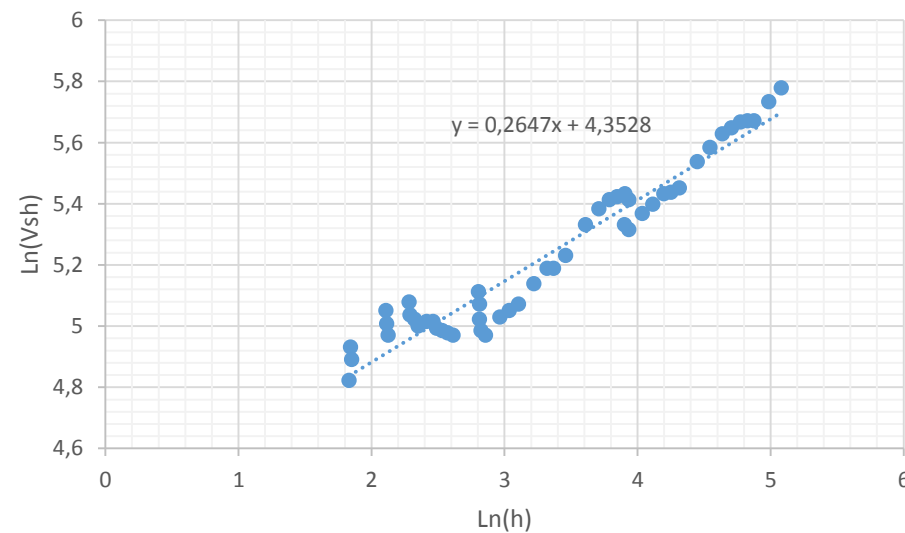
Si vede infatti che

$$\ln(V_s h) = a + b \ln(h)$$

Curva di dispersione

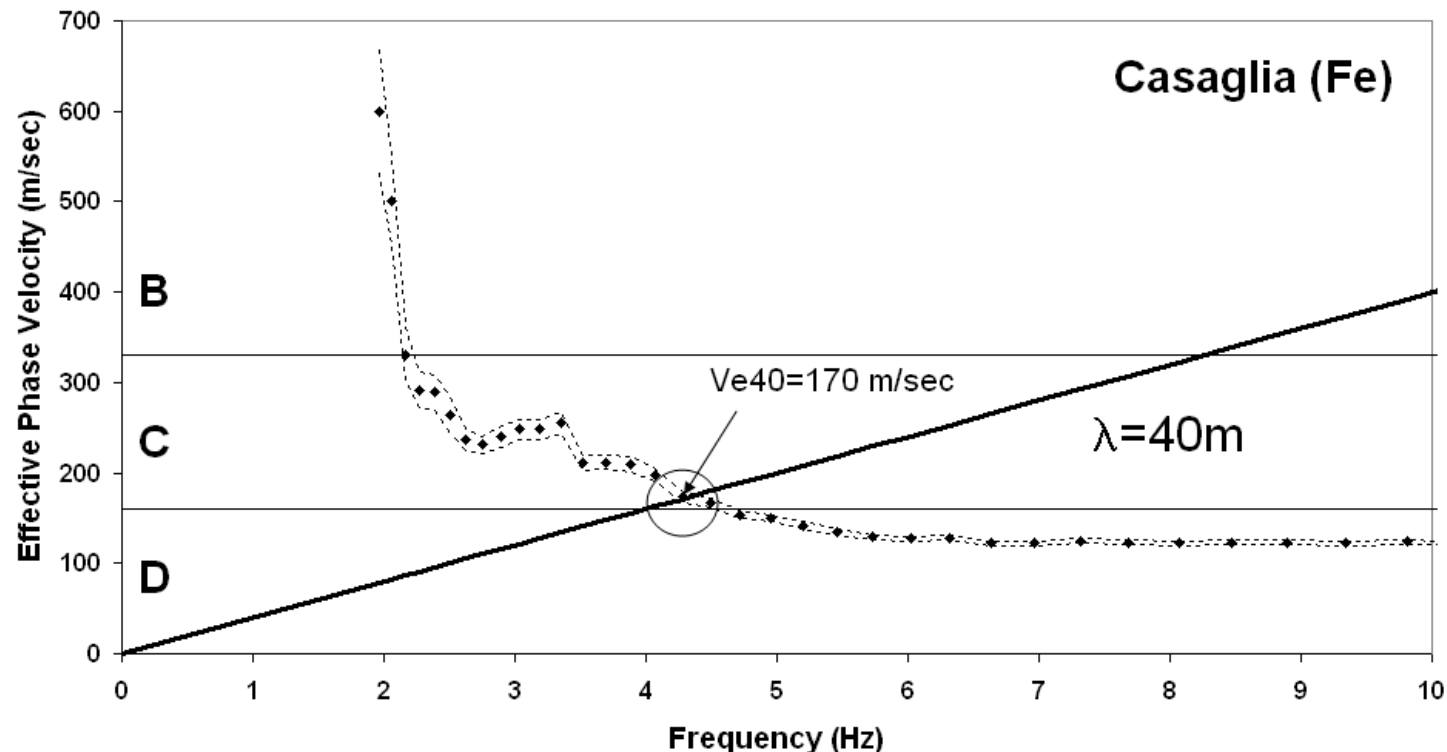


$$V_s(h) \approx 105(1 + h)^{0.26}$$



Una stima ancora più semplice per via grafica del Vs30 può essere effettuata valutando l'intercetta fra la retta di $V_s=40*f$ e la curva $V_s(f)$

Il valore stimato mediante una misura DH è risultato in questo caso pari a 180 m/s



Si tratta di una stima assai brutale ma robusta e capace di fornire risultati del tutto comparabili a quelli dedotti mediante una comune procedura di inversione

Misure a stazione singola delle vibrazioni ambientali (HVSR)

Negli ultimi anni, stanno sempre più prendendo piede (soprattutto nella MZS) tecniche di indagine basate sulla misura e l'analisi delle vibrazioni del terreno indotte da sorgenti non controllate

Ci si aspetta che le vibrazioni ambientali dipendano: dalla forma e dalla distribuzione delle sorgenti e dal rapporto esistente fra le sorgenti. Ma dipenderanno anche dalle modalità di propagazione dell'energia fra le sorgenti ed il sito di misura e quindi dalle caratteristiche locali 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

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

Numerose evidenze sperimentali e considerazioni teoriche hanno indicato che:

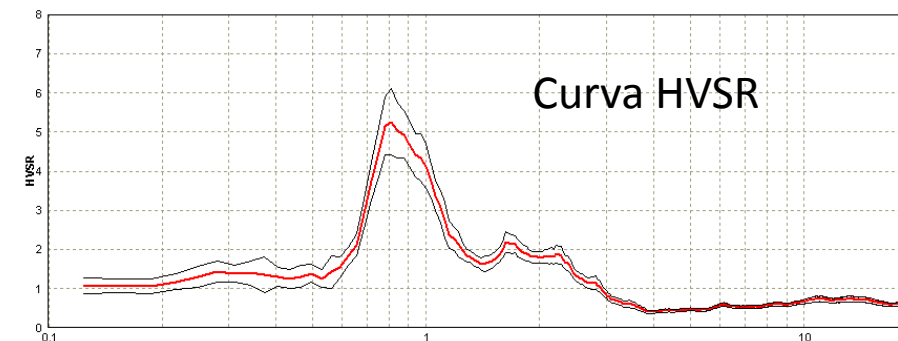
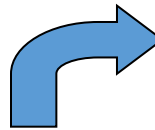
- 1. Se gli spettri medi delle vibrazioni ambientali sono calcolati per un intervallo di tempo sufficientemente lungo da includere una molteplicità di sorgenti distribuite circa uniformemente attorno al sito*
- 2. Se queste sollecitano in modo statisticamente uguale le componenti orizzontali e verticali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

Allora i rapporti spettrali medi H/V (HVSR - Horizontal to Vertical Spectral Ratios) in funzione della frequenza (curva H/V) sono funzione solo del sottosuolo: in particolare, la curva mostra dei massimi in presenza di fenomeni di risonanza sismica che corrispondono alle frequenze di risonanza delle coperture

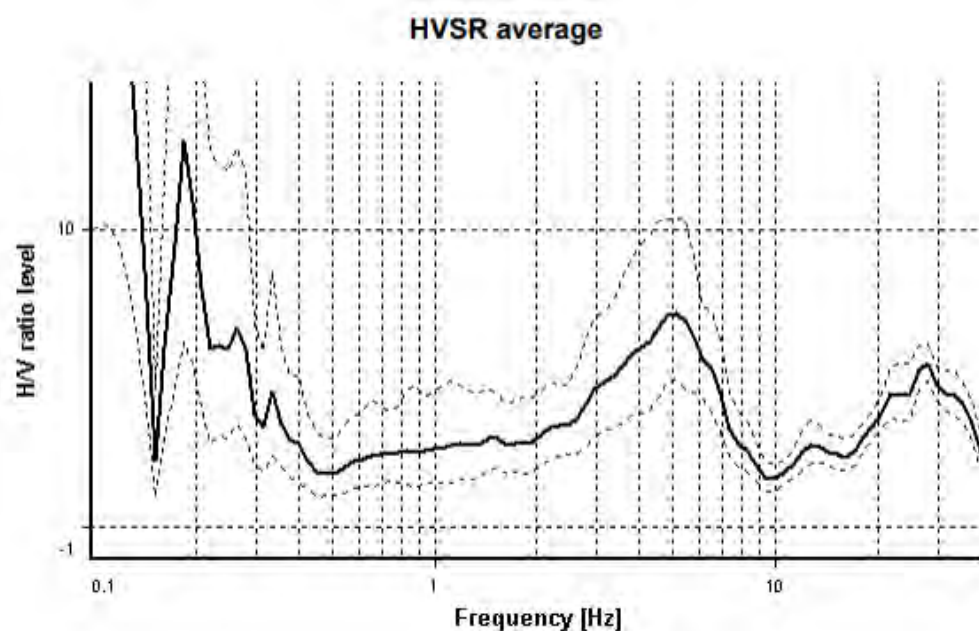
Quindi da misure di rumore risulta possibile risalire alle proprietà del mezzo, al netto del contributo delle diverse sorgenti

Il metodo di Rapporti Spettrali stazione singola è piuttosto semplice e richiede un solo operatore

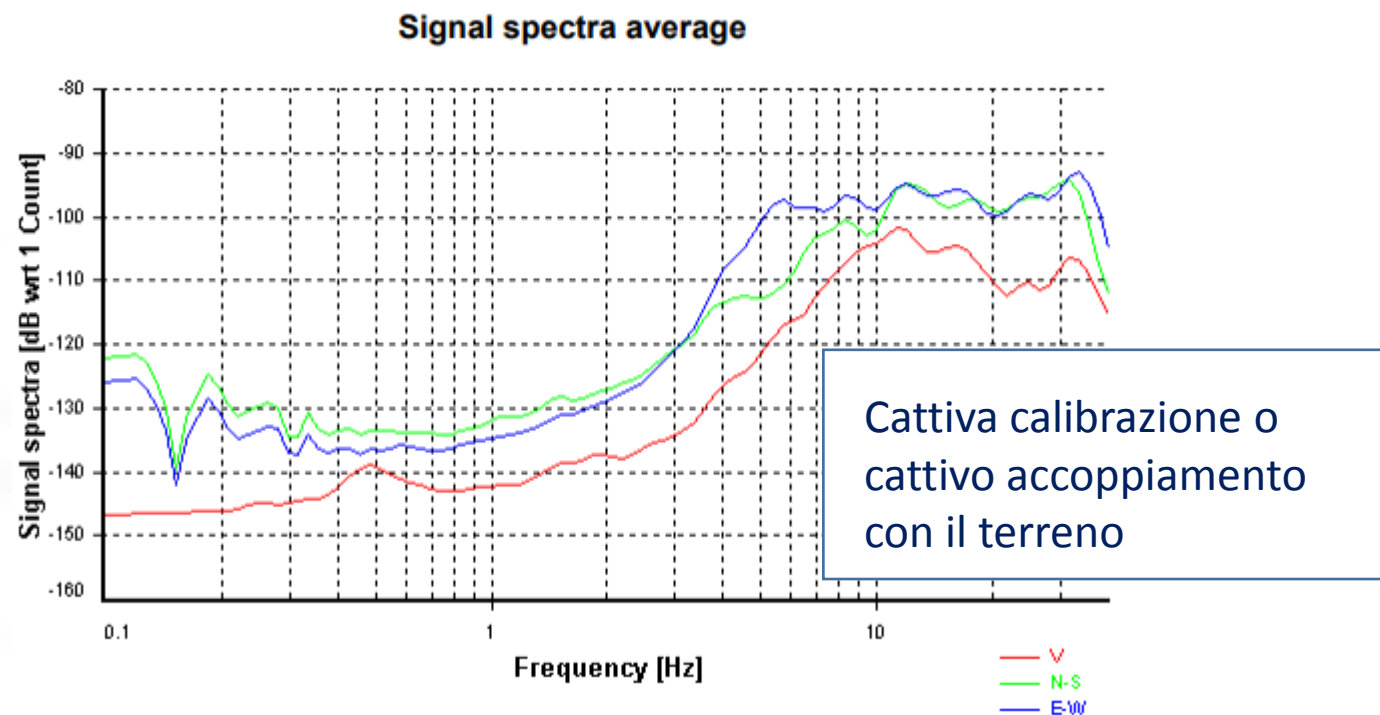
Si tratta infatti di misurare con un **sismometro** a tre componenti le vibrazioni ambientali presenti in un punto e quindi costruire una curva rappresentativa dei rapporti spettrali (H/V) in funzione della frequenza di vibrazione



Perché la misura possa essere utilizzabile, i sensori che operano nelle tre direzioni devono essere opportunamente equalizzati. La cosa va controllata prioritariamente confrontando gli spettri ottenuti nelle tre direzioni: un indizio di malfunzionamento è una componente del moto sistematicamente sottostimata su tutto l'intervallo di frequenze analizzato



Spesso la sola analisi dei rapporti spettrali (soprattutto in alcuni tipi di rappresentazione) non fa emergere il problema



Bisogna ricorrere alla rappresentazione degli spettri medi

Un elemento chiave è la corretta esecuzione della misura

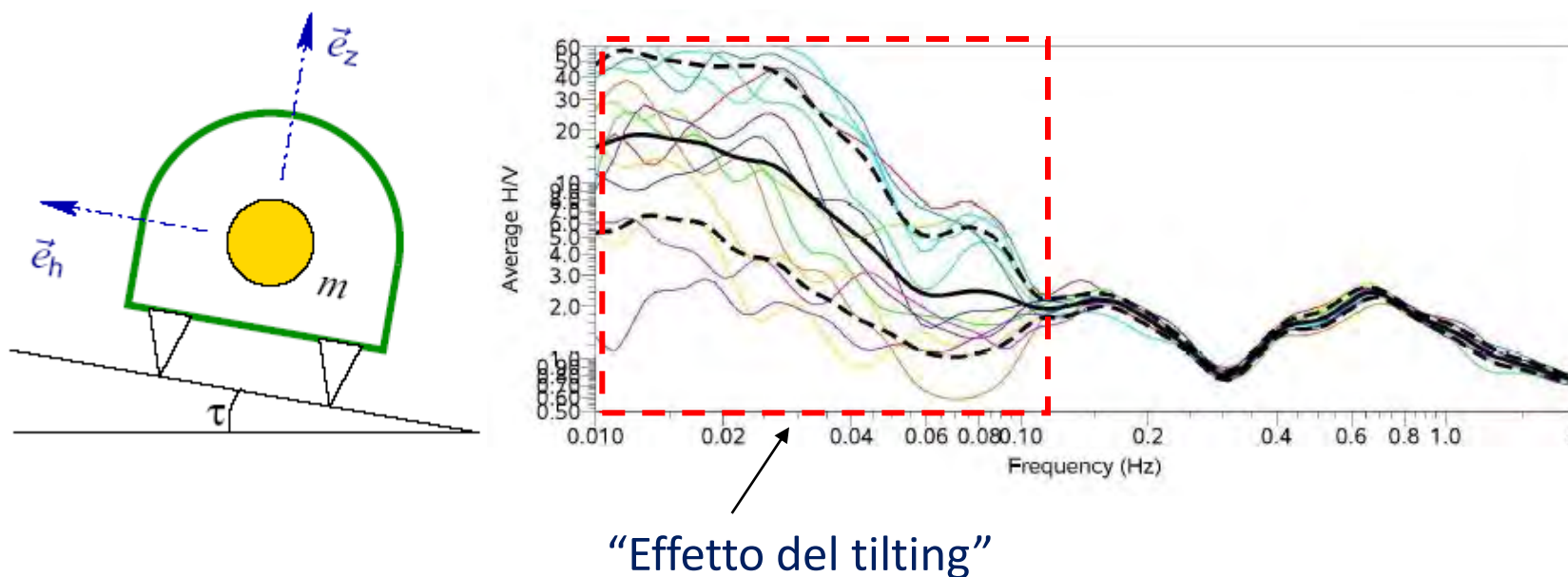
L'esecuzione della misura presenta due ordini di problemi

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.)

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

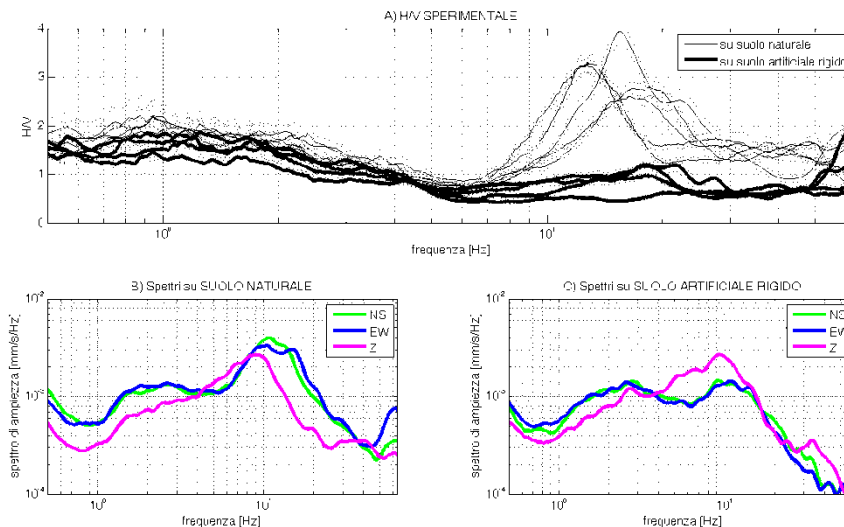


Bisogna quindi sempre controllare che lo strumento conservi la sua livellazione fino alla fine della misura!!!

La presenza di pavimentazione può influire sulla forma della curva HVSR

In alcune circostanze, la 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!

Comunque, l'eventuale presenza di effetti di questo tipo va valutata ripetendo la misura su suolo libero (dove questo affiora)

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

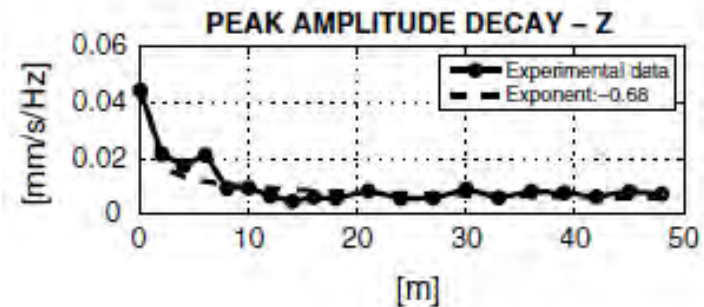
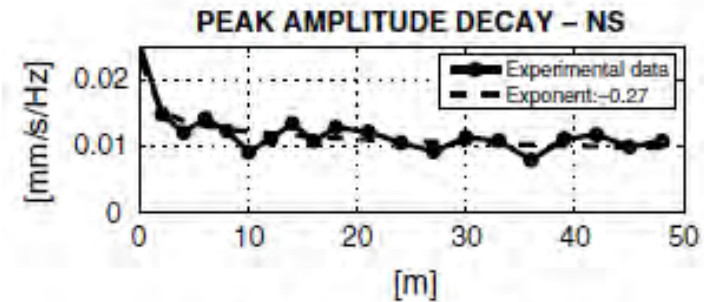
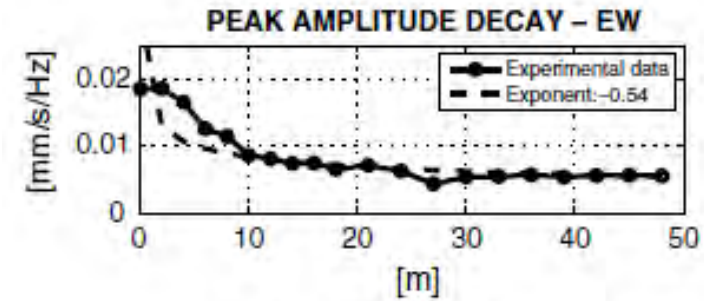
Un aspetto spesso sopravvalutato è quello del possibile disturbo arrecato dalla presenza di edifici o manufatti elevati nelle vicinanze della misura

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

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 20-30 minuti

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 20-30 minuti

Prima di entrare nel merito delle analisi spettrali applicate ad un segnale di tipo stocastico vale la pena di ricordare due elementi chiave dell'analisi spettrale

Il primo aspetto riguarda il numero di componenti spettrali che è possibile determinare quando il segnale è discreto (come avviene tutte le volte che il segnale misurato viene digitalizzato ovvero descritto in forma numerica)

In generale, è possibile controllare il tasso di campionamento (ovvero quanti valori del segnale è possibile raccogliere nell'unità di tempo): per esempio 128 cps vuol dire che vengono raccolti 128 campioni per secondo

Allora si dimostra che **la frequenza massima che è possibile valutare è pari alla metà del tasso di campionamento** (nel caso precedente $128/2=64$ Hz)

Il secondo aspetto riguarda quale **potere risolutivo** ha l'analisi spettrale ovvero quanto si è in grado di distinguere due possibili segnali armonici caratterizzati da frequenze poco diverse

In pratica si vede che la minima differenza che è possibile valutare dipende dalla **durata complessiva** della registrazione

In pratica, data una durata pari a T , la minima differenza in frequenza che è possibile valutare è pari a $1/T$

Se la durata della registrazione (o del segnale considerato) è 20 secondi, la minima differenza in frequenza che è possibile valutare è pari a $1/20$ Hz (0.05 Hz)

In sintesi, se un segnale della durata di 20 secondi viene campionato a 128 cps allora si potranno determinare 1220 armoniche separate da 0.05 Hz (con uno spettro che va da 0 a 64 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)

Tornando ora al problema della stima dello spettro è necessario tenere conto della natura stocastica del segnale che si riflettono nelle caratteristiche statistiche dello spettro

Questo va quindi trattato con tecniche specifiche e molto delicate in modo da ottenere stime spettrali attendibili

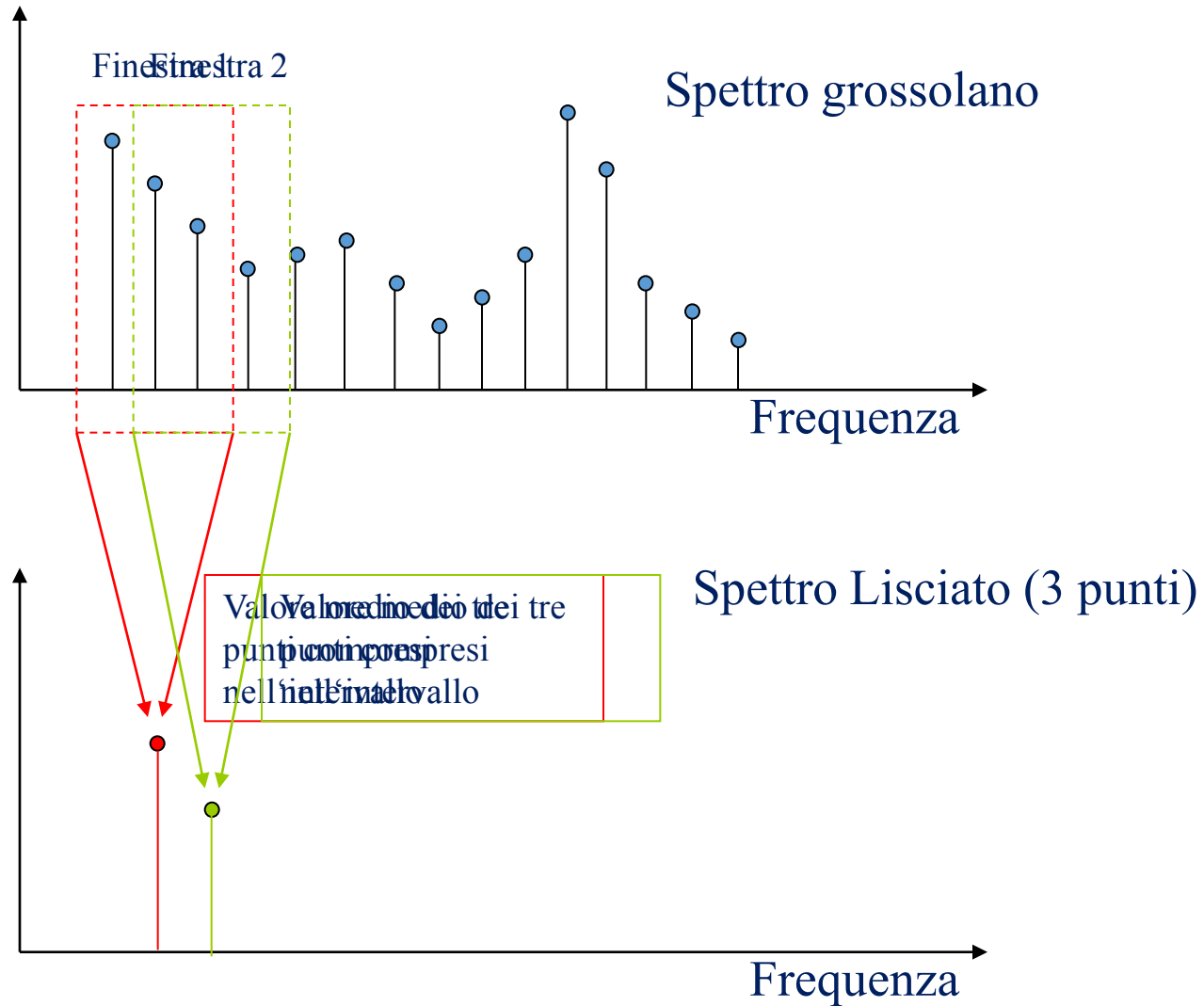
Metodo di Bartlett

La serie delle misure originali viene suddivisa in vari segmenti di uguale durata. Su ciascuno di questi viene calcolato lo spettro. Infine i valori di ampiezza spettrale ottenuti alle diverse frequenze nelle singole finestre vengono mediati: maggiore è il numero di spettri mediati (ovvero il numero di segmenti) e più rappresentativa è la media. In generale, per ottenere buone stime, il numero di finestre deve essere almeno pari 20

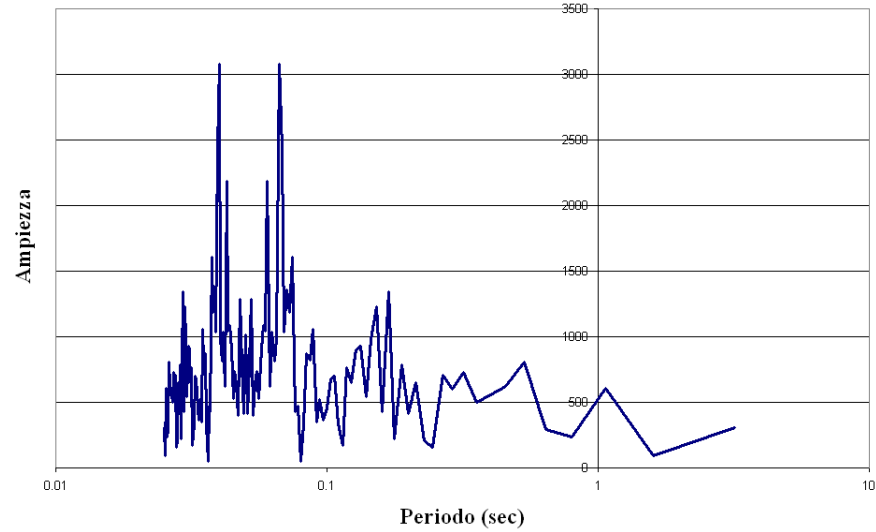
Metodo di Daniell

Lo spettro ottenuto su una serie temporale viene 'lisciato' ovvero l'ampiezza spettrale relativa ad un singola frequenza viene sostituito dalla media dei valori di ampiezza relativi alle frequenze vicine: tanto maggiore è la dimensione della finestra e tanto più stabile sarà la stima (ma tanto minore sarà il potere risolutivo dello spettro)

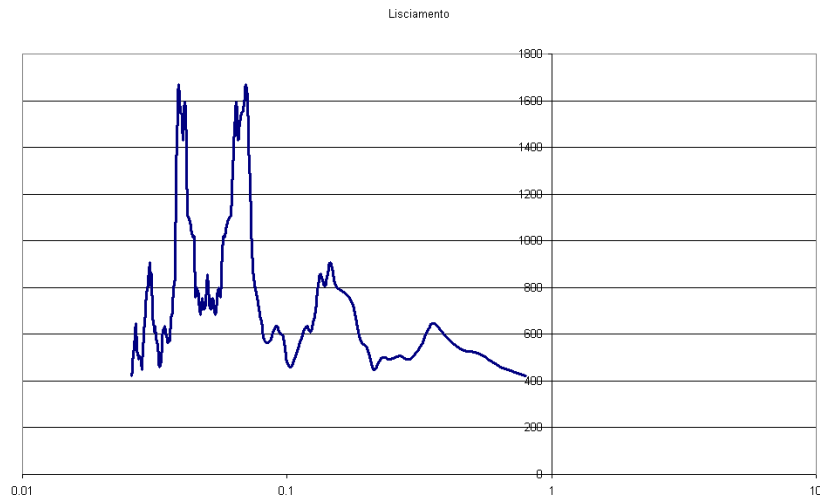
Lisciamento a finestre mobili (moving windows smoothing) – Daniell Method



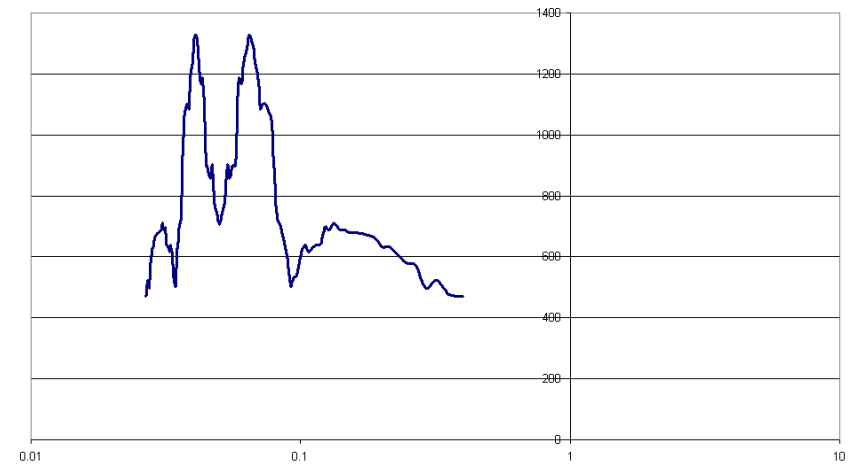
Spettro non liscio (*raw specrum*)



Spettro liscio (finestra a 9 punti)



Spettro liscio (finestra a 15 punti)



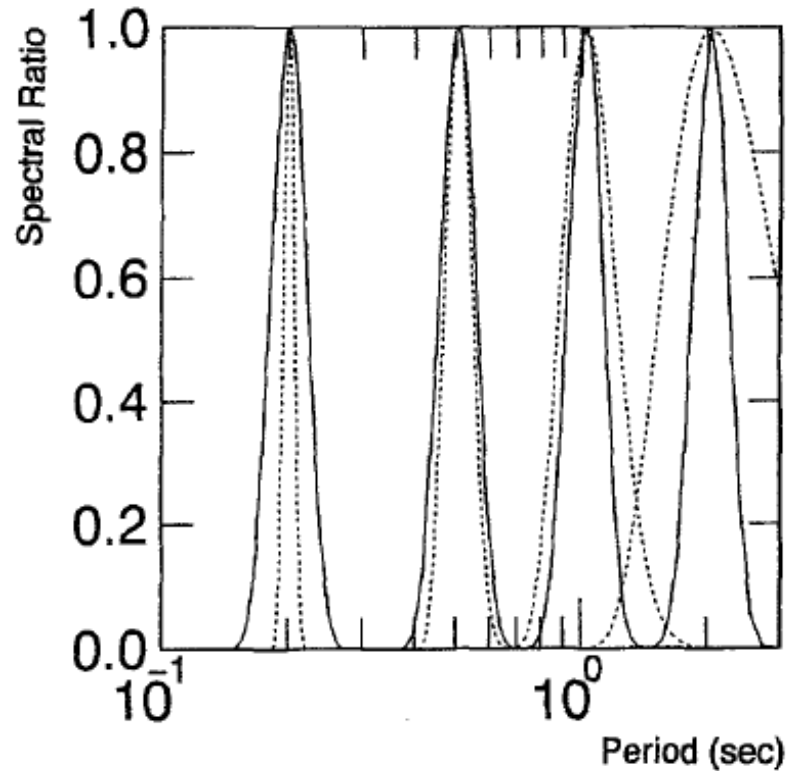
Il lisciamiento è tanto maggiore quanto maggiore è l'intervallo di frequenze considerato per la finestra mobile utilizzata per questa media. Per evitare di ridurre troppo la risoluzione dello spettro in bassa frequenza, l'entità di questo intervallo viene variato in funzione della frequenza considerata

Per esempio dire che si usa un lisciamiento al 5% vuol dire che il valore stimato alla frequenza 10 Hz viene ottenuto considerando la media delle ampiezze compreso fra 9.5 e 10.5 Hz ($10 - 5 \cdot 10 / 100 = 9.5$ e $10 + 5 \cdot 10 / 100 = 10.5$).

Un altro modo è quello di adottare un lisciamiento uniforme sulla scala logaritmica (Konno e Omachi)

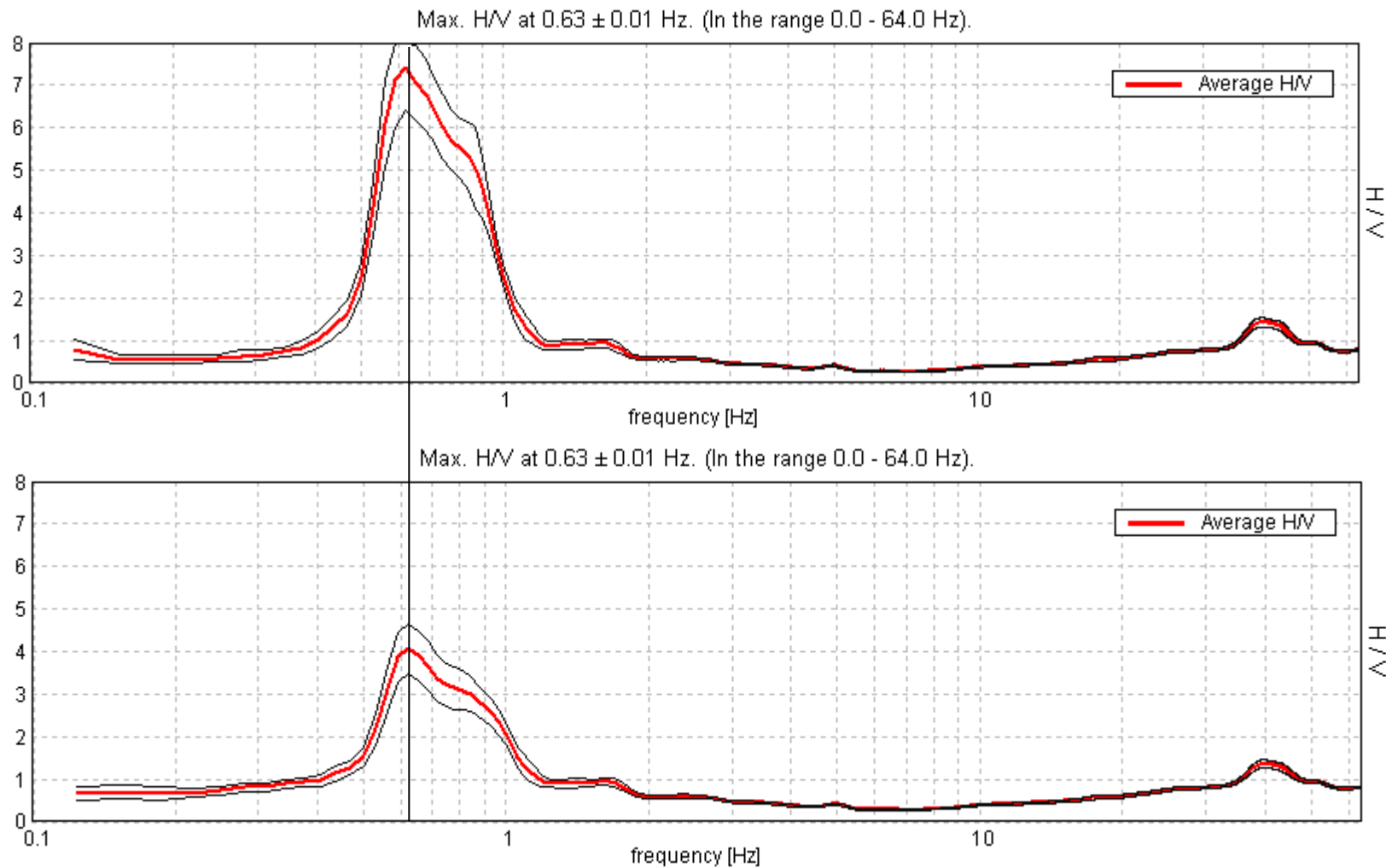
Inoltre si usa spesso una finestra di lisciamiento che pesa maggiormente il valore centrale e meno quelli più lontani all'interno della finestra

Per esempio, quella che vedete è il lisciamiento di Konno e Omachi che usa una finestra sinusoidale la cui estensione è controllata dal parametro b



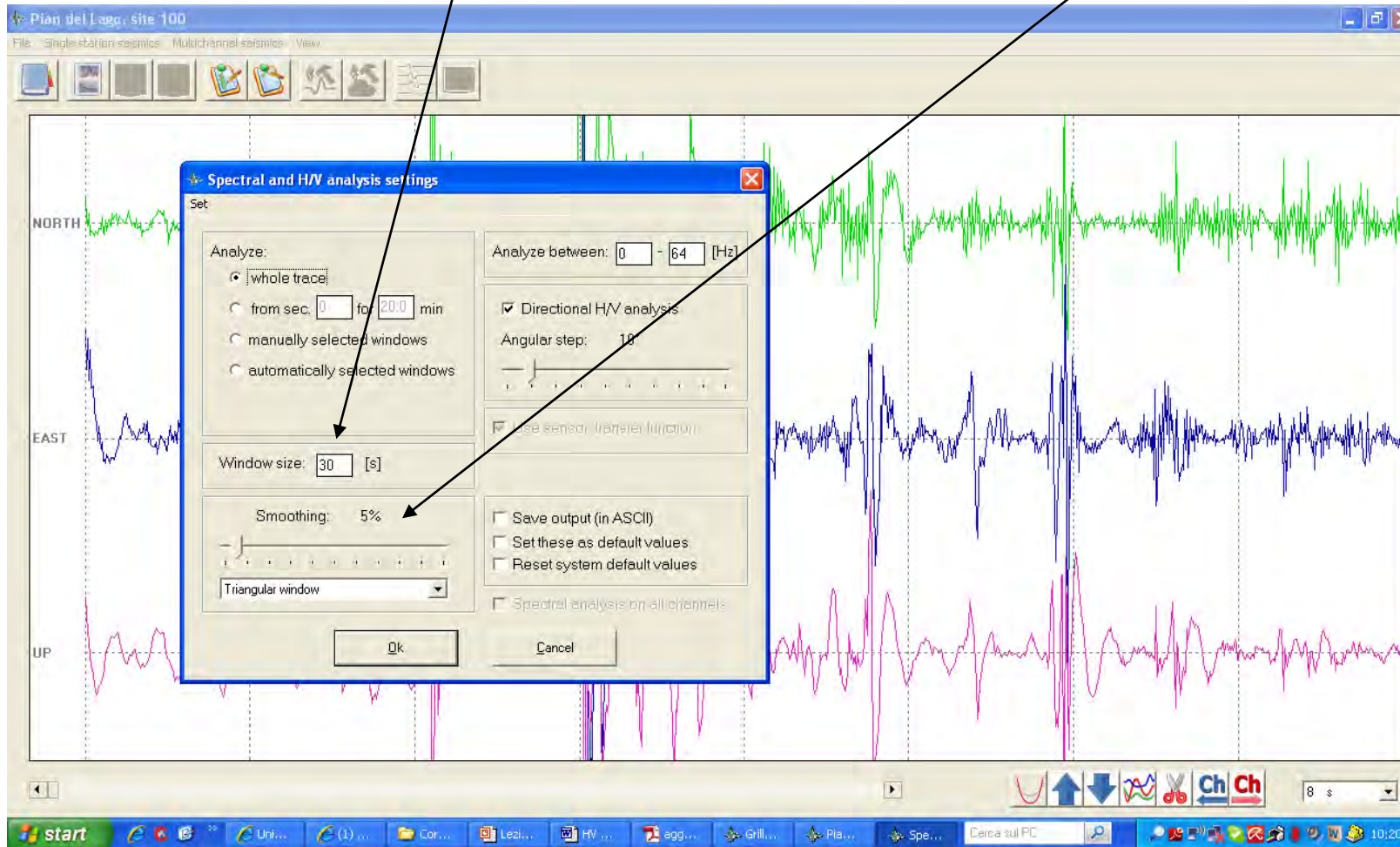
Si tenga presente comunque che i risultati finali sono fortemente condizionati da scelte di questo tipo (numero di sottofinestre, scelta della modalità di lisciamiento)
D'altro canto: non esiste una procedura ottimale!!

$$W_B(f, f_c) = [\sin (\log_{10}(f/f_c)^b) / \log_{10}(f/f_c)^b]^4,$$



Per esempio viene mostrato l'effetto di due diverse modalità di lisciamento (finestra triangolare e Konno-Ohmachi) si vede che la posizione del massimo non cambia ma l'ampiezza si. Non esiste un metodo ottimale!

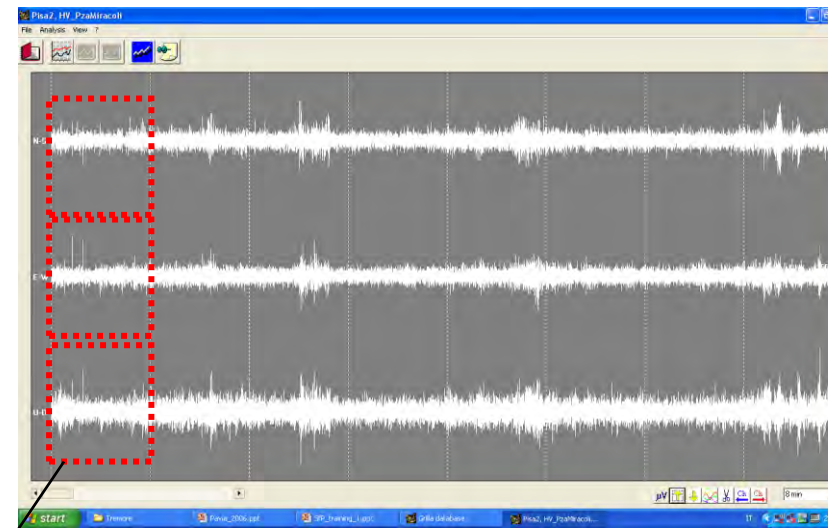
Esempio delle modalità di scelta riguardo alla lunghezza delle finestre e la modalità lisciamento dello spettro



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

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

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



NS

EW

UD

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

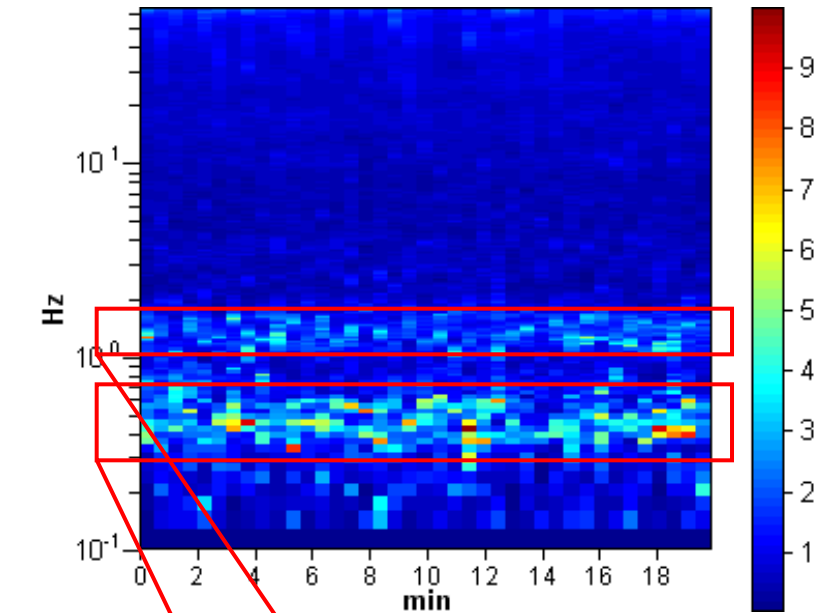
$$H(\omega) = \sqrt{\frac{H_{NS}^2(\omega) + H_{EW}^2(\omega)}{2}}$$

Formulazione alternativa

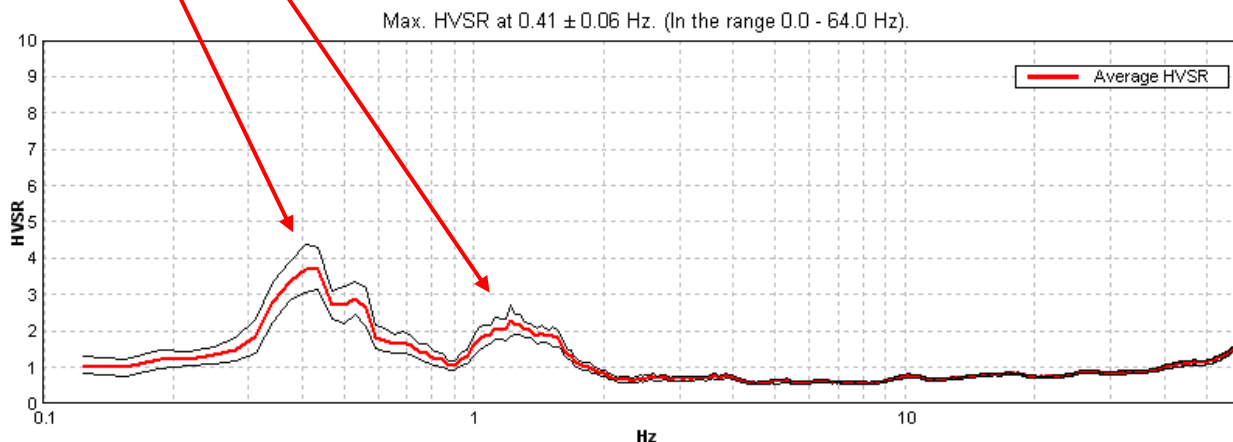
(le diverse modalità di calcolo possono avere effetti sulla forma della curve HVSR e sulle sue proprietà statistiche)

A questo punto, i valori ottenuti sulle due componenti orizzontali vanno combinati per ottenere il numeratore della coppia H/V: esistono vari modi per farlo ed i risultato dipendono dalla procedura scelta

Si procede alla stima dei valori medi dei rapporti H/V

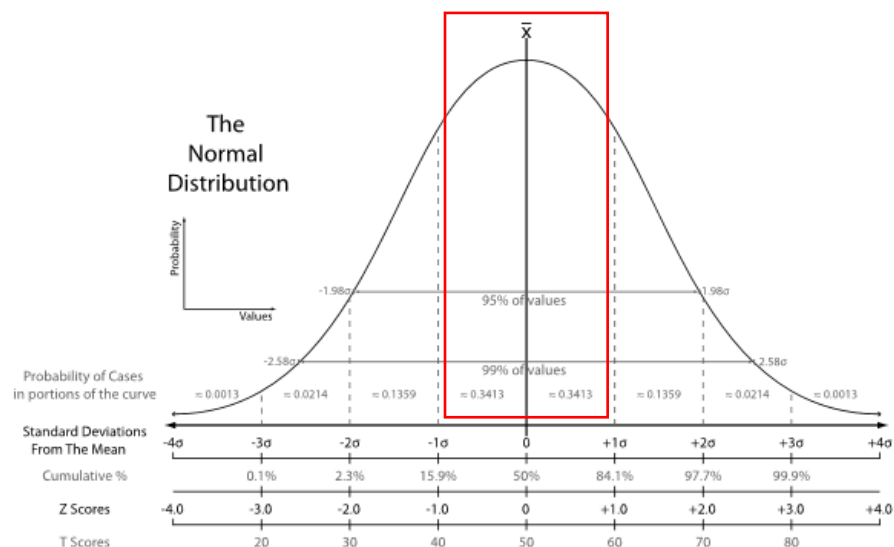


Viene valutata la persistenza delle funzioni HVSR nelle diverse finestre temporali



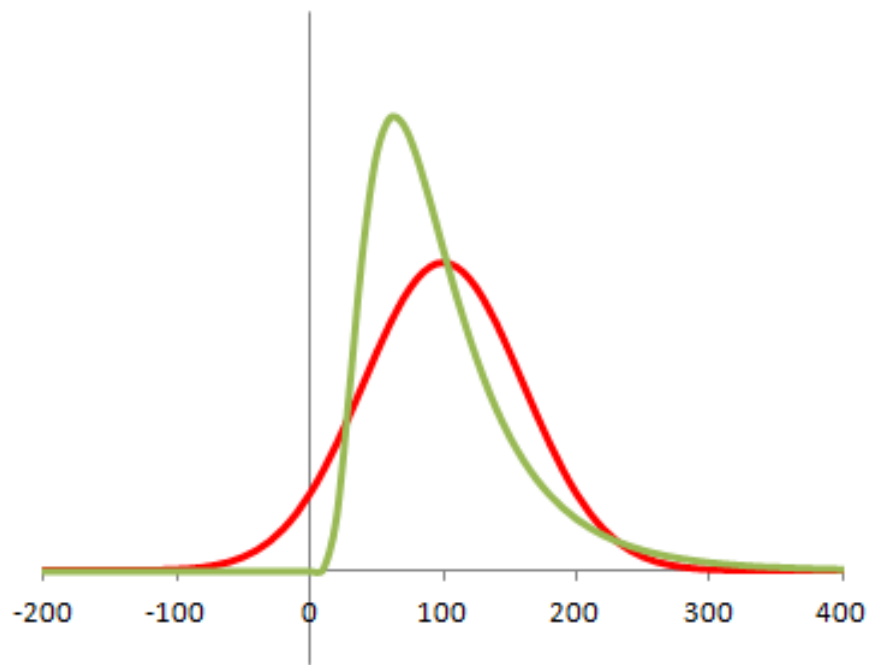
Vengono quindi calcolati i rapporti spettrali medi ed il relativo intervallo di confidenza ovvero viene stimata la variabilità del valore H/V per la singola frequenza

Due parole su cosa voglia dire stimare una media e definire la variabilità della grandezza misurata (in questo caso il valore H/V)



Se assumiamo che esista un valore ‘vero’ (ovvero misurabile perfettamente in assenza di disturbi) allora la media aritmetica e la deviazione standard (radice quadrata dello scarto quadratico medio) sono due misure di potenziale interesse

Se si assume che l'intera popolazione dei valori possibili abbia la distribuzione in frequenza ‘a campana’ (di Gauss) allora la media aritmetica $\bar{m}$ è il valore centrale e la deviazione standard (s) è una misura della larghezza della campana: più la campana è larga e meno accurato è il valore. Quindi l'incertezza potrebbe essere stimata come l'intervallo $[\bar{m}-s, \bar{m}+s]$



Purtroppo nel caso dei valori H/V la distribuzione caratteristica non è simmetrica (distribuzione log-normale)

In questo caso, invece di usare la media e della deviazione standard si usa la media dei logaritmi μ dei valori misurati e la deviazione standard σ di questi ultimi

Talvolta quindi l'incertezza sperimentale viene stimata come l'intervallo $[e^{\mu-\sigma}, e^{\mu+\sigma}]$

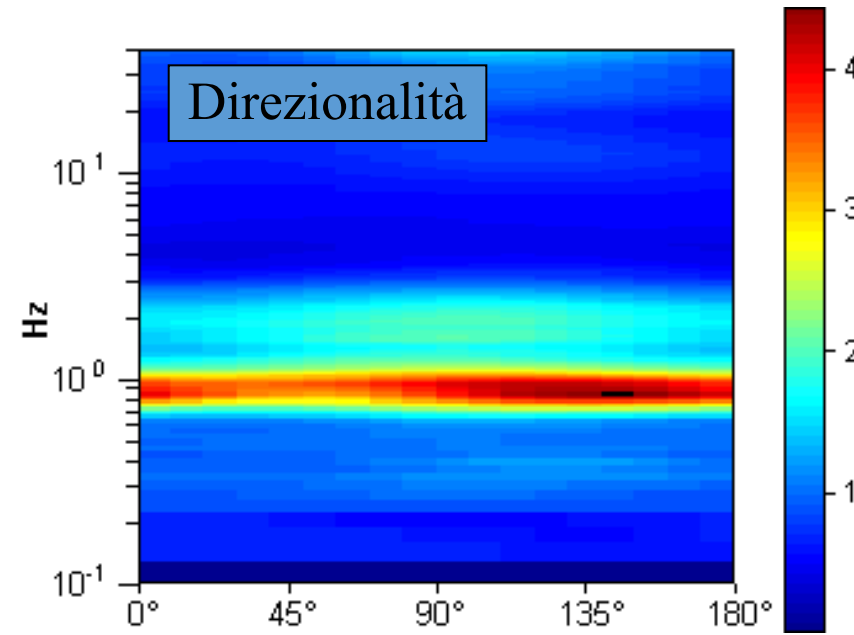
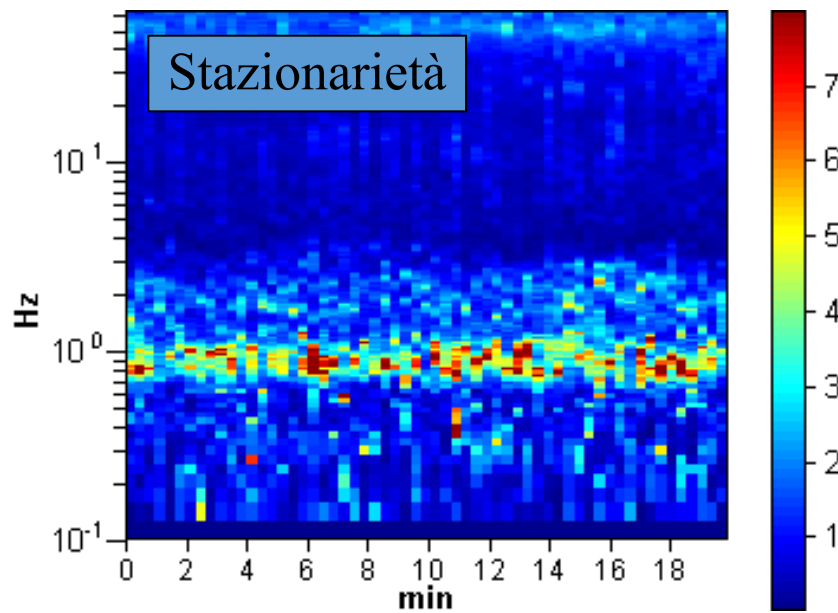
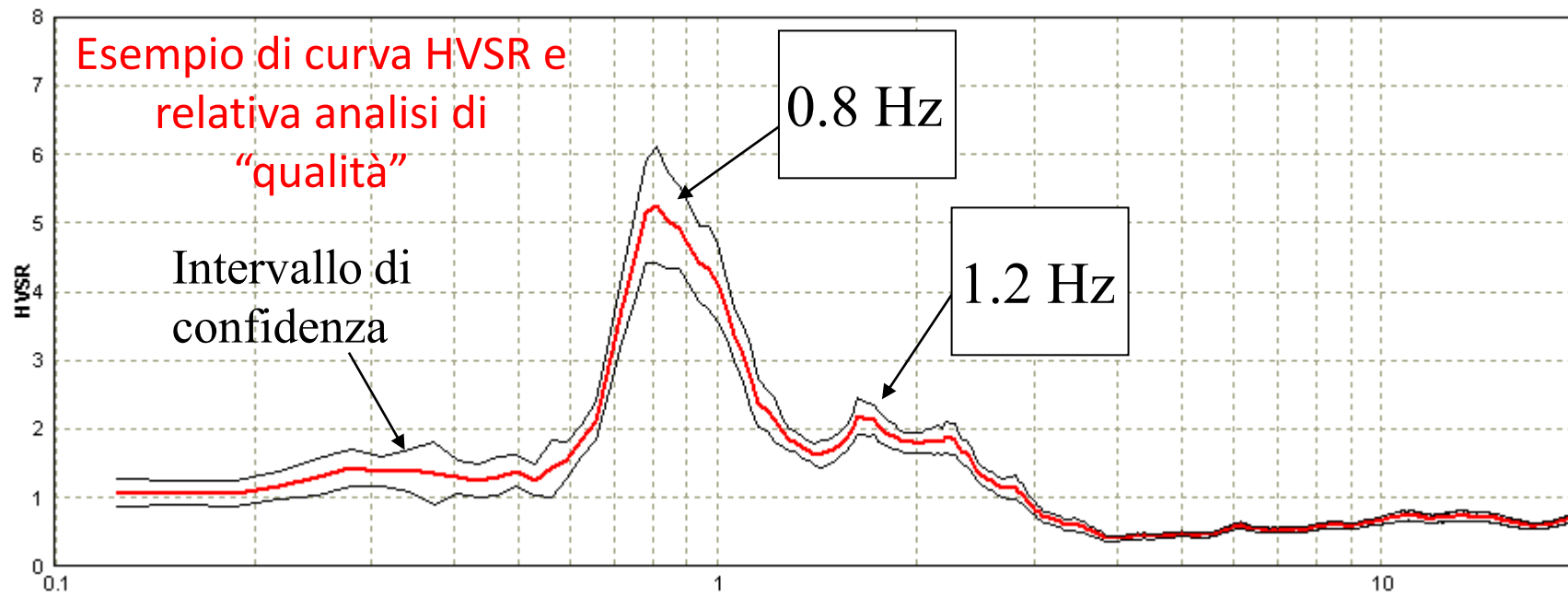
Il modo di stimare l'intervallo di incertezza gioca un ruolo essenziale nelle procedure di inversione

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



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

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

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

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

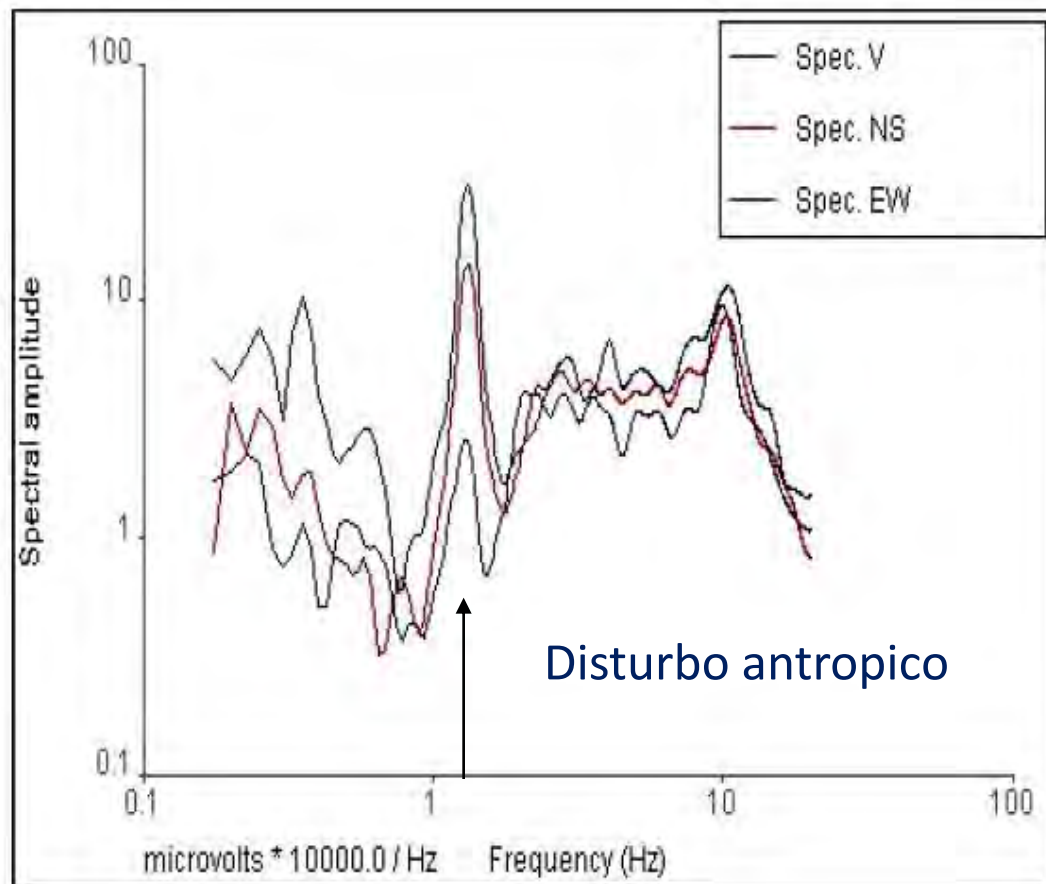
Esempio:

- 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

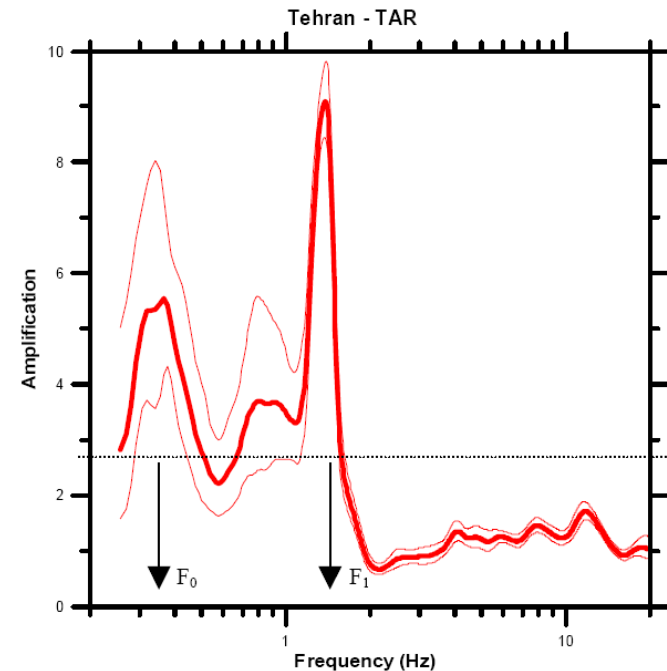
$$\lambda = V / \nu \rightarrow \lambda \approx 300 / 3 \approx 100 \text{ m}$$

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

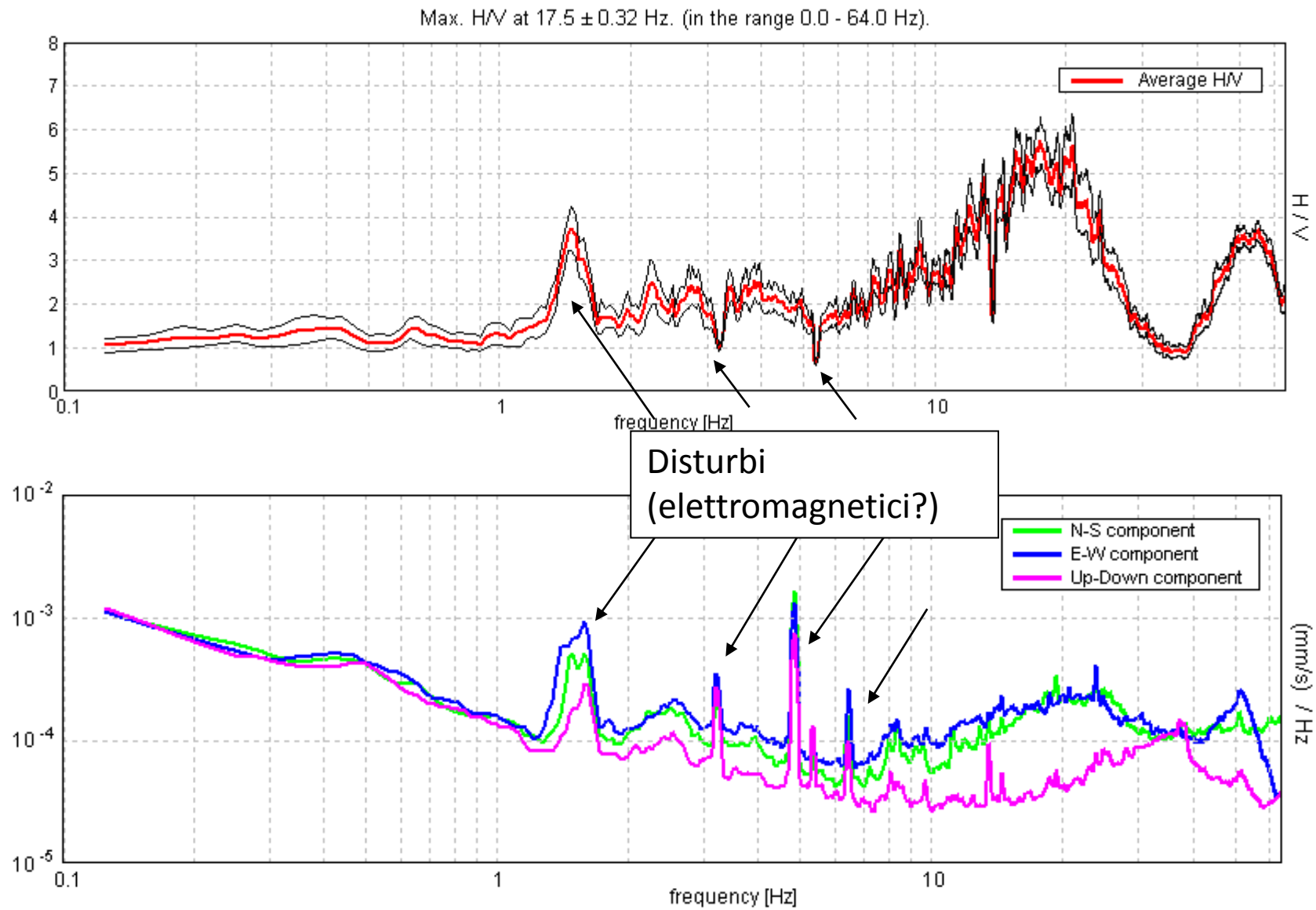
Spettri relativi alle tre componenti



Rapporti spettrali



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



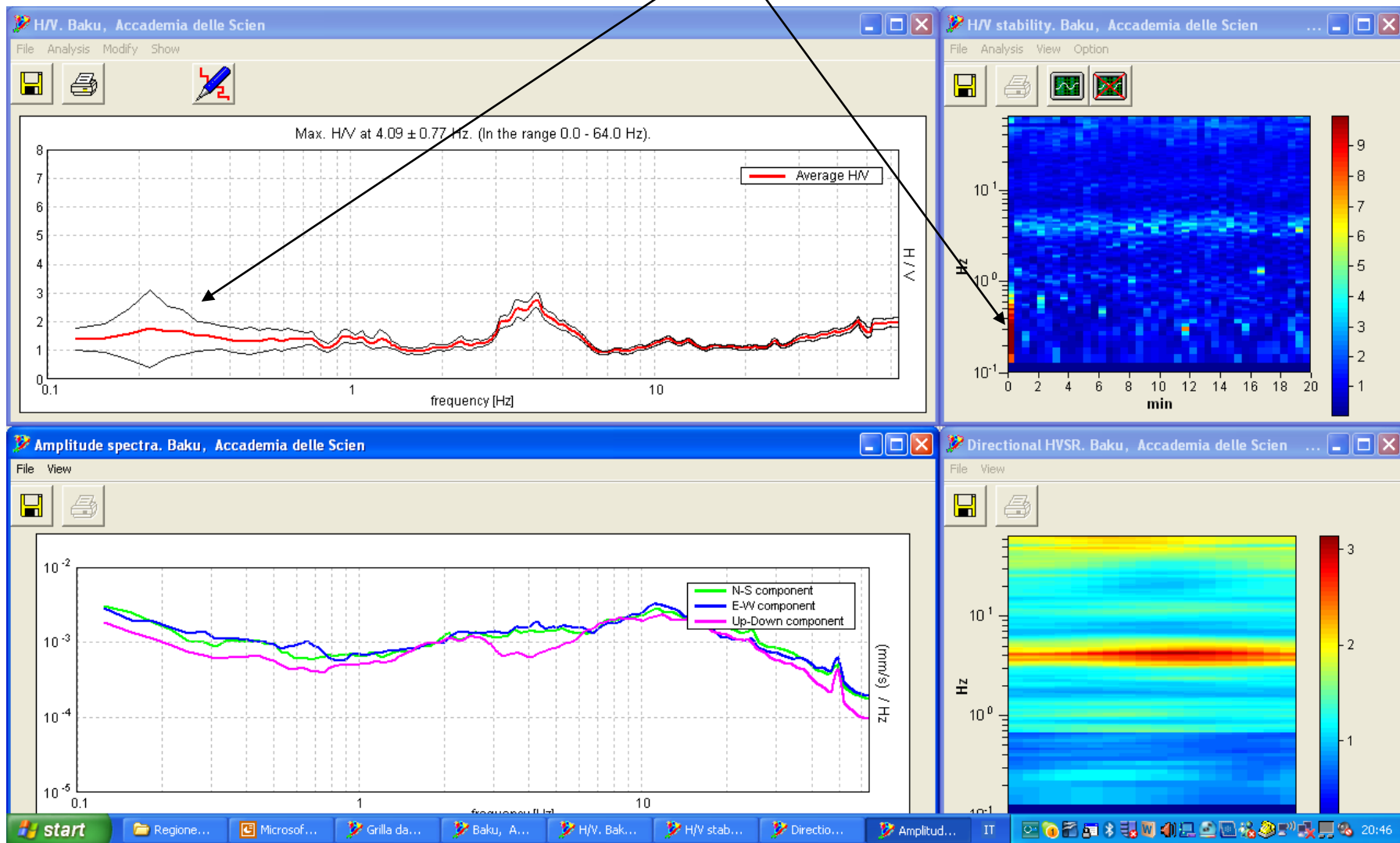
Contro questo disturbo non c'è niente da fare salvo eliminare la misura

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)

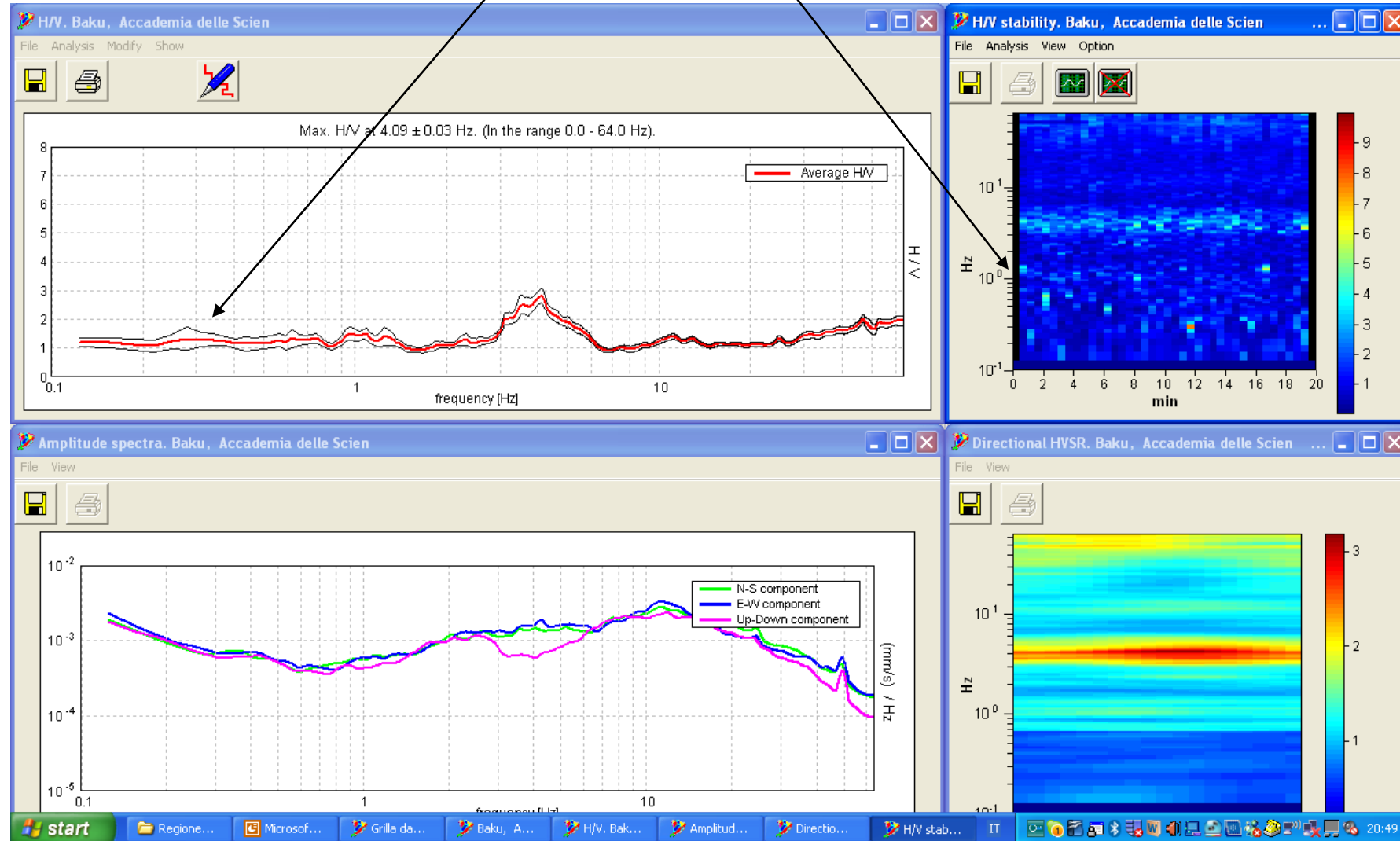
Anche se questo transiente è breve rispetto all'intera durata della misura, se la sua ampiezza è grande può perturbare la curva media introducendo marcati effetti di sorgente

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 viene proposta una classificazione delle misure sulla base di criteri volti a stabilirne la qualità

Questa classificazione ha essenzialmente lo scopo di fornire al professionista uno strumento per la valutazione preliminare dei risultati al fine di procedere all'analisi o alla ripetizione delle misure laddove necessario

La Classificazione delle misure HVSR

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

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

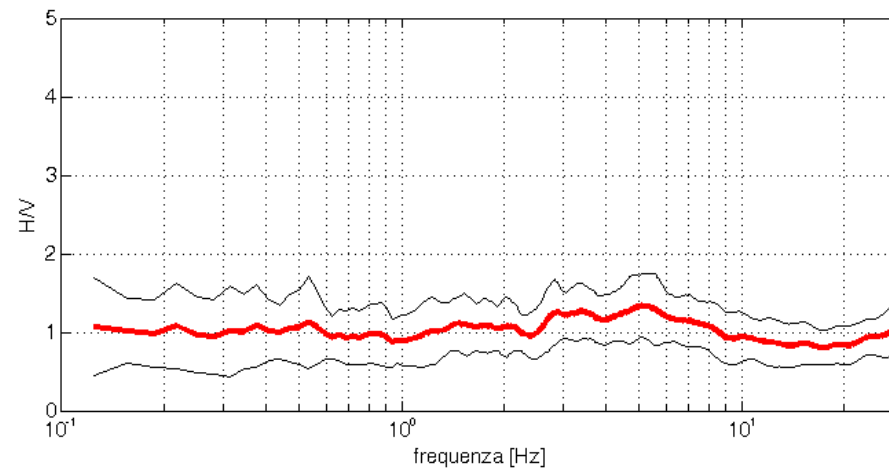
Si confrontano misure ottenute con spettri lisciati con una finestra triangolare al 5% della frequenza centrale. Valori maggiori dell'ampiezza della finestra di lisciamiento possono essere utilizzati per migliorare la leggibilità della curva in fase di interpretazione.

Vengono proposte tre classi di qualità:

Classe A: HVSR 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 HVSR 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 HVSR nell'intervallo di frequenze di interesse ingegneristico, a causa dell'assenza di contrasti di impedenza sufficientemente marcati. In questi casi, in cui la curva HVSR 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 HVSR sospetta (da “valutare criticamente”): 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 HVSR scadente e di difficile interpretazione: non va utilizzata

1. misura di tipo B nella quale la curva HVSR 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.

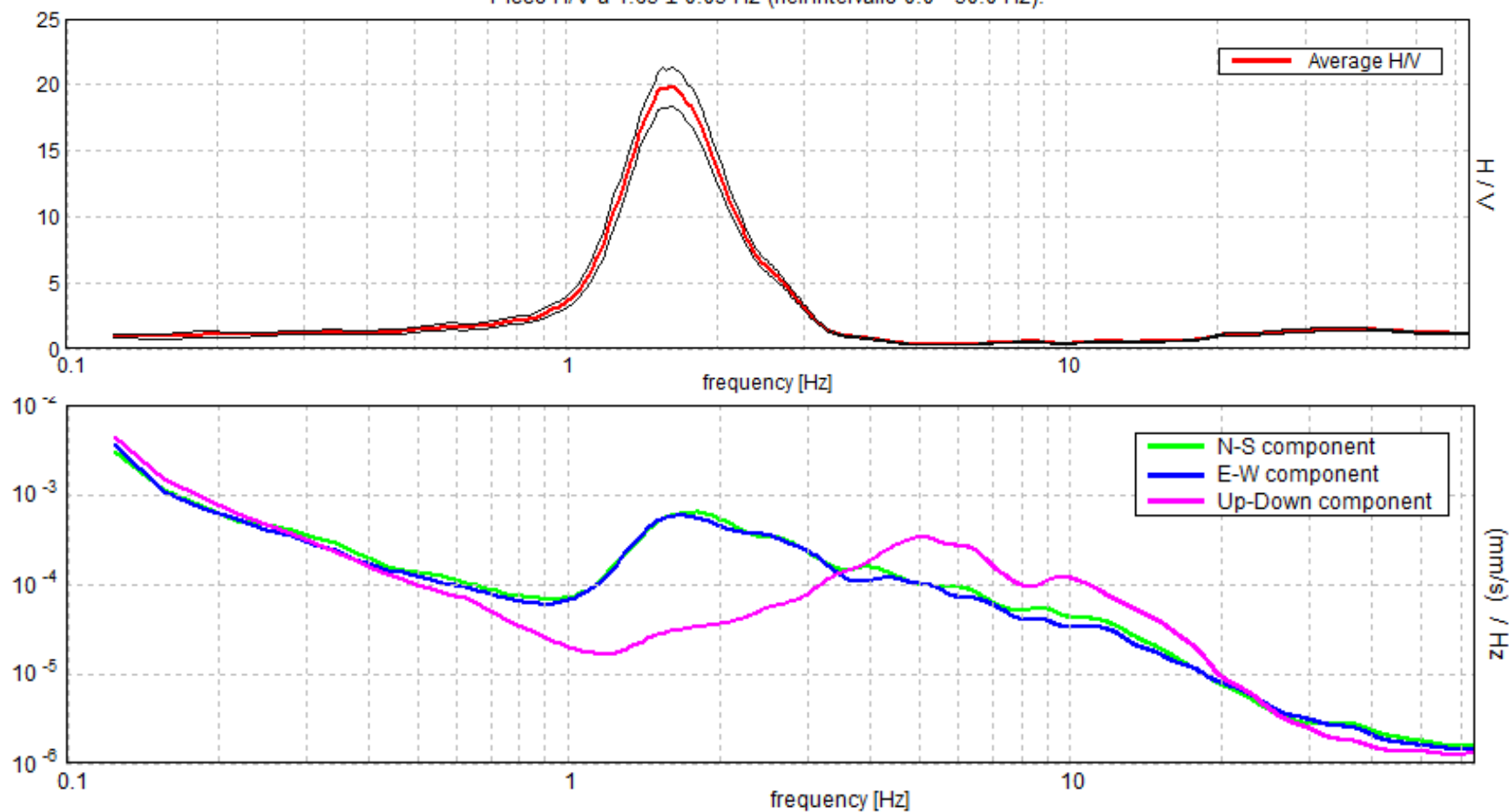
Freq. campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 20 s

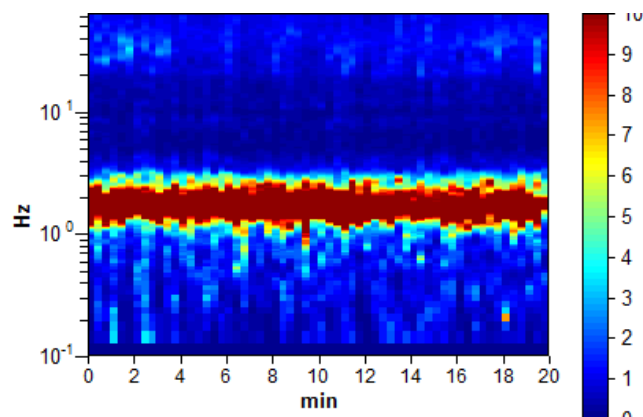
Tipo di lisciamiento: triangolare

Lisciamiento: 10%

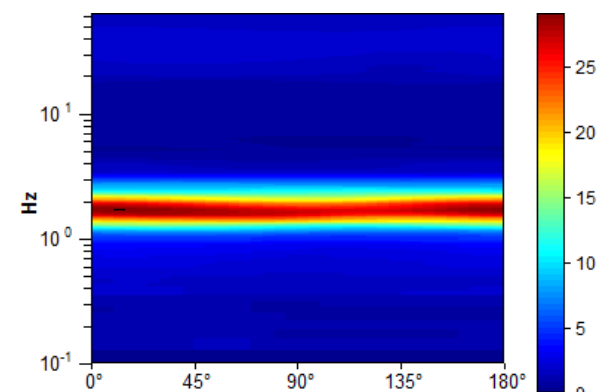
Picco H/V a 1.63 ± 0.03 Hz (nell'intervallo 0.0 - 50.0 Hz).



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	
$\sigma_A(f_0) < 8(f_0)$	$0.7439 < 1.78$	OK	

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

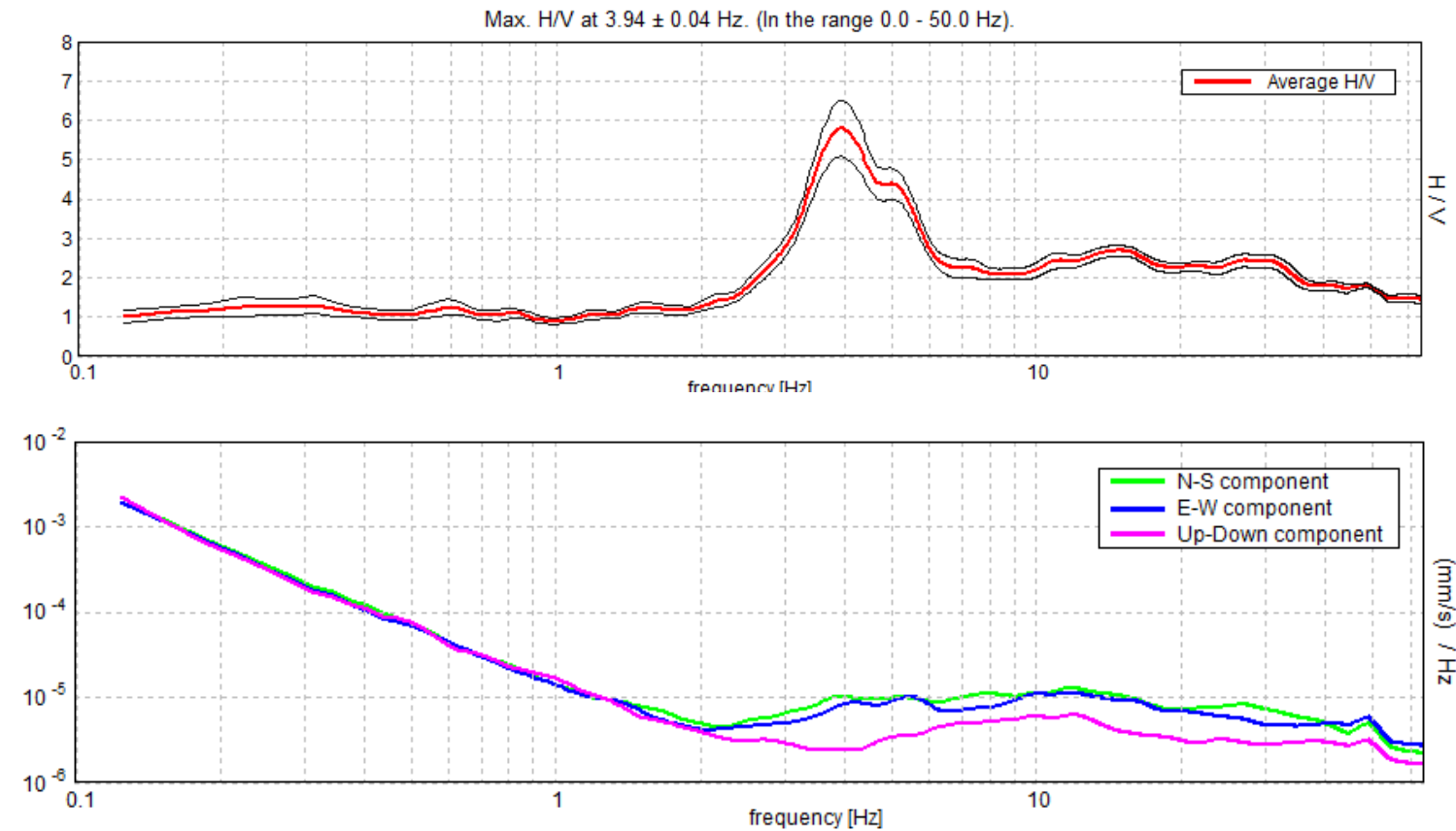
Durata registrazione: 0h20'00". Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

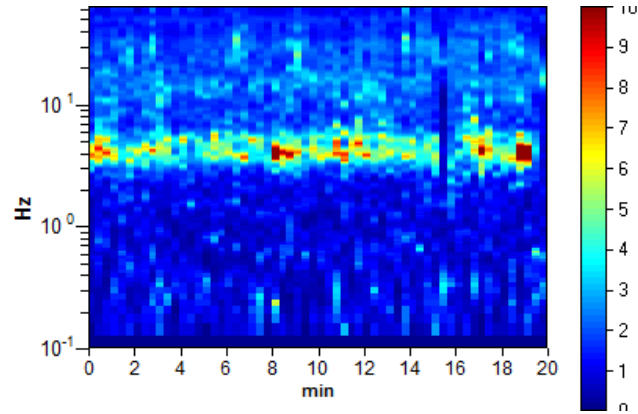
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di liscio: triangolare

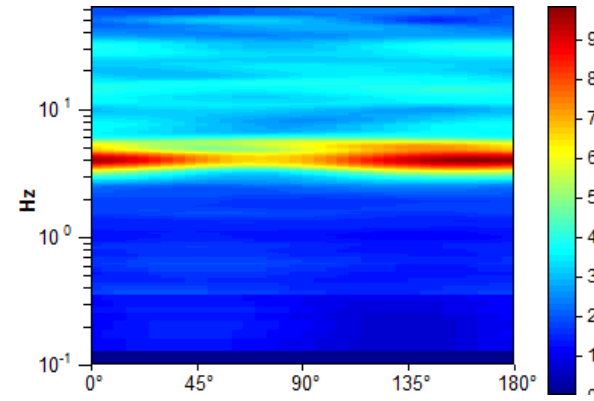
Liscio: 10%



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 $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 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".

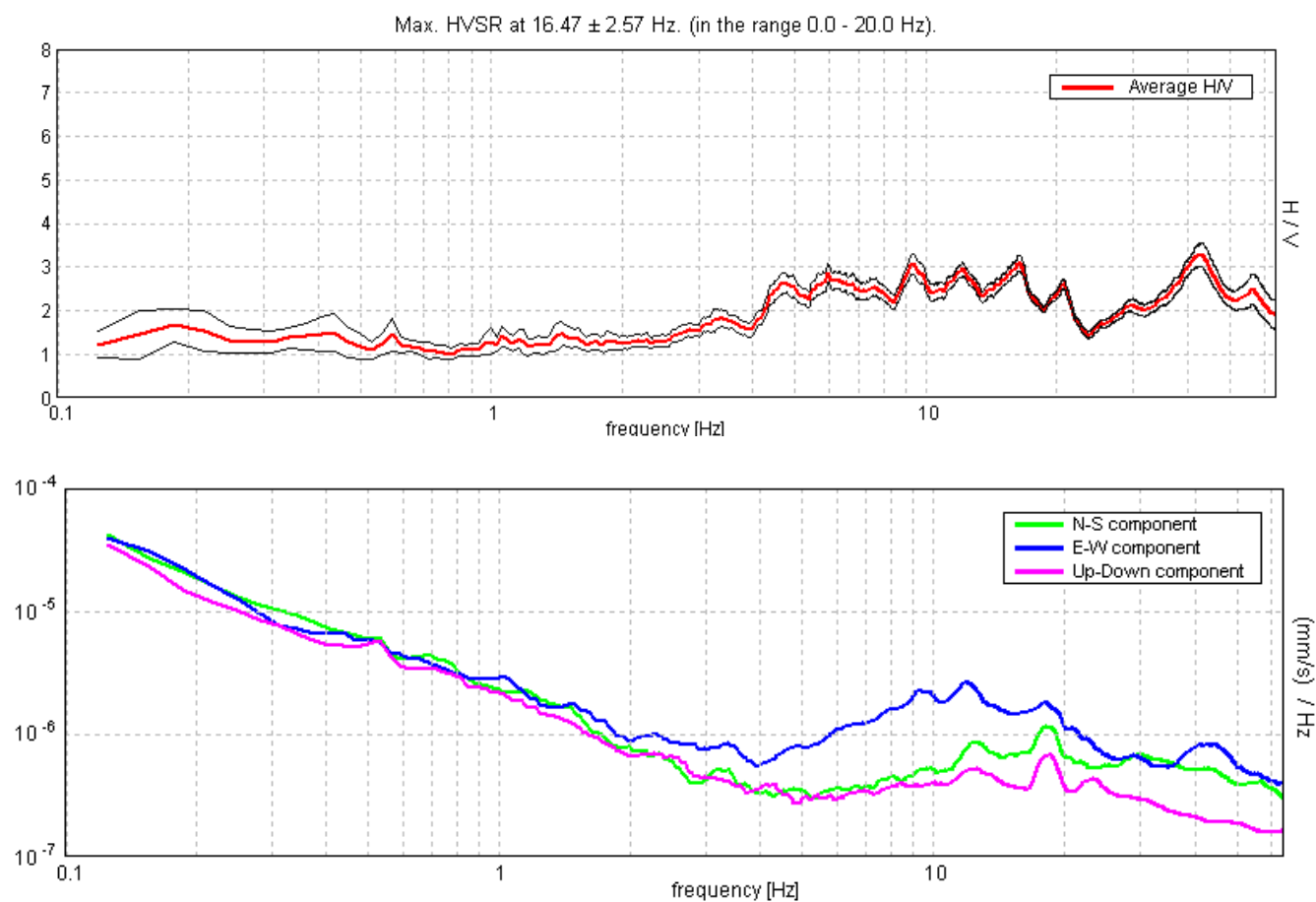
Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

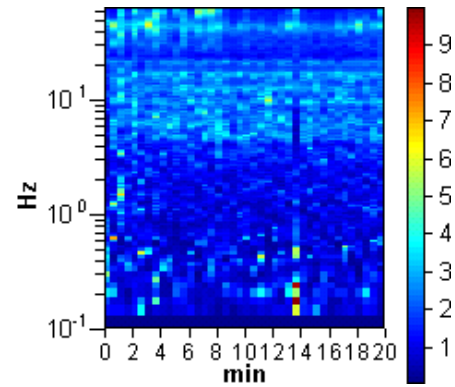
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di liscio: triangolare

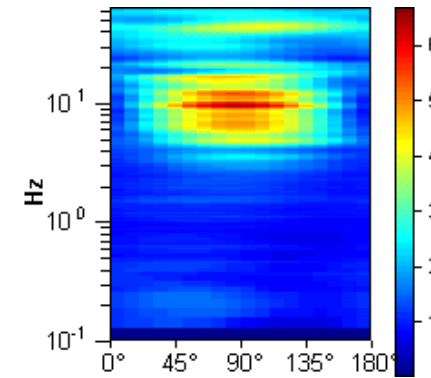
Liscio: 5%



SIEIE 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.

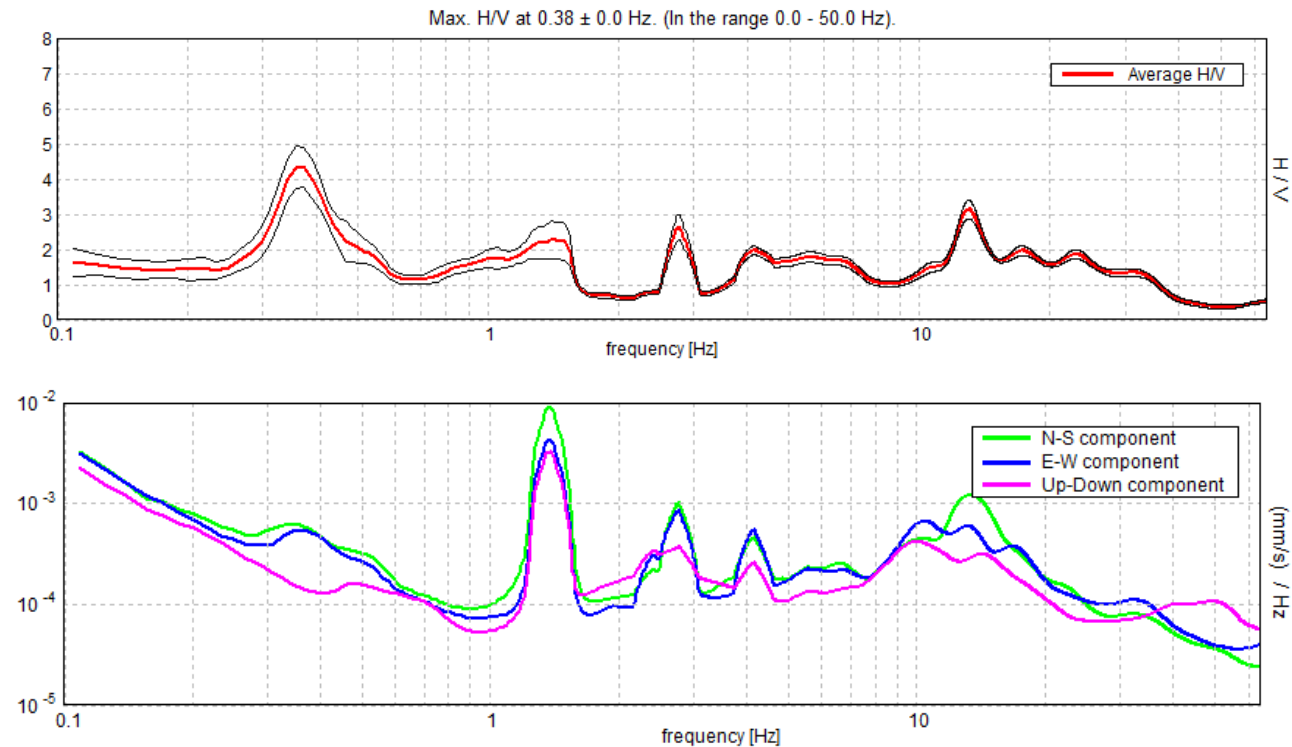
Durata registrazione: 0h20'00''. Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

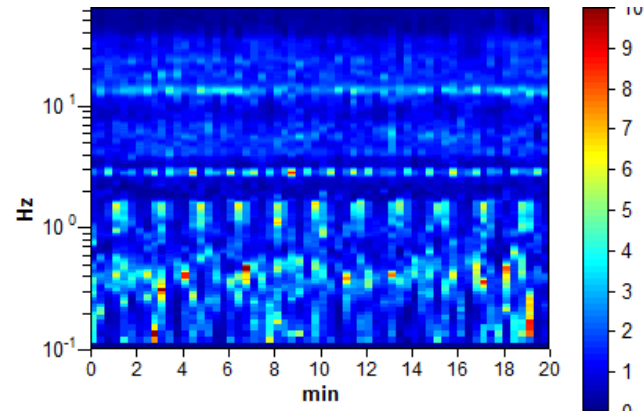
Lunghezza finestre: 40 s

Tipo di lisciamento: triangolare

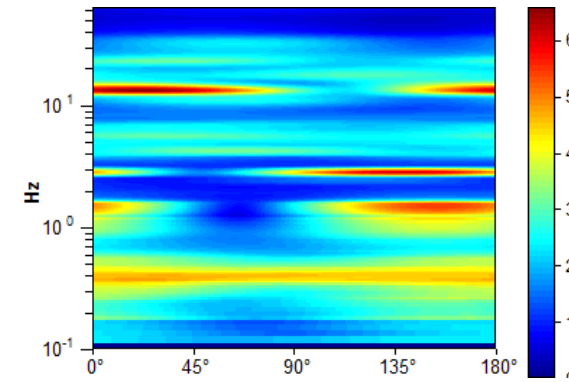
Lisciamento: 10%



SIEIE 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 $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^*) < A_0 / 2$	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	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.00233 < 0.075$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.2752 < 2.5$	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".

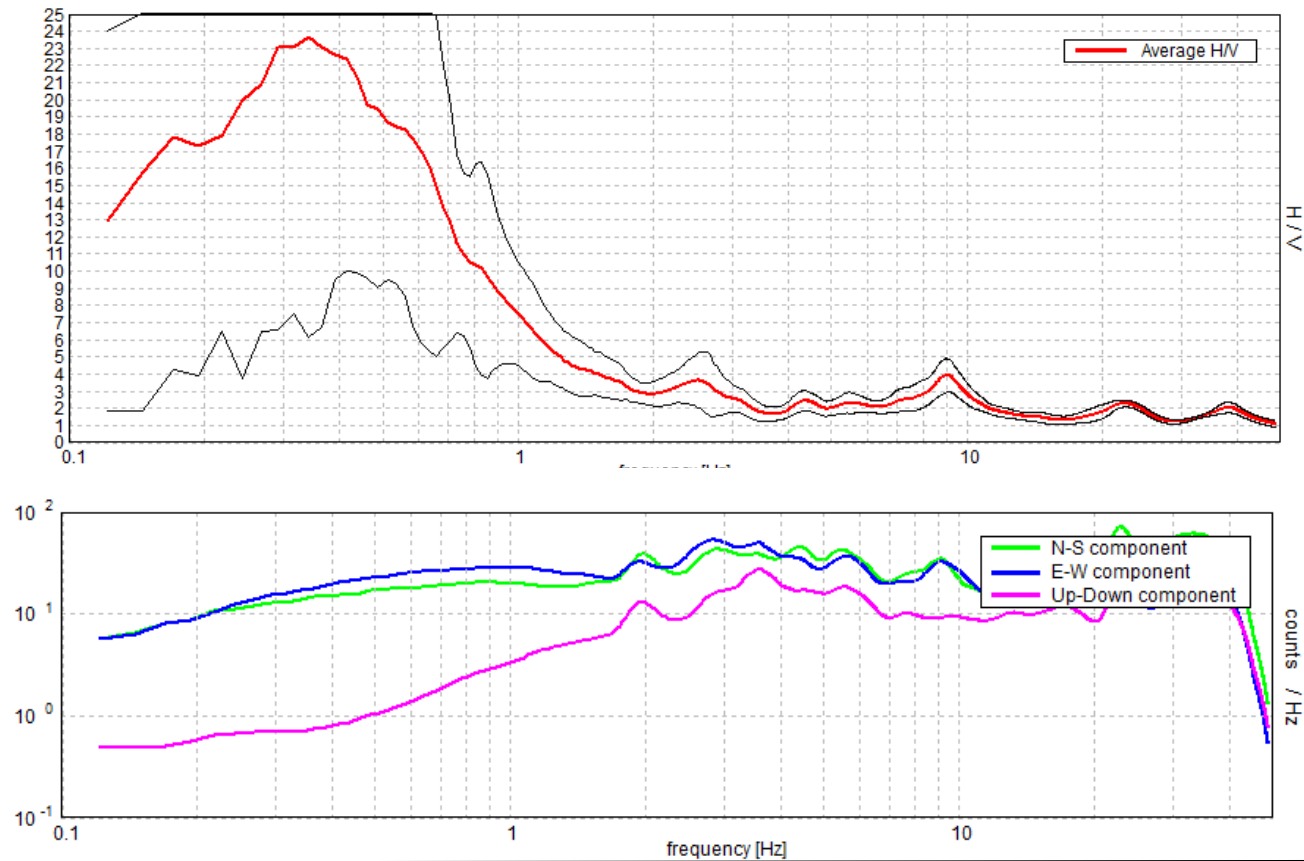
Analisi effettuata sull'intera traccia.

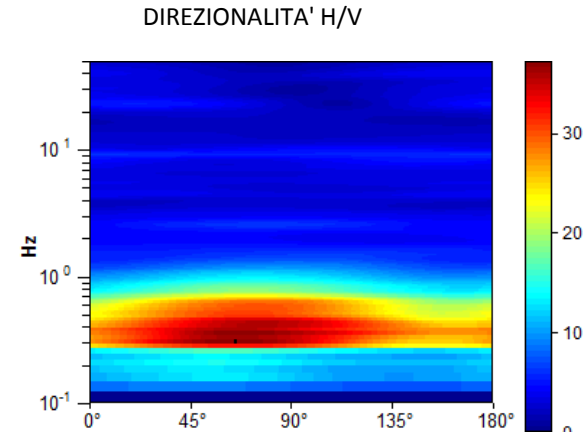
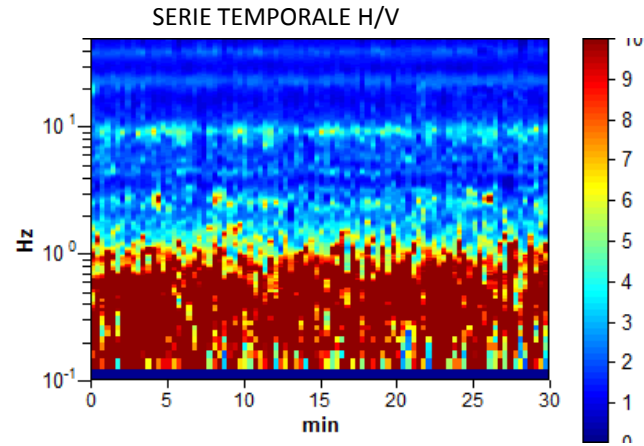
Freq. campionamento: 100 Hz

Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: triangolare

Lisciamento: 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]

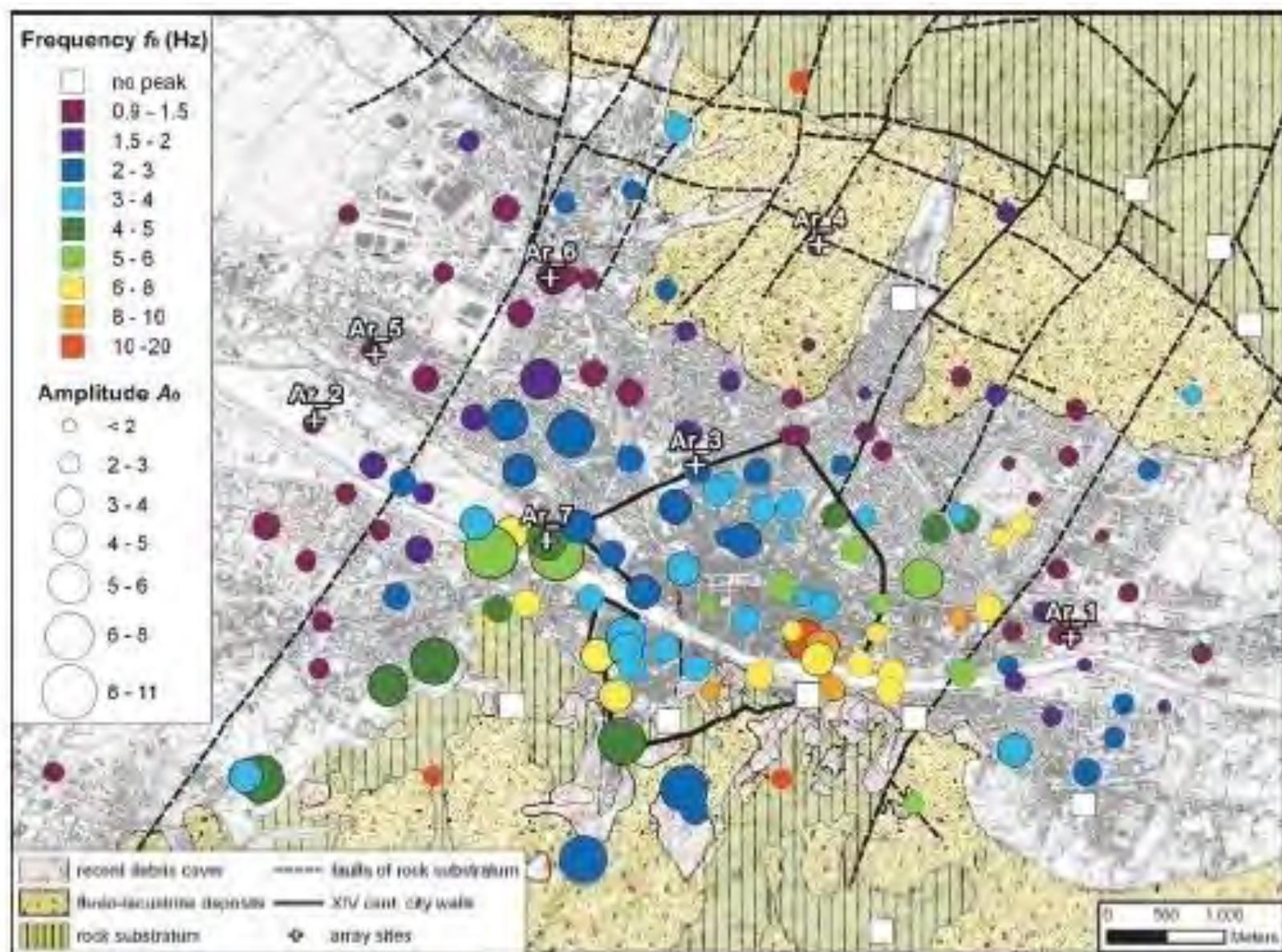
$f_0 > 10 / L_w$	$0.34 > 0.50$		NO
$n_c(f_0) > 200$	$615.2 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 22 volte su 22		NO

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

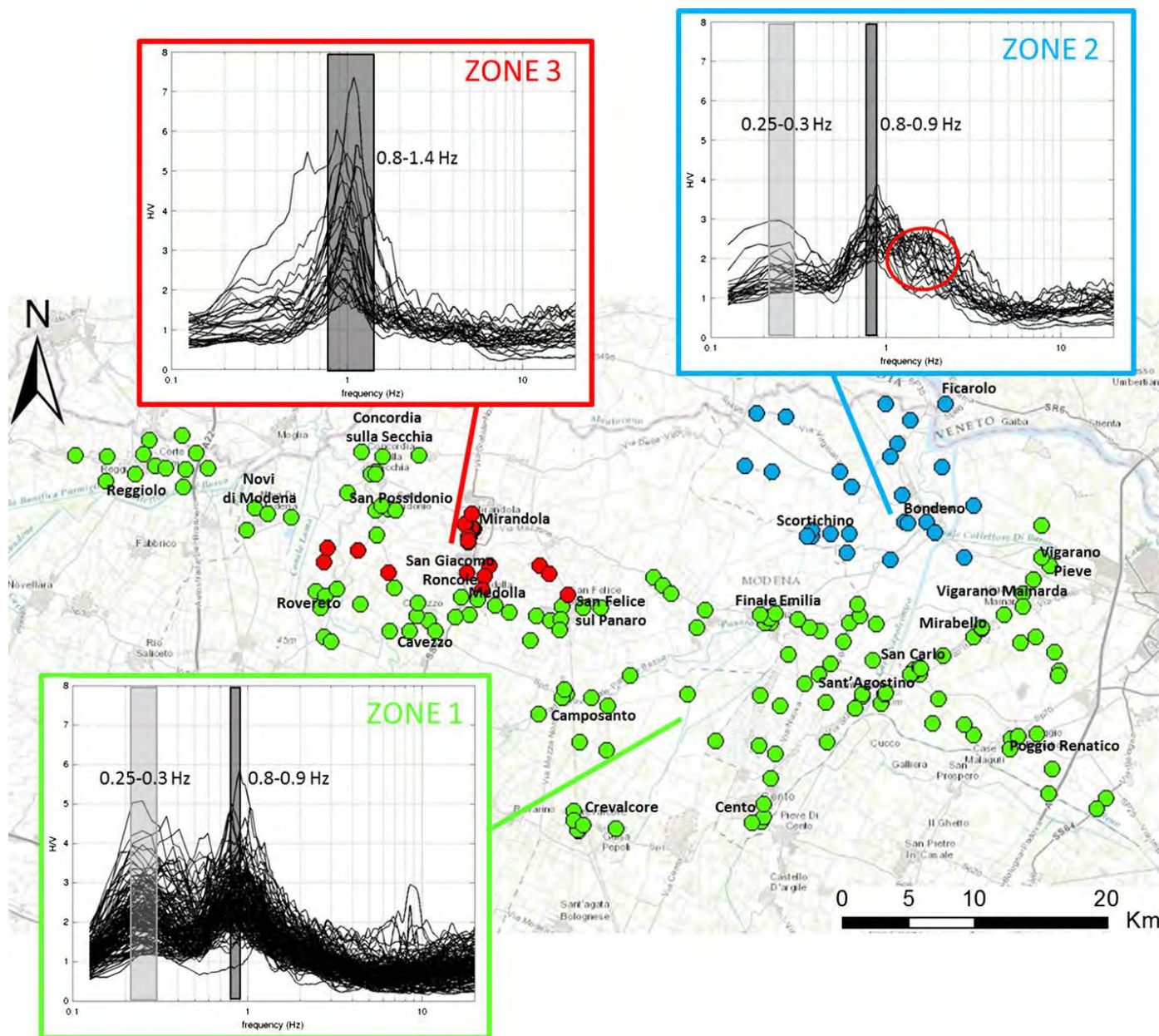
Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.098 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	0.732 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$23.66 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.0152 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < 8(f_0)$	$0.0052 < 0.06836$	OK	
$\sigma_A(f_0) <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

Carta delle Frequenze di risonanza



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

Serve a farsi un'idea molto approssimativa dello spessore delle coperture al di sopra di un marcato contrasto di impedenza sismica (corrisponda o no al tetto del substrato sismico)



Serve anche a valutare il livello di omogeneità dell'assetto sismostratigrafico all'interno della singola MOPS

A questo scopo sono di grande utilità rappresentazioni dei risultati delle misure basate sulla sovrapposizione delle curve HVSR ottenute nella stessa MOPS

L'interpretazione dei risultati delle misure geofisiche

Il grosso delle misure previste per la MZS di livello II ha carattere indiretto richiedono quindi specifiche procedure di inversione per ricavare le informazioni necessarie alla determinazione dei valori di FA a partire dagli abachi

Tre gli elementi chiave oggetto dell'inversione

1. *Determinazione dello spessore delle coperture al di sopra del substrato sismico ($> 0 < 30\text{m}$)*
2. *Stima della frequenza fondamentale di risonanza delle onde S*
3. *Stima delle velocità medie fino al substrato sismico (se posto a meno di 30 m dalla superficie) o fino a 30 m (se il substrato è posto a più di 30 m dal piano campagna)*

Identificazione del substrato sismico

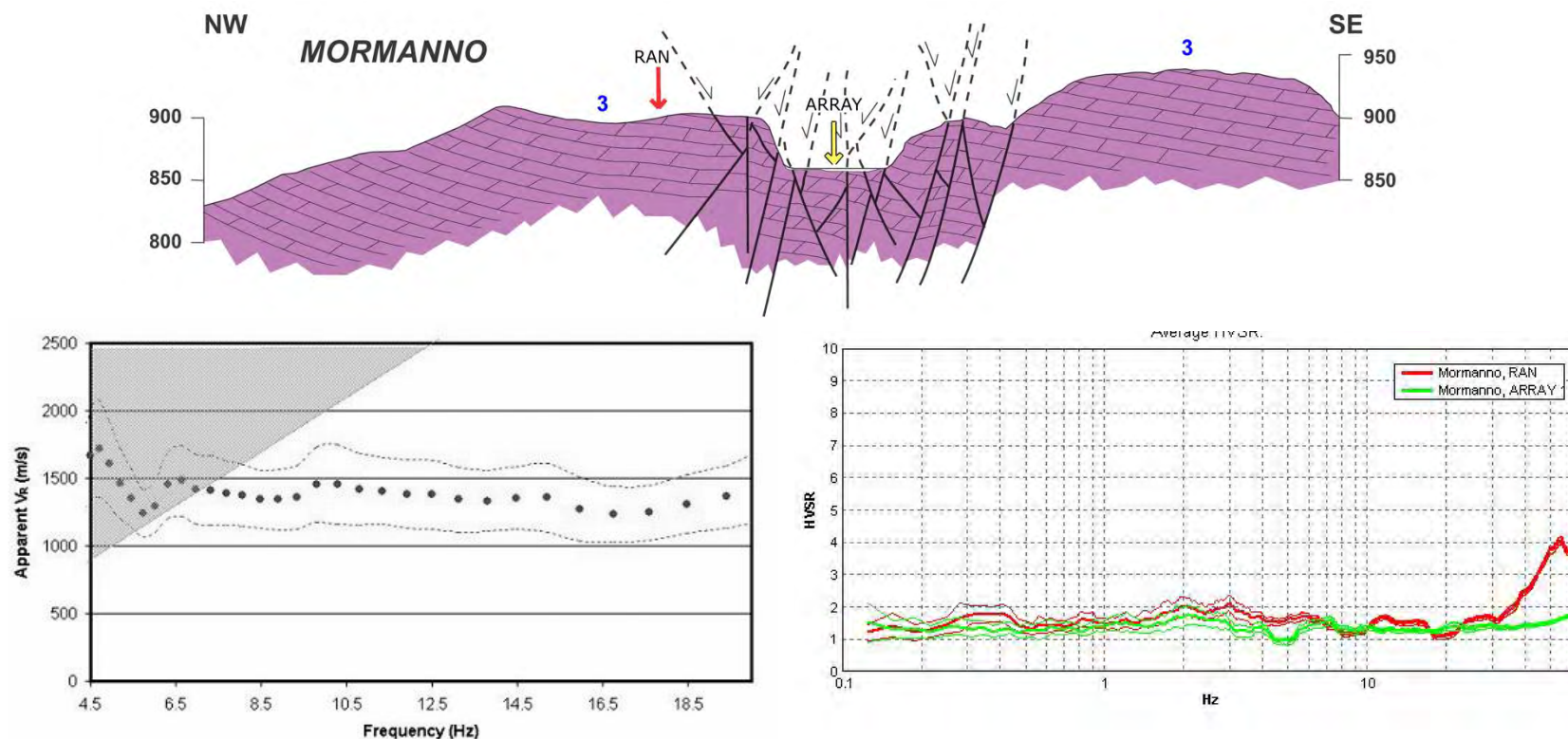
La MZS di livello I spesso ha indentificato il **substrato geologico** e fornito indicazioni di massima sulla sua morfologia sepolta

Primo obiettivo delle indagini è mostrare se il **substrato sismico** corrisponde al **substrato geologico** e se il tetto del primo rappresenti un marcato contrasto di impedenza sismica con le coperture ovvero sia in grado di **generare fenomeni di risonanza sismica**

Di primaria importanza sarebbe reperire informazioni raccolte in aree limitrofe o identificare zone di affioramento (o sub affioramento) del substrato geologico (anche esterne alla zona di indagine) dove eseguire misure della curva di dispersione delle onde di superficie

Questo permetterebbe di valutare i valori di V_s nel substrato, definirne il carattere sismico e valutare l'entità del contrasto atteso alla base delle coperture

Substrato affiorante



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

Anche la curva di dispersione risulta sub orizzontale (nessun gradiente di velocità)

Una indicazione molto grossolana riguardo alla presenza di un basamento sismico entro i 30 m può essere ottenuta dalla curva di dispersione utilizzando l'approccio speditivo e partire dalla velocità equivalente $V_s(h)$ definita mediante i due parametri empirici a e b

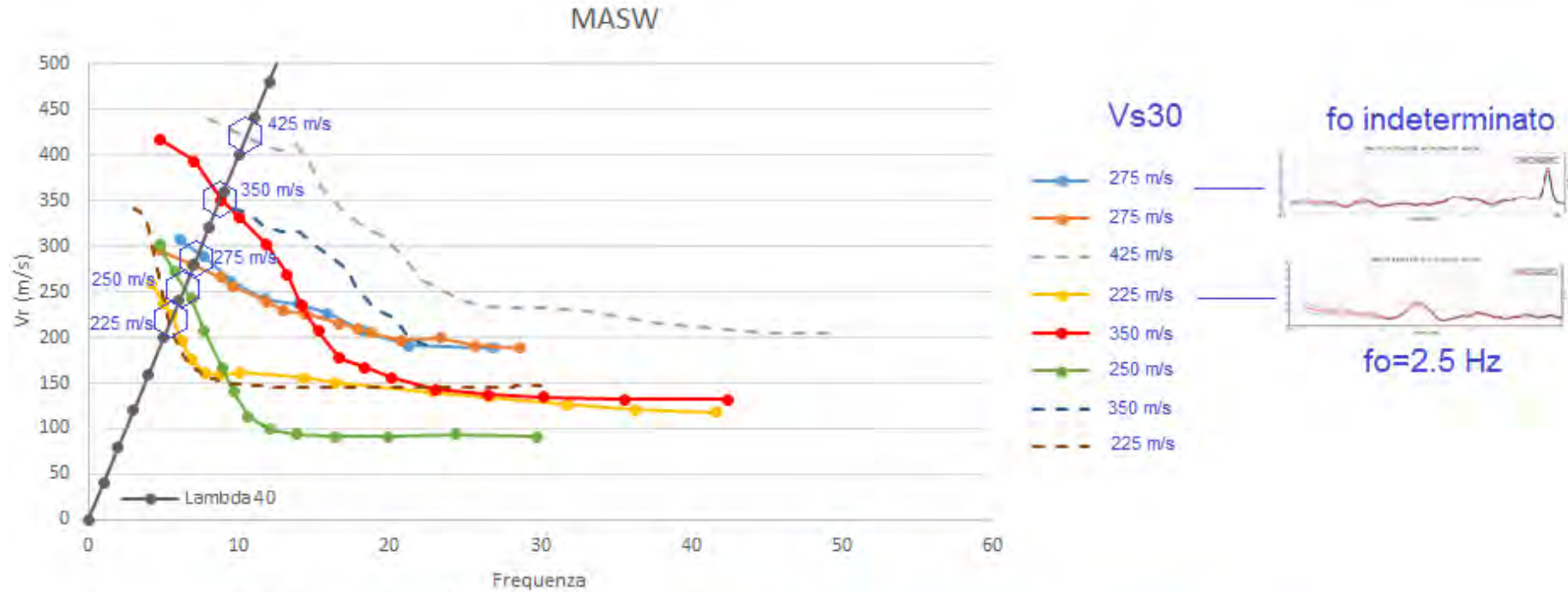
$$V_s(30) \approx \frac{e^a}{1-b} (1+30)^b$$

Se la velocità equivalente a 30m è significativamente minore di 800 m/s, ed il valore di f_0 è inferiore a 2 Hz allora il substrato si trova con tutta probabilità a profondità superiore ai 30m (ovviamente questa indicazione dovrebbe essere corroborata da informazioni geologiche)

In questo caso, il valore di V_{s30} potrebbe essere determinato semplicemente nella forma

$$V_{s30} \approx e^a 30^b$$

Un esempio di applicazione ($H > 30$ m)



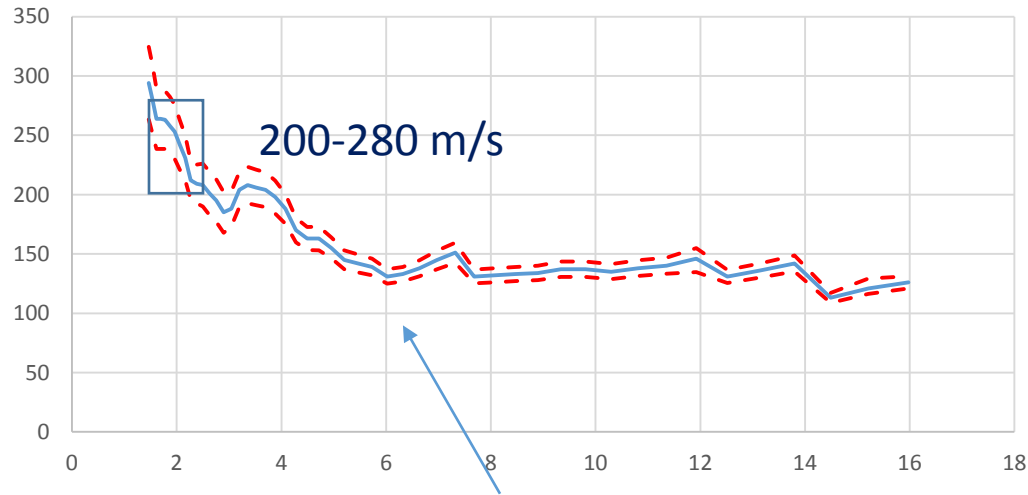
Classi		
frequenza (Hz)	$f_0 < 1$	
	1.5	$1 \leq f_0 < 2$
	2.5	$2 \leq f_0 < 3$
	3.5	$3 \leq f_0 < 4$
	4.5	$4 \leq f_0 < 5$
	5.5	$5 \leq f_0 < 6$
	6.5	$6 \leq f_0 < 7$
	7.5	$7 \leq f_0 < 8$
	≥ 8	
velocità (m/s)	$V_s < 200$	
	300	$200 \leq V_s < 400$
	500	$400 \leq V_s < 600$
	700	$600 \leq V_s < 800$
	$V_s \geq 800$	

FA calcolato per corti periodi ($0.1 < T < 0.5$ s)											
f_0 (Hz)											
	≤ 1	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	≥ 8	75° perc.	
V_{s30} (m/s)	< 200	1.0	1.3	1.7	1.8	1.7	1.7	2.0	1.8	1.2	1.4
	300	1.1	1.4	1.7	1.8	1.7	1.7	2.0	1.8	1.4	1.4
	500	1.1	1.3	1.5	1.7	1.6	1.5	1.5	1.7	1.6	1.4
	700	0.9	1.1	1.3	1.5	1.3	1.3	1.2	1.2	1.3	1.2
	≥ 800	1.0	1.0	1.0						1.1	1.0

FA calcolato per lunghi periodi ($0.5 < T < 1$ s)											
f_0 (Hz)											
	≤ 1	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	≥ 8	75° perc.	
V_{s30} (m/s)	< 200	1.8	2.2	1.9	1.7	1.6	1.5	1.3	1.6	1.8	2.1
	300	1.4	2.0	1.9	1.7	1.6	1.5	1.3	1.6	1.8	1.8
	500	1.2	1.7	1.6	1.5	1.5	1.5	1.4	1.5	1.6	1.5
	700	1.1	1.3	1.4	1.3	1.2	1.3	1.2	1.1	1.2	1.2
	≥ 800	1.1	1.2	1.2					1.0	1.0	1.1

Se ci si aspetta un significativo contrasto di impedenza sismica al tetto del substrato sismico, allora è possibile utilizzare il valore di f_0 per la stima del VsH e della profondità H del substrato. Infatti, sulla base delle stesse assunzioni definite in precedenza,

Curva di dispersione

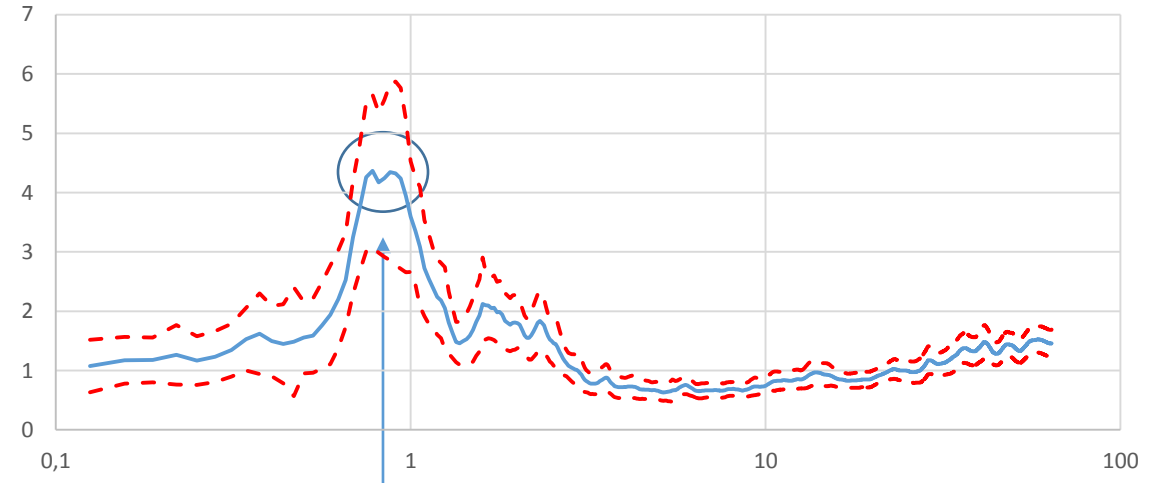


$$[f_h \approx 2f_0, f_h \approx 2.9f_0]$$

$$V_s H \approx 1.1 V_r(f_h)$$

$$H \approx \frac{V_s H}{4f_0}$$

Curva H7V



$$f_0 = 0.85 \text{ Hz}$$

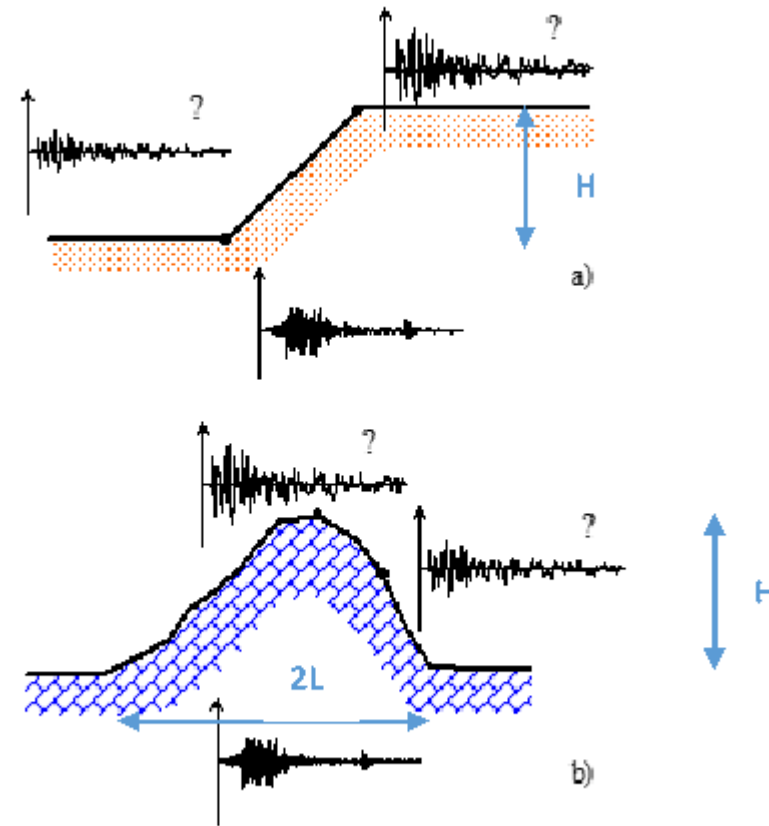
$$V_s H = 220-300 \text{ m/s}$$

$$H = 70-90 \text{ m}$$

Viene anche fornita una procedura semplificata per definire gli effetti di amplificazione indotti dalla morfologia superficiale (pendii e creste)

Questa procedura va applicata solo laddove il substrato è affiorante

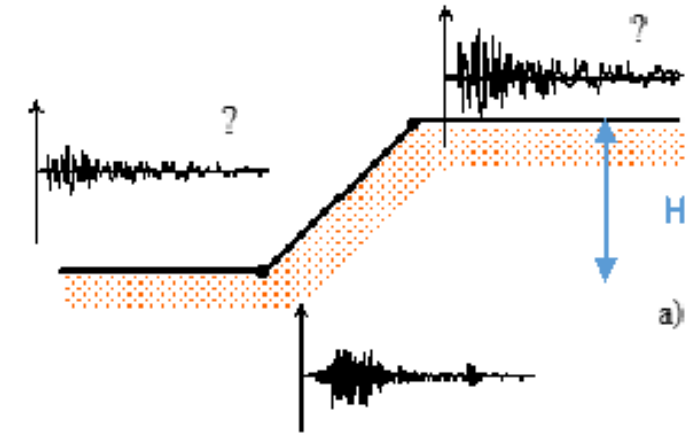
In pratica si assume che gli effetti stratigrafici (laddove esistono) siano dominanti



Sulla **sommità** dei **pendii** i fenomeni di amplificazione topografica interessano prevalentemente i valori di periodo intorno a

$$T_0 = 5H/V_s$$

dove H è altezza del pendio, V_s è la velocità delle onde di taglio media (pesata sullo spessore) dei materiali che costituiscono il pendio.



Fa = 1.0 per pendii di inclinazione minore di 15°

Fa= 1.2 per pendii di inclinazione maggiore di 15° e minore di 30°

Fa= 1.4 per pendii di inclinazione maggiore di 30° (e fino a 75°)

Fa=1.55 per pendii subverticali (rupi)

Lungo il pendio Fa=1.2 solo se l'inclinazione è maggiore di 15°

Il valore di FA è assegnato solo all'intervallo di periodi in cui ricade T_0

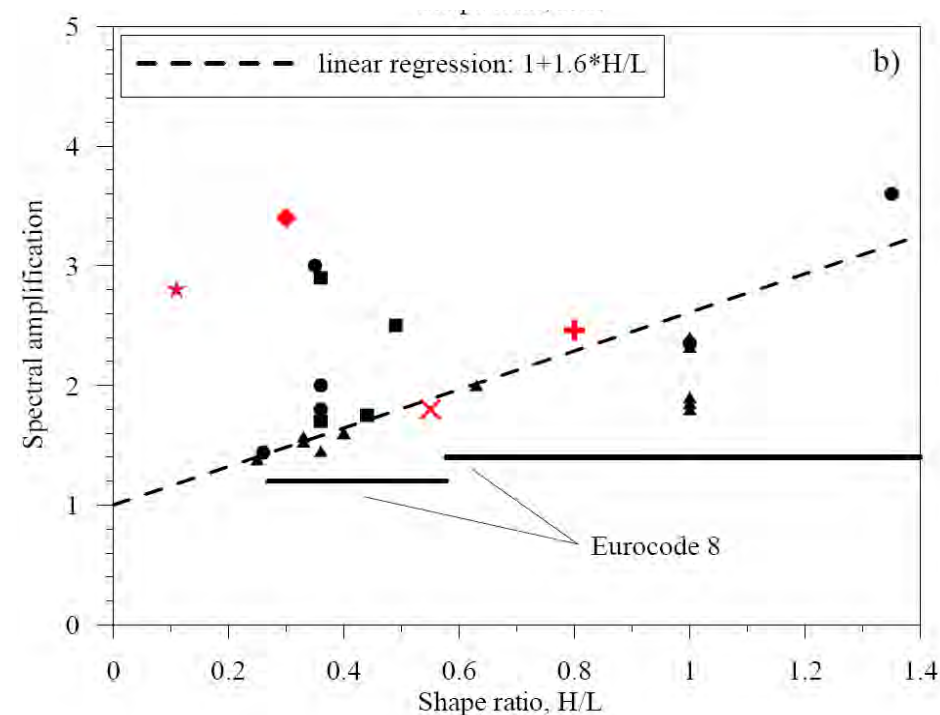
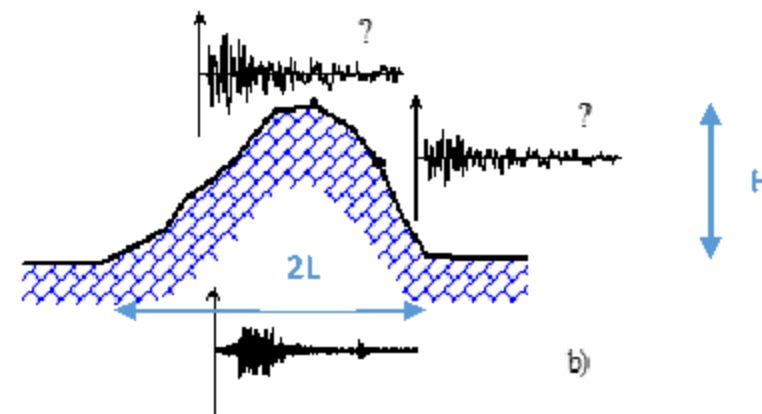
Alla **cresta di rilievi isolati** i fenomeni di amplificazione topografica interessano prevalentemente i valori di periodo intorno a:

$$T_0 = (1-1.4) * 2L/V_s$$

dove L è la semi-larghezza del rilievo misurata alla base, V_s è la velocità delle onde di taglio dei materiali che costituiscono il rilievo.

Il fattore di amplificazione topografica **in cresta** può essere valutato a partire dalla retta di regressione riportata nel grafico accanto in funzione del rapporto di forma H/L con H altezza del rilievo.

Il valore di FA è assegnato solo all'intervallo di periodi in cui ricade T_0

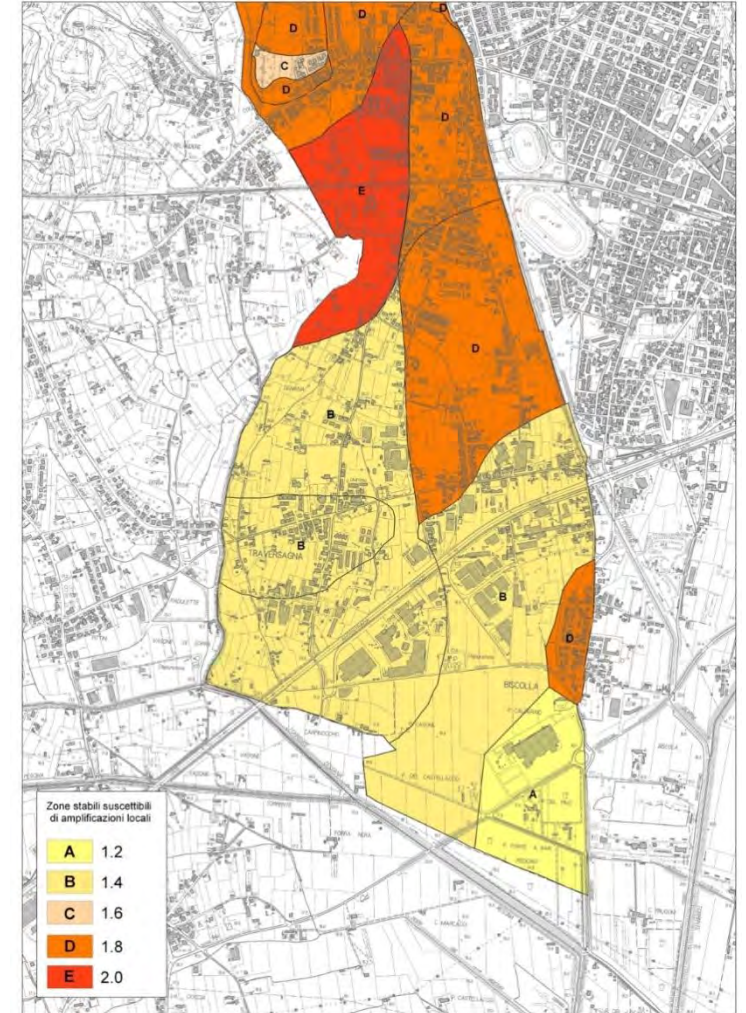


Conclusioni

La principale differenza della MZS di livello II rispetto alla MZS di livello I è la quantificazione in forma integrale degli effetti di amplificazione stratigrafica e morfologica (FA - Fattori di Amplificazione) attraverso metodi semplificati (abachi)

I fattori di amplificazione vengono forniti su bande di periodi pre-definite: saranno quindi fornite carte distinte dei fattori di amplificazione

La prospezione sismica (in configurazione attiva o passiva) gioca un ruolo chiave nella Microzonazione Sismica di Livello II, fornendo le informazioni necessarie alla determinazione dei Fattori di Amplificazione nella diverse MOPS. Inoltre fornisce nuovi vincoli al modello geologico di riferimento e alla geometria delle MOPS



Naturalmente, non tutti i casi sono risolvibili attraverso procedure semplificate e può essere necessario ricorrere a procedure di inversione avanzate (per esempio per valutare le velocità delle onde S nel substrato laddove non fosse affiorante). In questi casi bisogna ricorrere a procedure di inversione avanzate

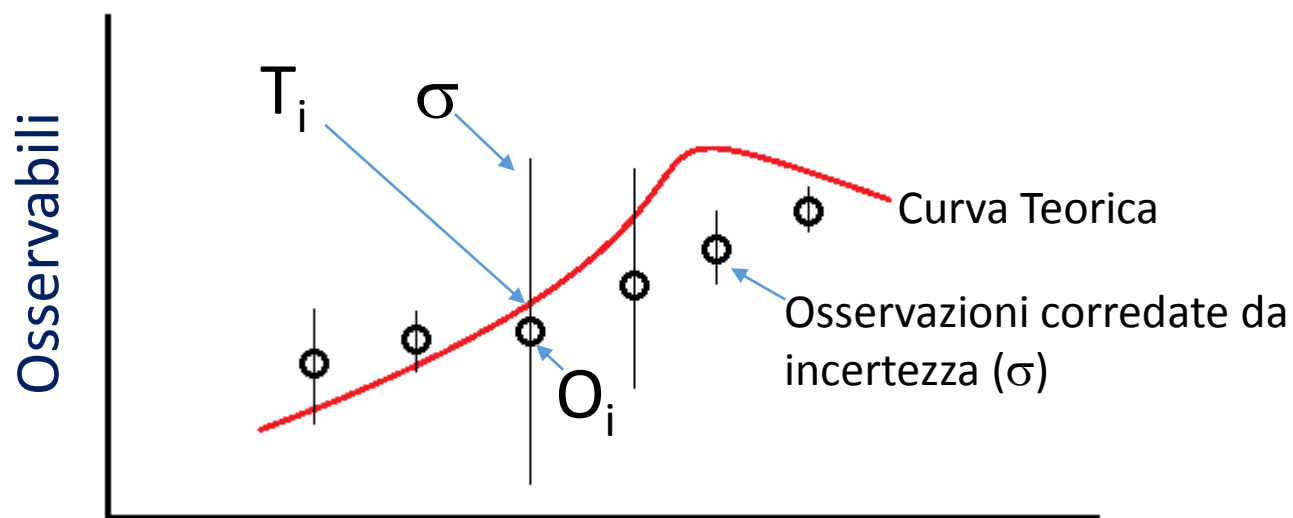
Le procedure di inversione hanno tutte la stessa struttura

1. Dispongono di una procedura numerica (basata su un modello fisico) per la determinazione del valore teorico dell'osservabile (curva di dispersione e/o curva H/V) a partire da una determinata configurazione stratigrafica (risolvono il problema diretto).
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 costo** o di **disaccordo** o **misfit**)
3. Definisco un criterio di arresto per definire quando la procedura ha raggiunto un esito soddisfacente

La **funzione di costo** ha una forma del tipo

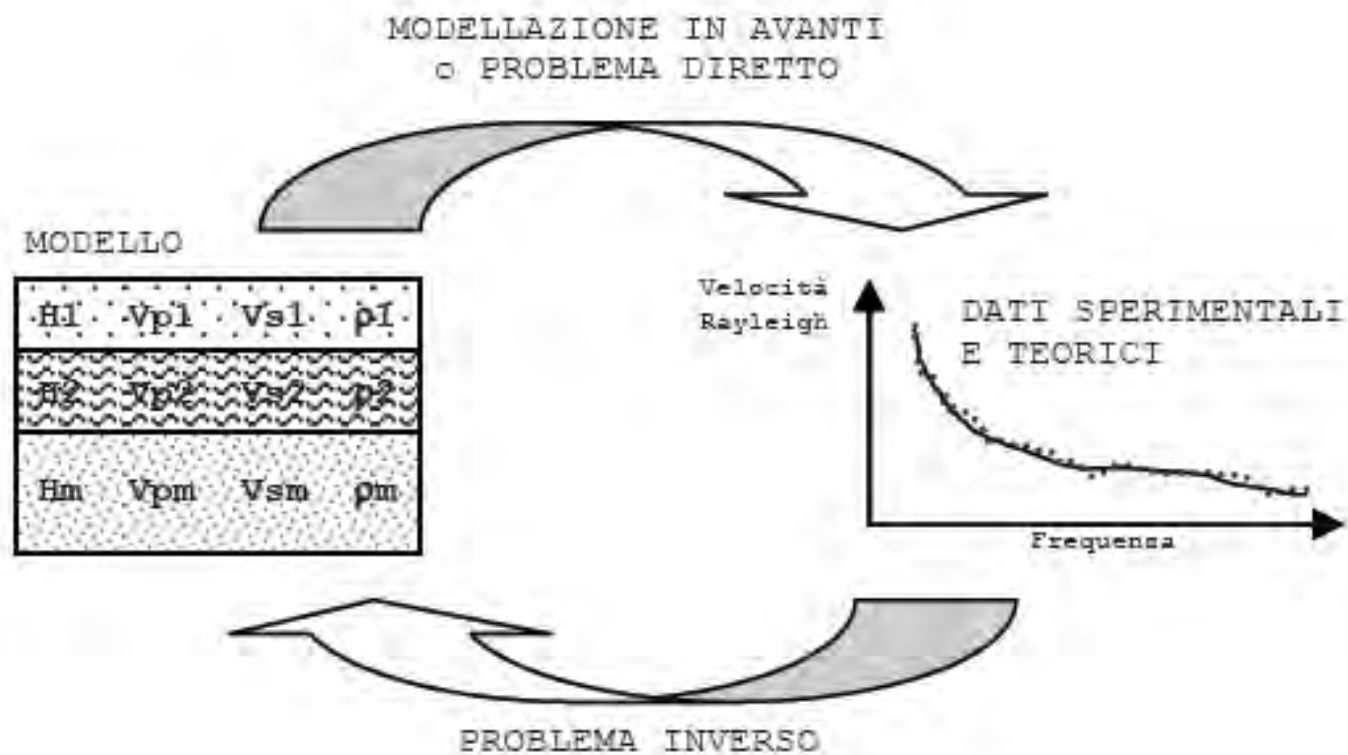
$$L^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(O_i - T_i)^2}{\sigma^2}$$

I dati peggio definiti
'valgono' di meno



Posso quindi procedere in due modi

1. Perturbo gradualmente in modo manuale il modello iniziale cercando di ridurre il disaccordo fra i risultati del modello e le osservazioni in modo da non allontanarmi dal modello iniziale (approccio diretto): è un approccio che funziona se il numero di parametri da determinare (gradi di libertà) è basso e se dispongo di vincoli molto stringenti sulla struttura del sottosuolo
2. Dispongo di una procedura automatica per cambiare le caratteristiche del modello in funzione delle discrepanze fra le previsioni e le osservazioni (Inversione): diventa necessario quando il numero di gradi di libertà è elevato ed i vincoli disponibili sono relativamente vaghi



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

In pratica, i problemi che devo risolvere sono i seguenti

1. Disporre di un modello teorico che metta in relazione i parametri che mi interessano (per esempio i valori di V_s alle varie profondità) con le osservazioni (la curva di dispersione o la curva H/V)
2. Definire una **funzione di costo** adeguata a rappresentare il disaccordo fra le previsioni teoriche legate ad una data scelta dei parametri (un dato profilo di V_s) e le osservazioni. La soluzione ottimale corrisponderà alla scelta dei parametri che rende minima la funzione di costo
3. Definire un algoritmo di ricerca che trovi il minimo della funzione di costo esplorando lo spazio delle soluzioni possibili

Immaginiamo di avere un problema con due soli parametri (potrebbe essere lo spessore delle coperture ed il valore di V_s nelle coperture)

I valori possibili dei due parametri (V_s e H) costituiscono lo spazio di ricerca della soluzione

La funzione di costo avrebbe la forma di una superficie che rappresenta il valore della funzione di costo associata ad una data coppia di parametri

Questa superficie ha un minimo che corrisponde alla coppia di valori che meglio 'spiega' le osservazioni

Se disponessimo di una 'mappa' di questa superficie sarebbe facile trovare il minimo

Tuttavia per costruire questa mappa dovrei provare tutti i valori possibili dei due parametri: se il modello fisico è complicato potrei metterci degli anni

Allora devo trovare altre soluzioni

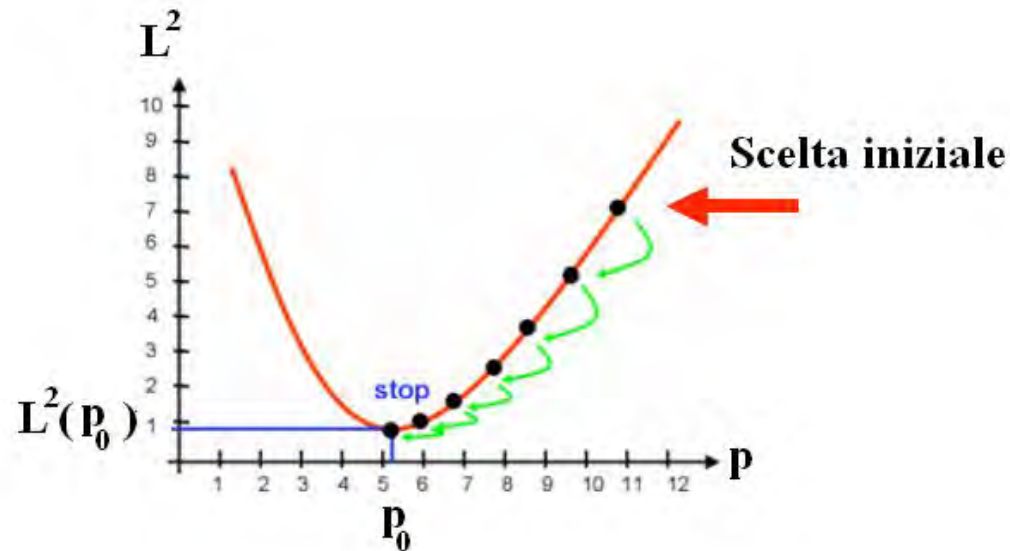


Se la superficie della funzione di costo fosse fatta così, il problema potrebbe essere affrontato con i cosiddetti metodi **a gradiente**

In pratica si parte da un valore qualunque della coppia di parametri e ci si sposta progressivamente nella direzione in cui la funzione di costo diminuisce più in fretta

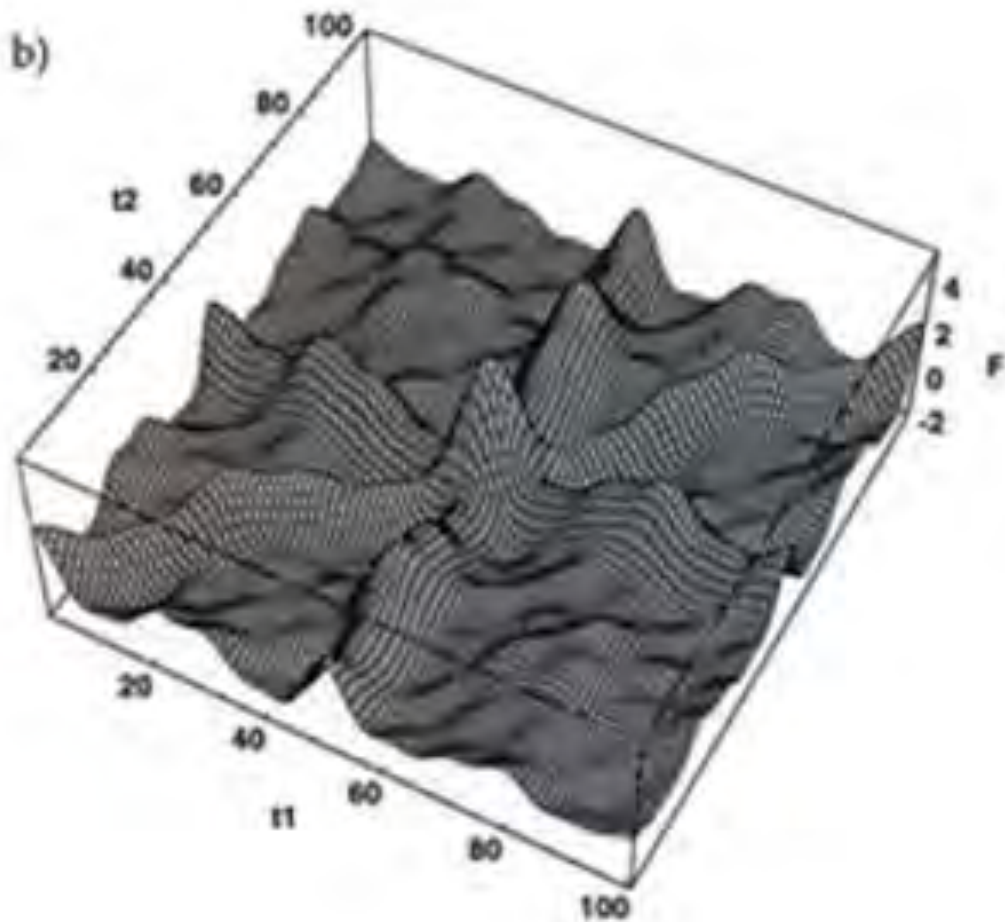
In questo caso, un dato parametro (per esempio la Vs in un dato strato) viene variato modificandolo in modo da ridurre il valore della funzione di costo. In particolare, scrivo variazione in funzione di un parametro h (positivo) che dipende da come varia la funzione di costo L^2

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



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 nel caso delle curve di dispersione ed H/V la funzione di costo ha una forma assai più irregolare con molti minimi locali

Se parto dal punto sbagliato (una certa configurazione iniziale) posso finire in un minimo 'locale' molto lontano da quello 'assoluto' che corrisponde alla soluzione ottimale

La ricerca in questo caso diventa assai più complicata

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 (approccio esaustivo o ‘Uniform Search’)

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

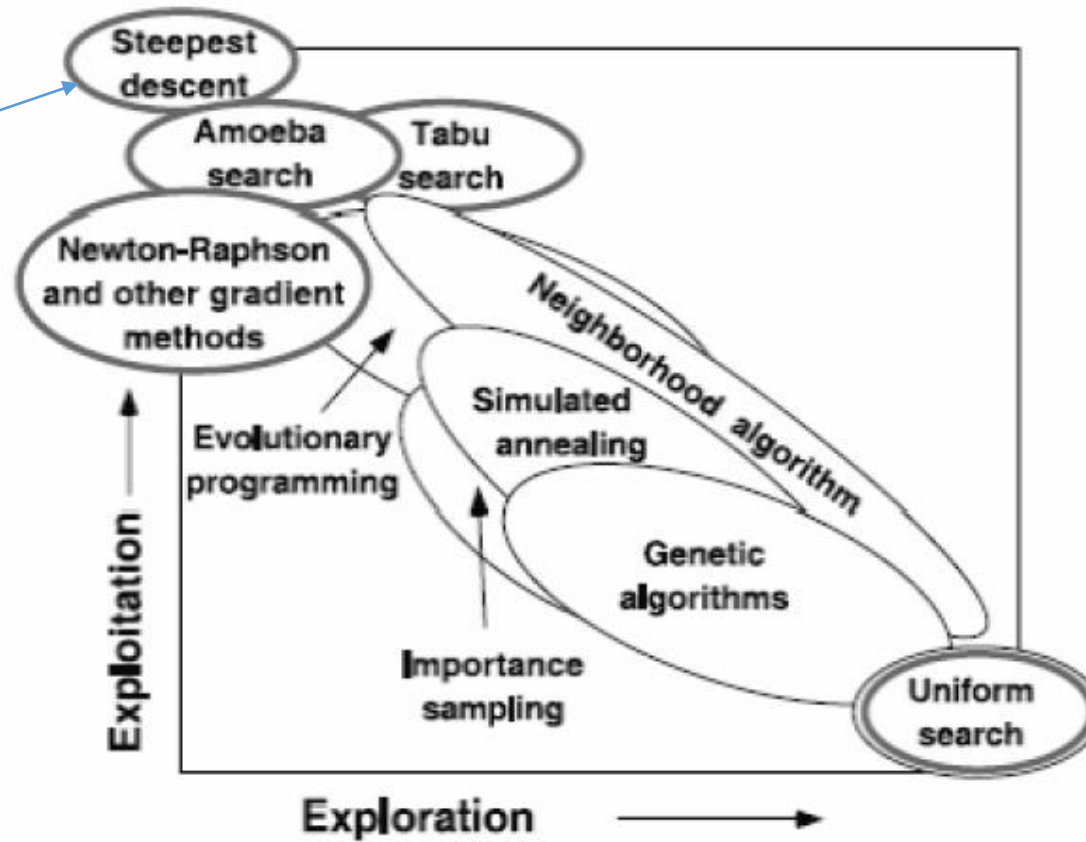
Esplorare tutte le possibili combinazioni è semplicemente fuori dalla portata di qualunque procedura di questo tipo

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

Nel **metodo Monte-Carlo** questa esplorazione viene effettuata casualmente riducendo progressivamente l’area della ricerca

Metodo del gradiente

Il metodo del gradiente sfrutta al massimo i confronti effettuati ma esplora poco lo spazio dei parametri e si lascia facilmente intrappolare in un minimo locale



Ricerca Uniforme
Esplora tutto lo spazio dei parametri e non si lascia intrappolare ma rischia di richiedere un tempo infinito

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)

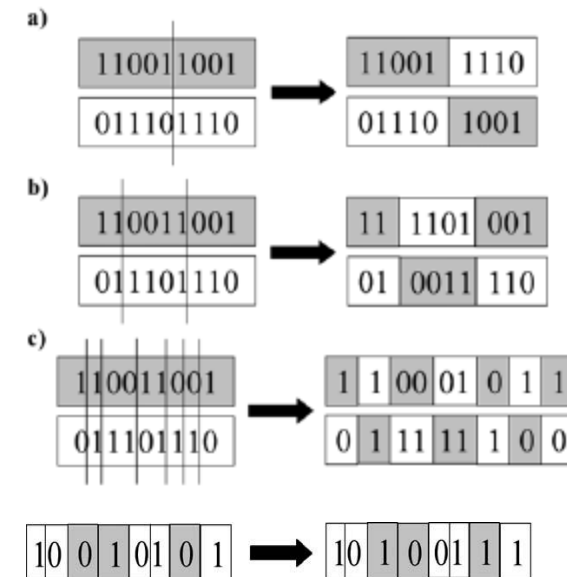
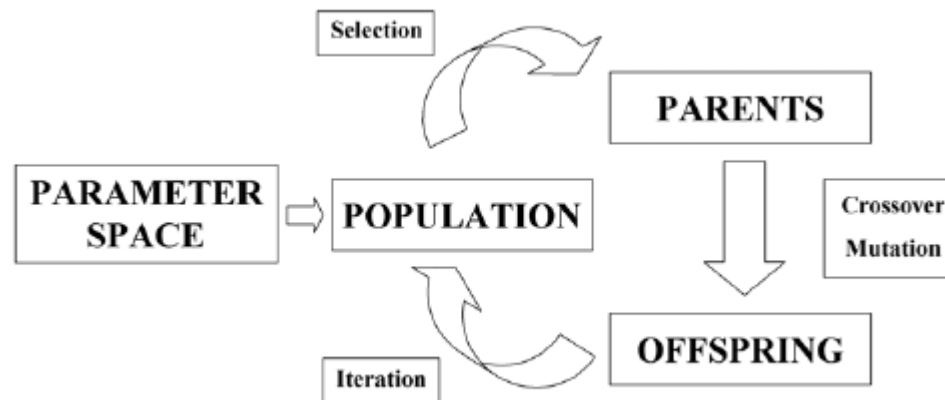
Il metodo degli **algoritmi genetici** è di tipo intermedio: Si tratta di una procedura che “mima” l’evoluzione naturale

- 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

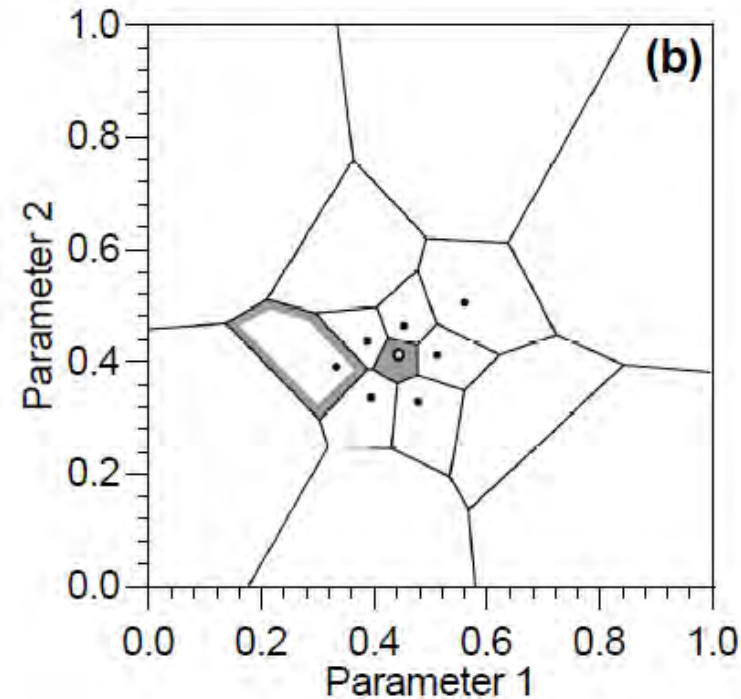
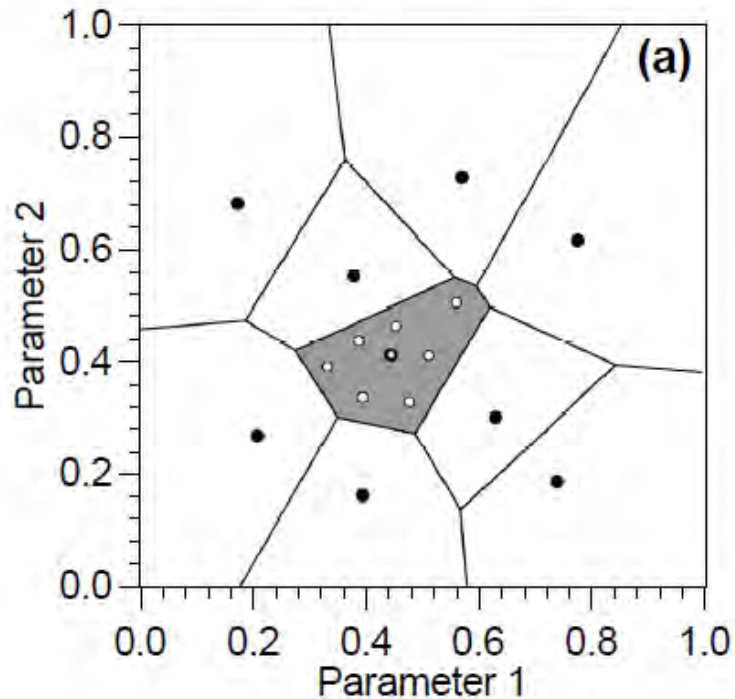
Algoritmi Genetici

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



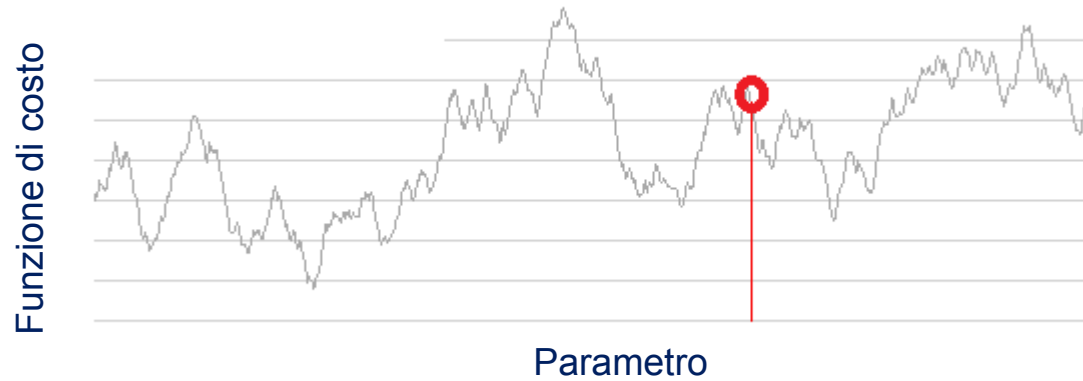
- Tecnica esplorativa dello spazio dei modelli
- Risoluzione di problemi non lineari
- Non vincolata da un modello iniziale

Vicini Prossimi (Nearest Neighborhood)



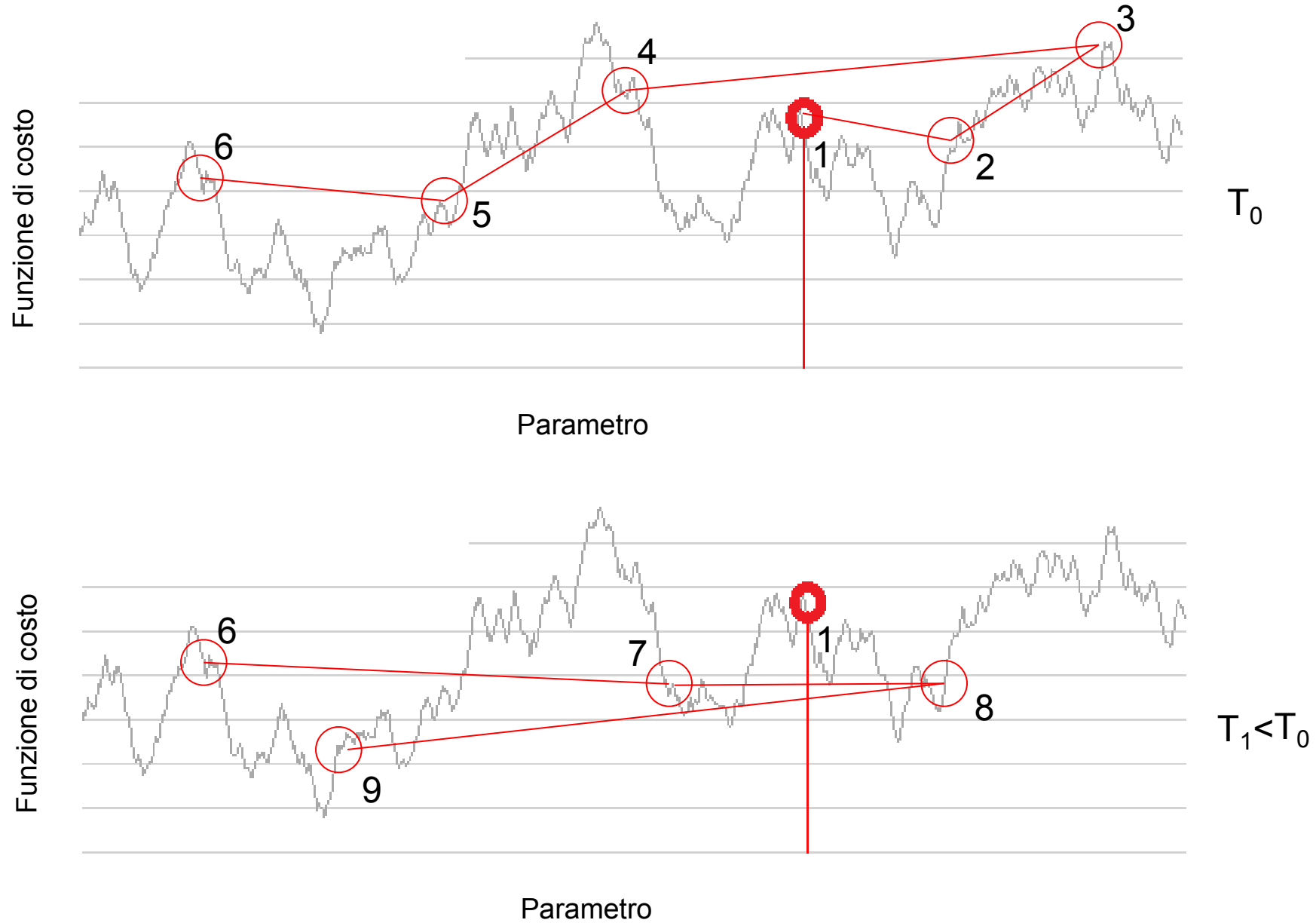
- 1. Vengono generati casualmente alcuni modelli nello spazio dei parametri e viene definito un 'intorno' di ciascun modello (modelli simili)*
- 2. Si prende l'intorno del modello migliore (ovvero quello con il minore valore della funzione di costo) e vengono generati a caso modelli al suo interno*
- 3. I nuovi modelli definiscono nuovi 'intorni' (più piccoli) ed il processo si ripete fino a trovare il valore minimo*

Ricottura Simulata (Simulated annealing)

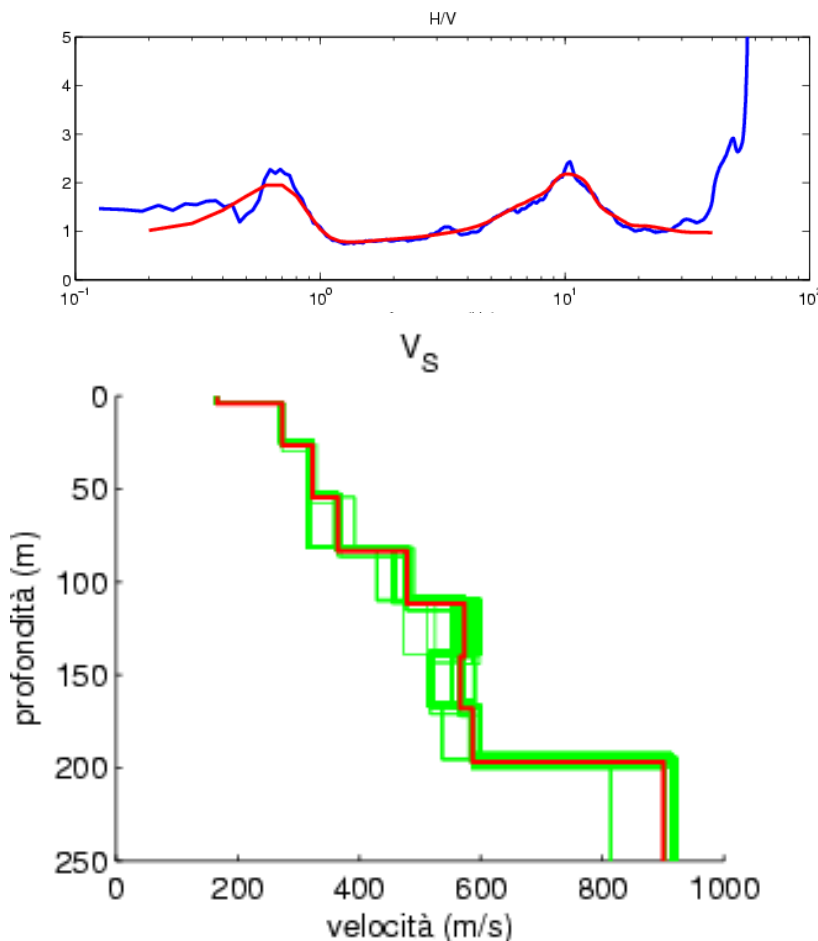
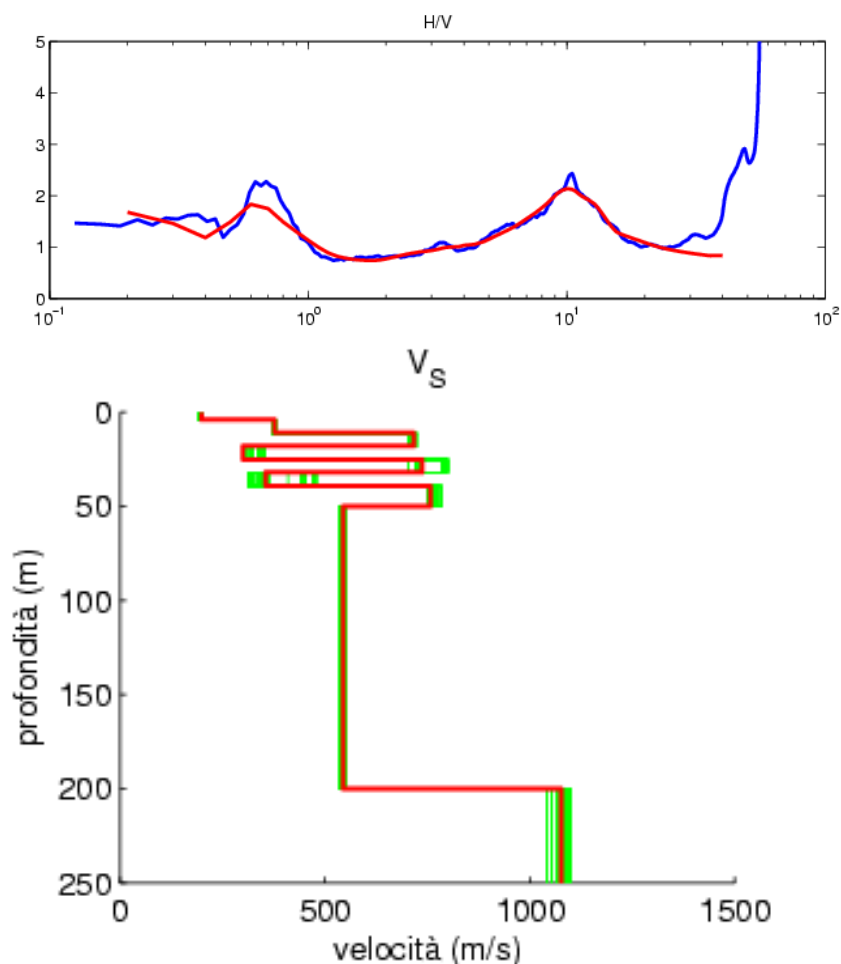


1. Viene definita una combinazione iniziale di parametri e si valuta la corrispondente funzione di costo
2. I parametri iniziali vengono perturbati in maniera casuale più volte fino a trovare un valore perturbato con una funzione di costo minore di quella iniziale oppure quella con un valore maggiore con una certa probabilità che è inversamente proporzionale alla differenza di valore della funzione di costo secondo un parametro T ('temperatura'): maggiore è T e maggiore è la probabilità che anche una soluzione caratterizzata da un elevato valore della funzione di costo sia considerato come il valore accettabile
3. Progressivamente (in maniera lenta), il parametro T viene abbassato riducendo di fatto la possibilità di 'scavalcare' eventuali massimi locali.

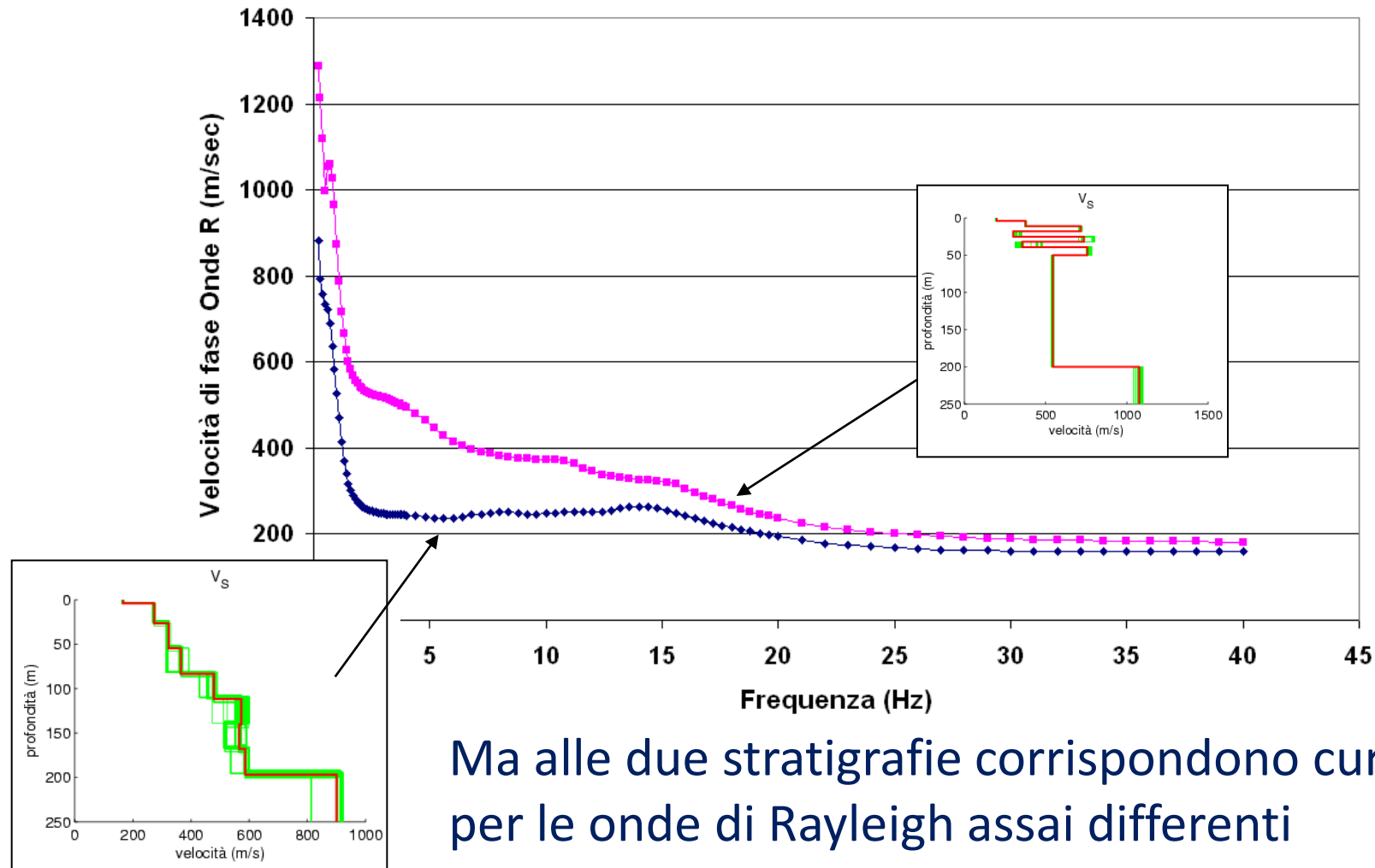
Ricottura Simulata (Simulated annealing)



Naturalmente posso applicare le stesse strategie di inversione alla curva HVSR



In generale
esisteranno
numerosa
configurazioni del
sottosuolo capaci di
produrre la stessa
curva sperimentale
(all'interno delle
incertezze)



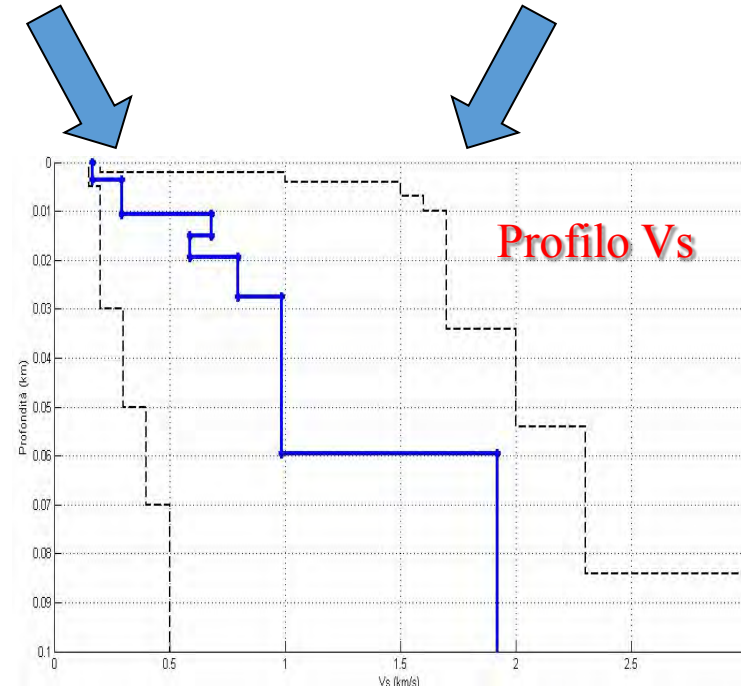
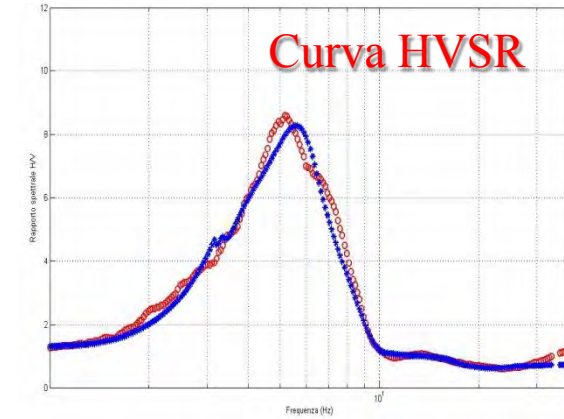
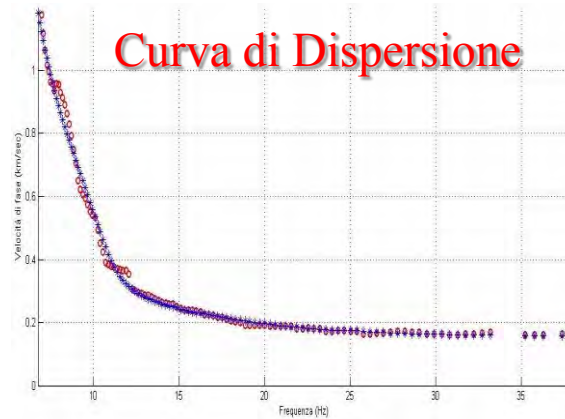
Ma alle due stratigrafie corrispondono curve di dispersione per le onde di Rayleigh assai differenti

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

Quindi l'approccio più promettente è quello di utilizzare procedure di inversione congiunta

Si tenga anche presente che la curva di dispersione e la curva H/V hanno sensibilità differenti al profilo di velocità delle onde S

In particolare, la curva di dispersione vincola bene i valori più vicini alla superficie mentre la curva H/V vincola quelli più profondi



SOFTWARE LIBERI PER INVERSIONE CONGIUNTA DISPONIBILI

DINVER (GEOPSY PACKAGE)



La modellazione diretta si basa essenzialmente sull'apporto delle onde di Rayleigh, in particolare del loro modo fondamentale.

La metodologia di inversione si basa su un metodo di ricerca globale (Neighbourhood Algorithm).

Tutorial online: <http://www.geopsy.org/wiki/index.php/Dinver>

HV-INV



La modellazione diretta si basa sull'apporto di tutte le fasi sismiche (campo completo: onde di volume e onde superficiali) seguendo la teoria del Campo Diffuso (Sanchez-Sesma *et al.* 2011).

Sono presenti metodologie di inversione globali (Monte-Carlo, Simulated Annealing, Modified Simulated Annealing) e locali (Simplex Downhill, Interior-Point).

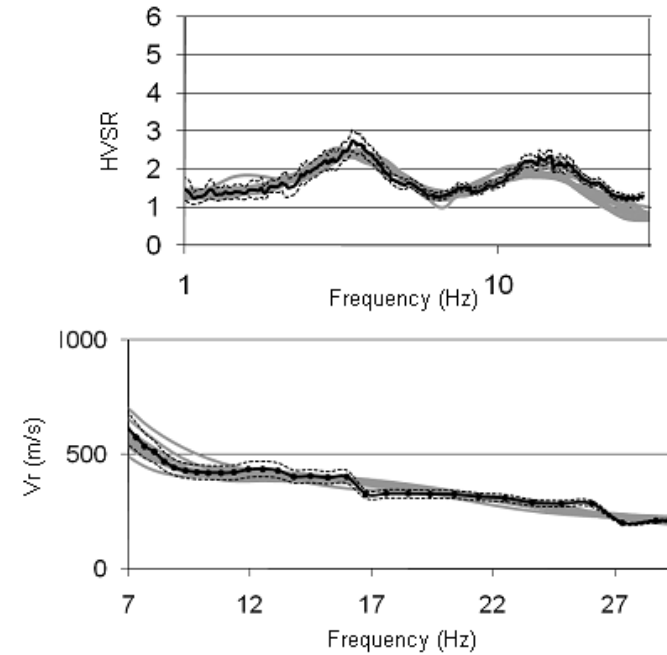
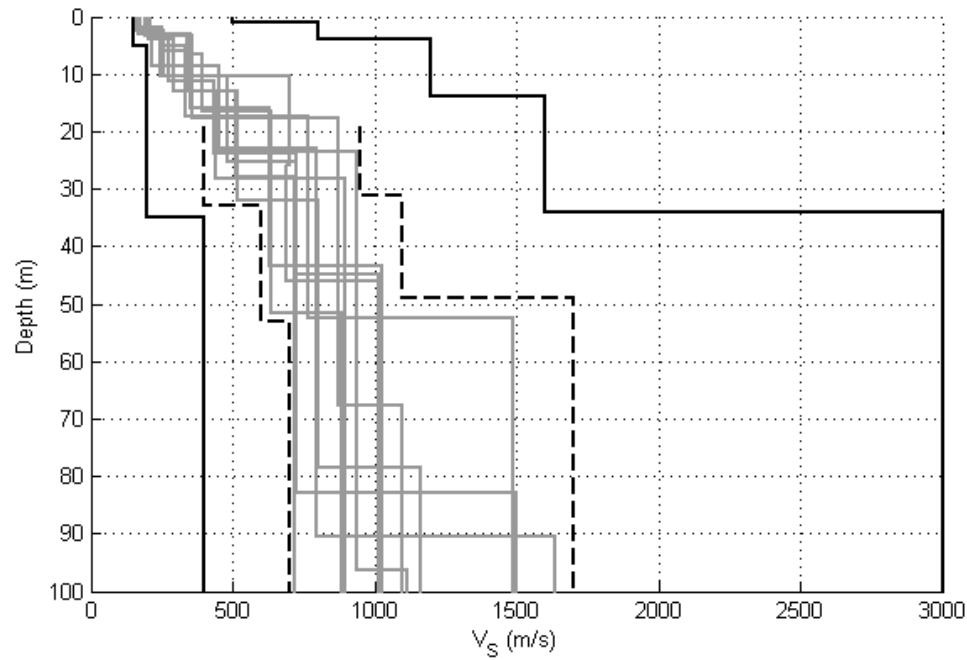
Tutorial online: <https://w3.ual.es/GruposInv/hv-inv/UserManual.html>

La differenza sostanziale tra i due tipi di modellazione diretta consiste nella modellazione della curva H/V.

Secondo gli sviluppatori di Dinver, la curva HVSR può essere riprodotta **dall'ellitticità del modo fondamentale delle onde di Rayleigh**. Ciò dà importanza soprattutto alla riproduzione della frequenza del massimo H/V (considerata la parte più informativa della curva) piuttosto che alla sua ampiezza. Tale approssimazione permette una notevole velocità computazionale da parte del software ma non tiene conto della presenza di altre fasi (soprattutto le onde di Love) che pure influenzano la misura

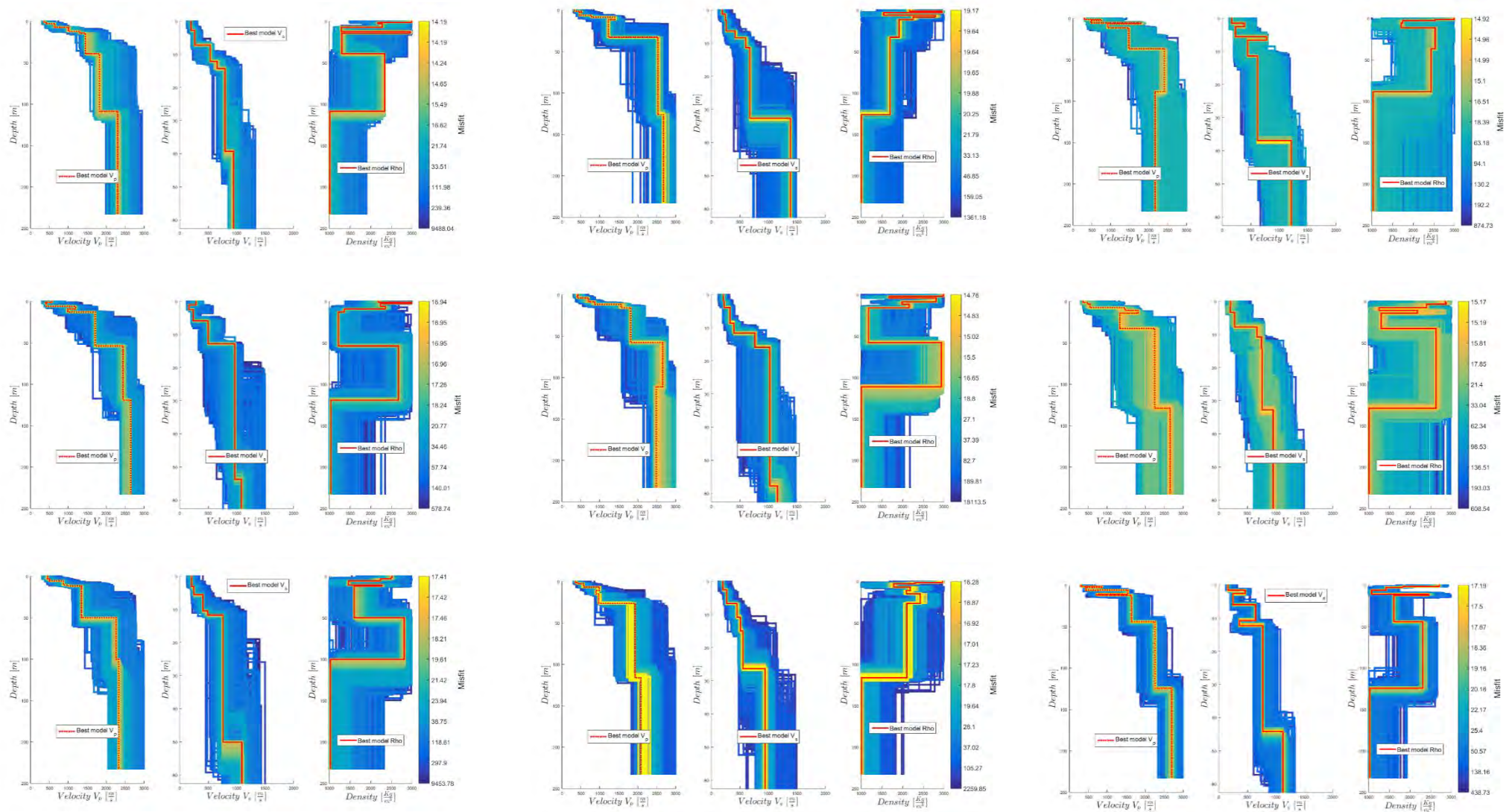
HV-Inv invece riproduce la curve HVSR tenendo conto sia delle onde di volume sia delle onde superficiali, compresi i loro modi superiori (eventualmente l'apporto delle onde di volume può essere azzerato). Questo permette in linea teorica una maggiore facilità nella riproduzione dell'ampiezza del picco e dell'andamento complessivo della curva.

Per quanto riguarda la curva di dispersione, in entrambi i casi la modellazione diretta si basa sull'apporto del modo fondamentale delle onde di Rayleigh. Geopsy permette inoltre la possibilità di introdurre come dato in ingresso per l'inversione anche le curve di dispersione dei modi superiori (Rayleigh e Love) se questi vengono riconosciuti dall'osservazione sperimentale (è quindi rivolta soprattutto alla sismica attiva).

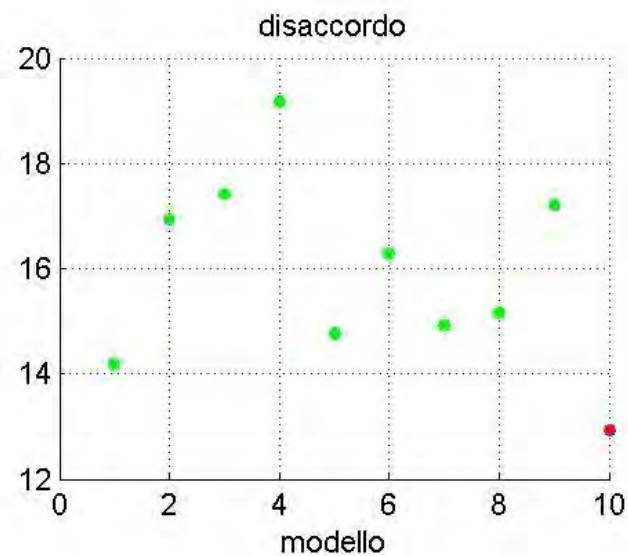
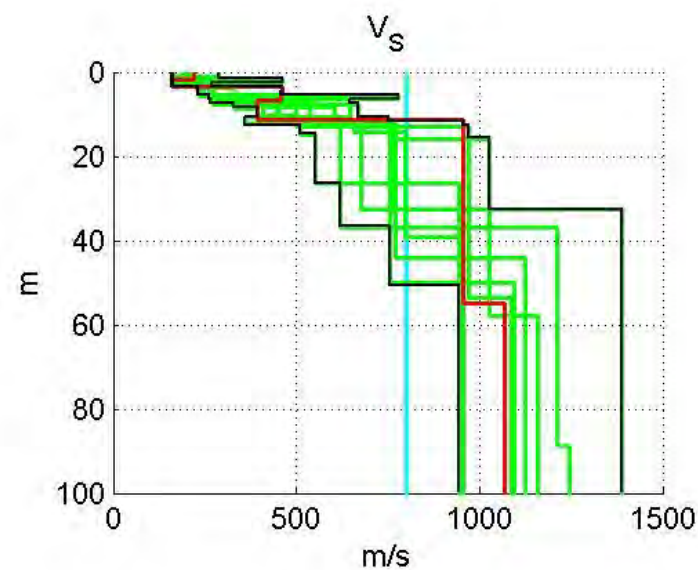
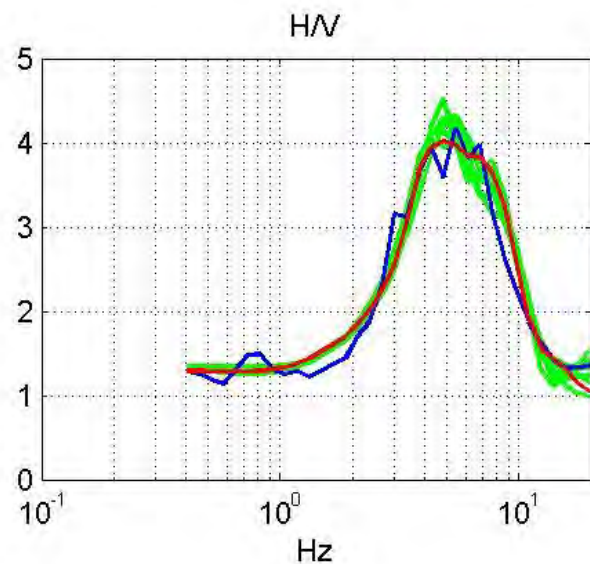
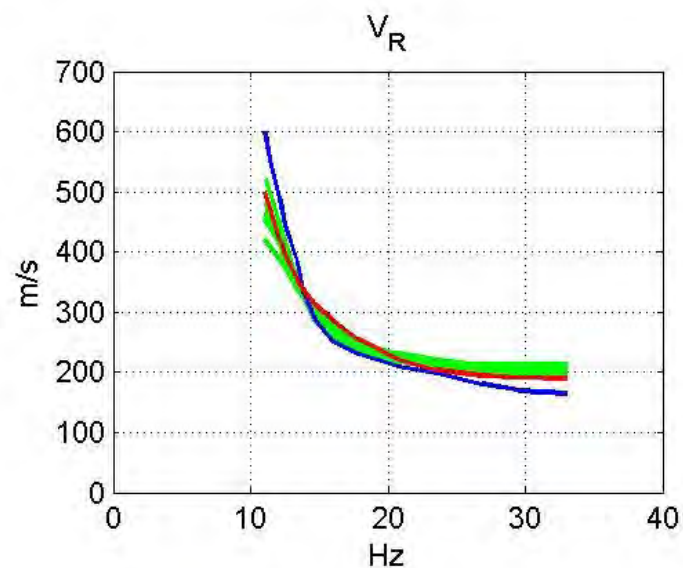


Qualunque sia il codice utilizzato, le soluzioni compatibili con le osservazioni saranno molte; l'obiettivo dell'analisi quindi non è quello di fornire un singolo profilo di V_s quanto piuttosto quello di dare degli intervalli di valori compatibili con le osservazioni e le loro incertezze sperimentali

Questa analisi è più agevole con procedure di inversione automatica piuttosto che la modellazione diretta



Per esplorare il dominio di indeterminazione del profilo di Vs ottenuto, la procedura di inversione viene ripetuta più volte utilizzando gli stessi dati sperimentali e variando di poco i parametri iniziali (p.es. il numero di strati). Si trattiene quindi solo la soluzione migliore di ogni inversione



Come si vede, esistono numerose soluzioni tutte caratterizzate circa dallo stesso valore di disaccordo e quindi analogamente capaci di spiegare le osservazioni

Si tenga comunque presente che:

- 1. Non c'è comunque garanzia che la soluzione trovata sia la migliore: l'ideale è ripetere l'analisi più volte per determinare lo spazio delle soluzioni possibili e quindi (anche considerando i vincoli di tipo geologico) definire le incertezze sul profilo di velocità; risulta anche utile calibrare localmente il modello interpretativo con dati da misure in foro (DH)*
- 2. Il risultato dipende dal dato iniziale dalle incertezze associate a quest'ultimo: cambiare queste incertezze può voler dire trovare una soluzione differente*
- 3. Il risultato dipende anche dalla funzione di costo scelta*
- 4. Infine dipende dal tipo di modello diretto utilizzato per la modellazione diretta*

Per fare un esempio, esistono vari modelli che collegano la curva H/V al profilo di Vs (tutti 1D):

- 1. La curva H/V rappresenta il rapporto fra lo spettro di ampiezza delle onde S (H) e quello delle onde P (V) assumendo un input omogeneo su tutte le frequenze*
- 2. La curva H/V è l'ellitticità delle onde di Rayleigh nel modo fondamentale*
- 3. La curva H/V è determinata dai vari modi di vibrazione dalle onde di Rayleigh (H e V) e Love (V) presenti nel campo di vibrazioni ambientali come effetto di sorgenti superficiali diffuse*
- 4. La curva H/V è il risultato di tutte le fasi sismiche presenti nel campo di vibrazioni come effetto di sorgenti superficiali uniformemente distribuite*
- 5. La curva H/V è il risultato di tutte le fasi sismiche presenti nell'assunzione che il campo sia 'diffuso'*

Questi modelli produrranno ovviamente risultati differenti a parità di dato iniziale