



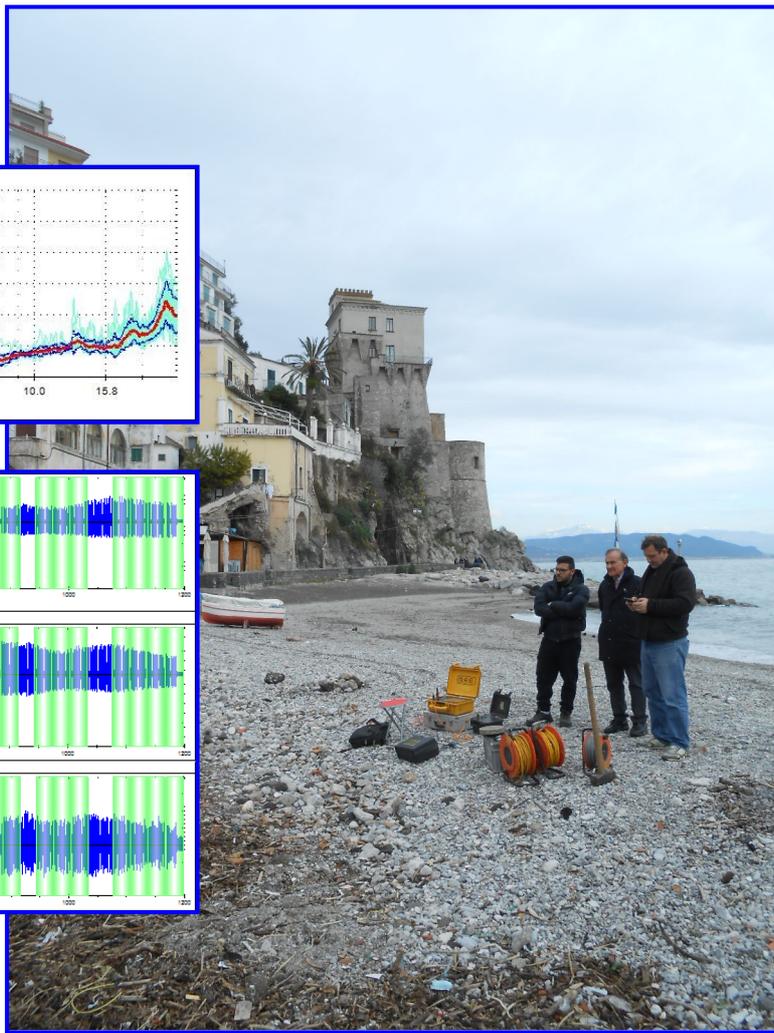
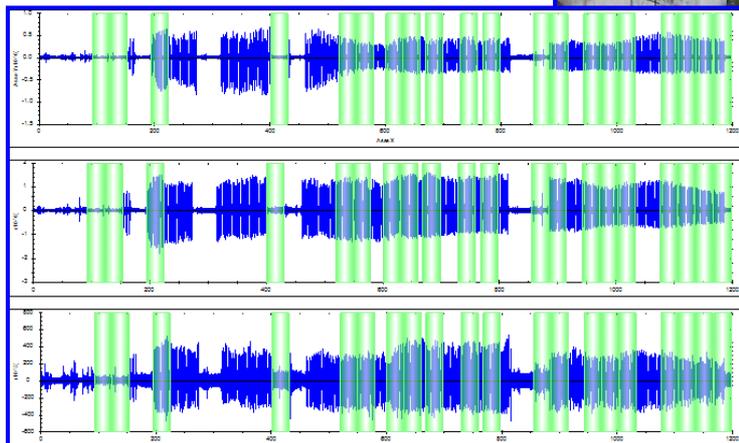
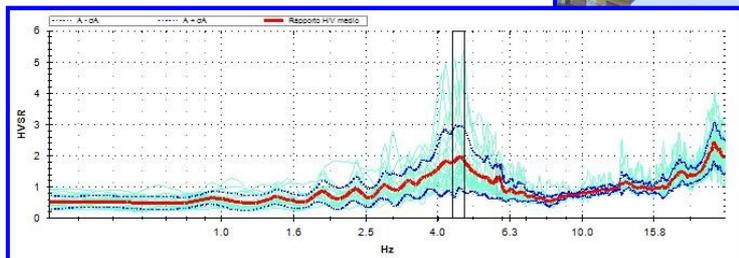
Concessione Ministeriale 5030  
Del 24.5.2011

**GEOSEVI S.A.S.**  
Sede legale: Via del Centenario 142  
C.A.P. 84084 FISCIANO (SA)  
Tel. Fax 089/9484088 cell. 347/2301400  
Partita IVA - C.F. 04666680659  
e- mail: geosevisas1@gmail.com



## COMUNE DI CETARA

PROVINCIA DI SALERNO



### INDAGINE SISMICA HVSR PER LA RELAZIONE GEOLOGICA FINALIZZATA ALLA REDAZIONE DEL P.U.C..

<i>Il Committente</i>	<i>Geosevi s.a.s.</i>
<i>Amministrazione Comunale di Cetara</i>	<i>Il Tecnico</i>
	<i>Dr. Geol. Francesco Cuccurullo</i>
<i>Fisciano, maggio 2015</i>	<i>REV. 0</i>

GEOSEVI s.a.s.  
Il Direttore Responsabile  
Dott. Domenico Sessa



Concessione Ministeriale 5030  
Del 24.5.2011

**GEOSEVI S.A.S.**  
Sede legale: Via del Centenario 142  
C.A.P. 84084 FISCIANO (SA)  
Tel. Fax 089/9484088 cell. 347/2301400  
Partita IVA – C.F. 04666680659  
e- mail: geosevisas1@gmail.com



## INDICE

1 - PREMESSA.....	3
2 - IL MICROTREMORE SISMICO AMBIENTALE E SUE BASI TEORICHE .....	4
3 - STRATIGRAFIA SISMICA DA INDAGINI A STAZIONE SINGOLA .....	6
4 - INDAGINE ESEGUITA.....	7
5 - ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DATI.....	8
6 - RISULTATI.....	10



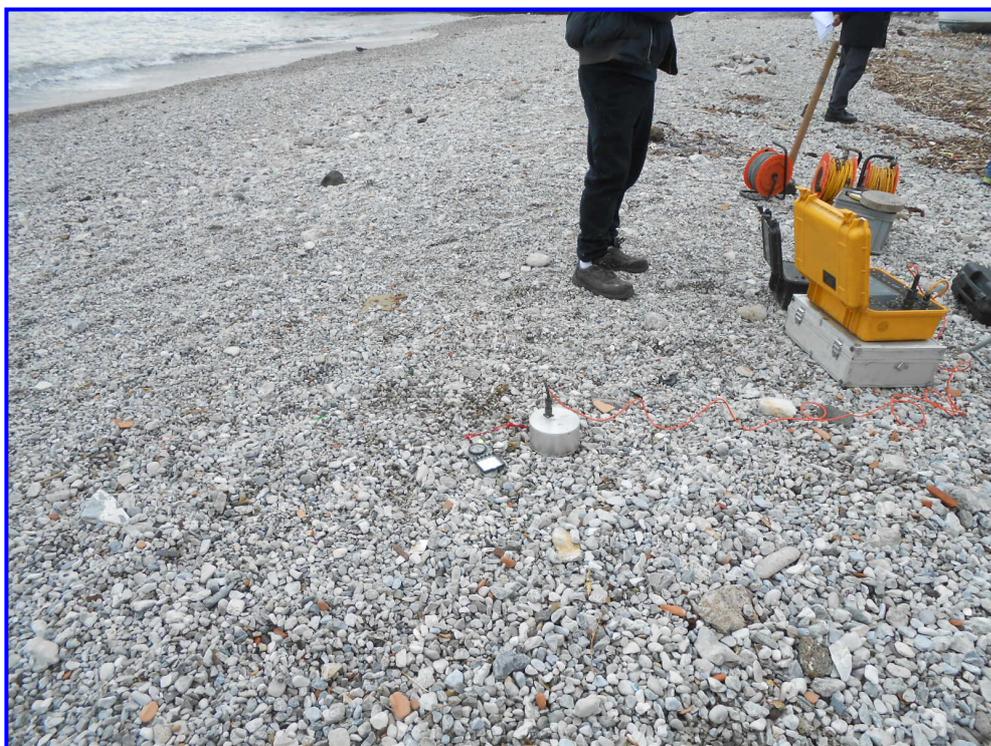
Concessione Ministeriale 5030  
Del 24.5.2011

**GEOSEVI S.A.S.**  
Sede legale: Via del Centenario 142  
C.A.P. 84084 FISCIANO (SA)  
Tel. Fax 089/9484088 cell. 347/2301400  
Partita IVA – C.F. 04666680659  
e- mail: geosevisas1@gmail.com



## 1 - PREMESSA

Su incarico dell'Amministrazione Comunale di Cetara, e sotto la direzione del dr. Geologo Renato Ferrara, è stata effettuata n°1 indagine di sismica passiva a stazione singola HVSR (microtremore ambientale) per la relazione geologica finalizzata alla redazione del Piano Urbanistico Comunale di Cetara (SA) (coordinate geografiche WGS84 del sito 40.646572° N - 14.702154° E) (Fig. 1), al fine di fornire una stima affidabile della frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo (modo fondamentale e predominante di oscillazione).



**Fig. 1 – Prospezione sismica passiva HVSR effettuata sul sito di interesse progettuale.**



Concessione Ministeriale 5030  
Del 24.5.2011

### **GEOSEVI S.A.S.**

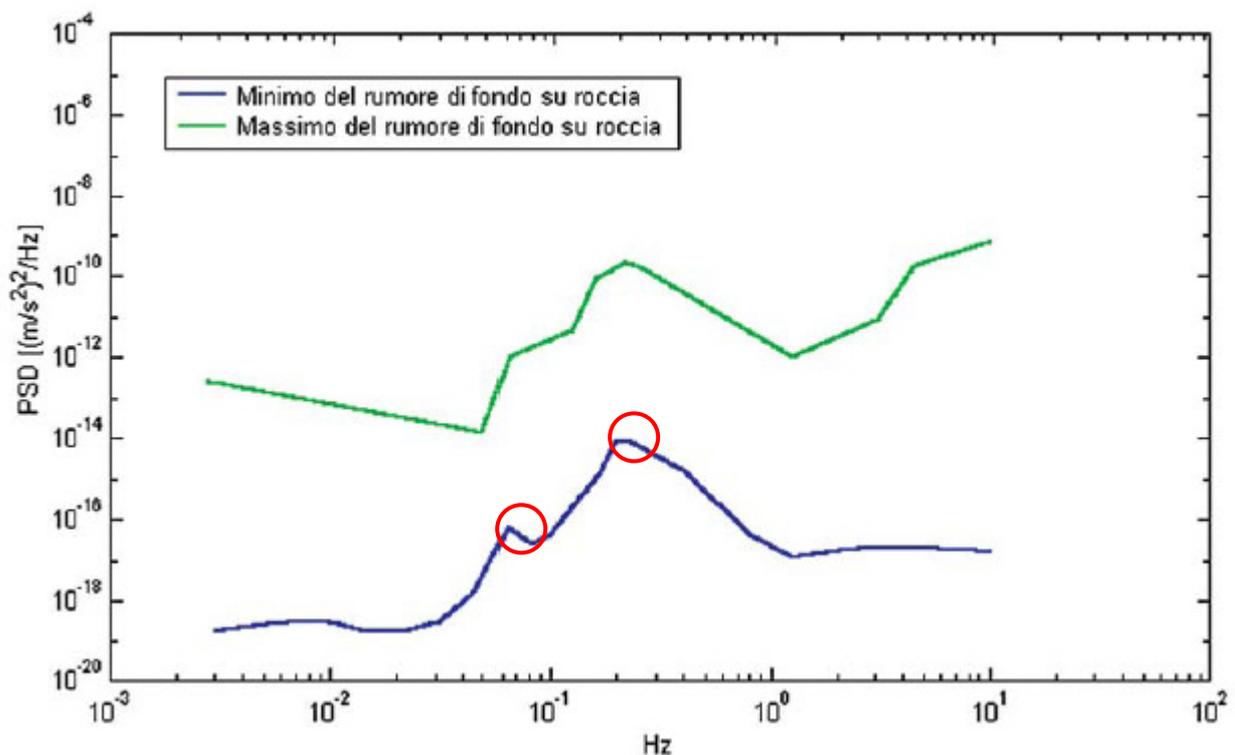
Sede legale: Via del Centenario 142  
C.A.P. 84084 FISCIANO (SA)  
Tel. Fax 089/9484088 cell. 347/2301400  
Partita IVA - C.F. 04666680659  
e- mail: geosevisas1@gmail.com



## **2 - IL MICROTREMORE SISMICO AMBIENTALE E SUE BASI TEORICHE**

Il rumore sismico, generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica, è presente ovunque sulla superficie terrestre; esso è denominato anche microtremore poiché riguarda oscillazioni molto più piccole di quelle indotte dai terremoti nel campo prossimo all'epicentro. I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi in quanto il rumore non è generato ad hoc, come ad esempio le esplosioni e/o le masse battenti della sismica attiva.

Nelle zone in cui non è presente alcuna sorgente di rumore locale e in assenza di vento, lo spettro in frequenza del rumore di fondo, in un litotipo roccioso e pianeggiante, ha l'andamento illustrato in Figura 2, dove la curva blu rappresenta il rumore di fondo minimo di riferimento mentre la curva verde rappresenta il 'massimo' di tale rumore, e dove i picchi a 0.14 Hz e 0.07Hz (cerchietti rossi in Figura 2) sono prodotti delle onde oceaniche sulle coste.



**Fig. 2 - Modelli standard del rumore sismico massimo (in verde) e minimo (in blu) per la Terra. I cerchi rossi evidenziano i picchi a 0.14Hz e 0.07Hz prodotti delle onde oceaniche sulle coste.**



Concessione Ministeriale 5030  
Del 24.5.2011

**GEOSEVI S.A.S.**

Sede legale: Via del Centenario 142  
C.A.P. 84084 FISCIANO (SA)  
Tel. Fax 089/9484088 cell. 347/2301400  
Partita IVA - C.F. 04666680659  
e- mail: geosevisas1@gmail.com



Le basi teoriche del rapporto spettrale  $H/V$  sono relativamente semplici in un mezzo del tipo strato di terreno su bedrock (o strato assimilabile al bedrock) in cui i parametri sono costanti in ciascuno strato (modellazione  $1-D$ ).

Consideriamo il sistema di Figura 3 in cui gli strati 1 e 2 si distinguono per le diverse densità ( $\rho_1$  e  $\rho_2$ ) e le diverse velocità delle onde sismiche ( $V_1$  e  $V_2$ ). Un'onda che viaggia nel mezzo 1 viene (parzialmente) riflessa dall'interfaccia che separa i due strati.

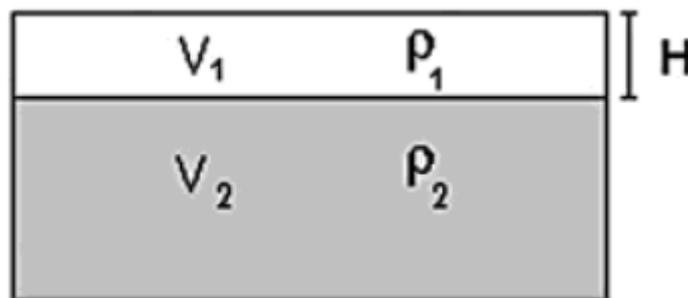


Fig. 3 – Mezzo a 2 strati caratterizzati da densità  $\rho$  e velocità di propagazione  $V$ .

L'onda così riflessa interferisce con quelle incidenti, sommandosi e raggiungendo le ampiezze massime (condizione di risonanza) quando la lunghezza dell'onda incidente è 4 volte (o suoi multipli dispari) lo spessore  $H$  del primo strato [1]. La frequenza fondamentale di risonanza ( $f_r$ ) dello strato 1 relativa alle onde  $S$  (o  $P$ ) è pari a:

$$(f_r) = V_{s1}/4H \quad (f_r) = V_{p1}/4H \quad [1]$$

I microtremori sono solo in parte costituiti da onde di volume  $P$  o  $S$  e in misura molto maggiore da onde superficiali, in particolare da onde di Rayleigh. Tuttavia ci si può ricondurre a risonanza delle onde di volume, poiché le onde di superficie sono prodotte da interferenza costruttiva di queste ultime e poiché la velocità dell'onda di Rayleigh è molto prossima a quella delle onde  $S$ .

Questo effetto è sommabile, anche se non in modo lineare e senza una corrispondenza 1:1. Ciò significa che la curva  $H/V$  relativa ad un sistema a più strati contiene l'informazione relativa alle frequenze di risonanza (e quindi allo spessore) di ciascuno di essi, ma non è interpretabile semplicemente applicando l'equazione [1].



Concessione Ministeriale 5030  
Del 24.5.2011

**GEOSEVI S.A.S.**  
Sede legale: Via del Centenario 142  
C.A.P. 84084 FISCIANO (SA)  
Tel. Fax 089/9484088 cell. 347/2301400  
Partita IVA - C.F. 04666680659  
e-mail: geosevisas1@gmail.com



L'inversione richiede l'analisi delle singole componenti e del rapporto  $H/V$ , che fornisce un'importante normalizzazione del segnale per a) il contenuto in frequenza, b) la risposta strumentale e c) l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto.

La situazione, nel caso di un suolo reale, è spesso più complessa. Innanzitutto il modello di strato piano al di sopra del bedrock si applica molto raramente. Inoltre la velocità aumenta con la profondità, possono esserci eterogeneità laterali importanti ed infine la topografia può non essere piana. L'inversione delle misure di tremore a fini stratigrafici, nei casi reali, sfrutta quindi la tecnica del confronto degli spettri singoli e dei rapporti  $H/V$  misurati con quelli 'sintetici', cioè con quelli calcolati relativamente al campo d'onde completo di un modello 3D. L'interpretazione è tanto più soddisfacente, e il modello tanto più vicino alla realtà, quanto più i dati misurati e quelli sintetici sono vicini.

In questo lavoro i segnali sono stati analizzati non solo attraverso i rapporti spettrali  $H/V$  ma anche attraverso gli spettri delle singole componenti e le curve HVSR sono state invertite secondo la procedura descritta da Arai e Tokimatsu (2004).

### **3 - STRATIGRAFIA SISMICA DA INDAGINI A STAZIONE SINGOLA**

Dai primi studi di Kanai (1957) in poi diversi metodi sono stati proposti per estrarre l'informazione relativa al sottosuolo dal rumore sismico registrato in un sito. Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso è quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR o  $H/V$ ), proposta da Nogoshi e Igarashi (1970) e riproposta più recentemente da Nakamura (1989).

La tecnica è universalmente riconosciuta come efficace nel fornire stime affidabili della frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo.

Inizialmente alcuni ricercatori proposero di utilizzare anche l'ampiezza del picco come indicatore sintetico dell'amplificazione sismica locale, direttamente utilizzabile per la microzonazione. Purtroppo, esiste abbondante letteratura scientifica comprovante il fatto che l'ampiezza del picco  $H/V$ , pur essendo legata all'entità del contrasto di impedenza tra



Concessione Ministeriale 5030  
Del 24.5.2011

**GEOSEVI S.A.S.**  
Sede legale: Via del Centenario 142  
C.A.P. 84084 FISCIANO (SA)  
Tel. Fax 089/9484088 cell. 347/2301400  
Partita IVA – C.F. 04666680659  
e- mail: geosevisas1@gmail.com



strati, non è correlabile all'amplificazione sismica in modo semplice (cfr. Mucciarelli e Gallipoli, 2001; SESAME, 2005 e referenze ivi contenute).

Studi recenti hanno dimostrato che ulteriori picchi a frequenza maggiori di quelle del bedrock sono riconducibili a contrasti di impedenza interni alla copertura sedimentaria (es. Baumbach et al., 2002) e picchi a frequenze minori di quella del bedrock sono invece riconducibili a contrasti di impedenza interni al bedrock stesso (es. Guillier et al., 2005). Riconosciuta questa capacità e dato che, se è disponibile una stima delle velocità delle onde elastiche, le frequenze di risonanza possono essere convertite in stratigrafia, ne risulta che il metodo HVSr può essere, in linea di principio, usato come strumento stratigrafico.

#### 4 - INDAGINE ESEGUITA

Al fine di caratterizzare sismicamente il suolo nell'area oggetto di indagine, è stata eseguita una indagine sismica passiva a stazione singola HVSr (microtremore ambientale) (Fig. 1), con le seguenti caratteristiche (Tab. 1):

<i>Prospezione sismica</i>	<i>Tempo complessivo di acquisizione (min)</i>	<i>Orientamento della terna con il Nord</i>
<i>HVSr n.1</i>	<i>20</i>	<i>SI</i>

Tab. 1 – Riepilogo caratteristiche della fase di acquisizione.

L'indagine è stata condotta mediante l'utilizzo di sismografo M.A.E. A6000-S 24 bit 24 canali, strumento compatto e versatile progettato e realizzato appositamente per eseguire indagini di prospezione sismica convenzionali (rifrazione, riflessione) e non convenzionali [Re.Mi. (Refraction Microtremor); M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves); S.A.S.W. (Spectral Analysis of Surface Waves)].

L'elevata dinamica (24 bit di risoluzione) unita alla notevole memoria per l'acquisizione, ne consente l'utilizzo per tecniche di indagine di tipo non convenzionale. Tali indagini risultano particolarmente adatte in aree fortemente antropizzate (aree urbane e industriali) con notevole presenza di rumore di fondo (noise).



Concessione Ministeriale 5030  
Del 24.5.2011

**GEOSEVI S.A.S.**  
Sede legale: Via del Centenario 142  
C.A.P. 84084 FISCIANO (SA)  
Tel. Fax 089/9484088 cell. 347/2301400  
Partita IVA - C.F. 04666680659  
e- mail: geosevisas1@gmail.com



La gestione dell'apparecchiatura è notevolmente semplificata dall'interfaccia grafica e dall'interazione con essa tramite il sistema di puntamento touch-screen, che consente di eseguire tutte le operazioni toccando con un pennino gli oggetti interessati direttamente sullo schermo.

Il microtremore è stato rilevato da una terna di velocimetri ortogonali tra loro, i quali trasmettono il segnale analogico al sistema di acquisizione/conversione digitale (sismografo MAE A6000S).

La terna di velocimetri ortogonali tra loro (un velocimetro verticale e due orizzontali - Geospace a 4.5Hz) è stata posizionata correttamente (tramite bolla sferica e piedini regolabili) sul piano di calpestio (sabbia e ghiaia marina). La stessa terna è stata orientata con il Nord.

I segnali sismici acquisiti sono stati successivamente elaborati con apposito programma (HVlab della MAE) per la determinazione della frequenza di picco.

## 5 - ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DATI

Le acquisizioni dei segnali, di lunghezza temporale  $T=1200s$ , sono state effettuate con passo di campionamento  $dt=4ms$ . La frequenza di campionamento è data da:  $f_{\text{campionamento}}=1/dt=250Hz$ . La frequenza massima dei segnali, ovvero la frequenza di Nyquist, è data da:  $f_{\text{Nyquist}}=1/2dt=125Hz$ . La frequenza minima dei segnali è data da:  $f_{\text{min}}=1/T=0.00083Hz$ .

Di seguito si riporta il grafico delle registrazioni del microtremore nelle tre componenti ortogonali tra loro (verticale ed orizzontali).



Concessione Ministeriale 5030  
Del 24.5.2011

**GEOSEVI S.A.S.**  
Sede legale: Via del Centenario 142  
C.A.P. 84084 FISCIANO (SA)  
Tel. Fax 089/9484088 cell. 347/2301400  
Partita IVA - C.F. 04666680659  
e- mail: geosevisas1@gmail.com

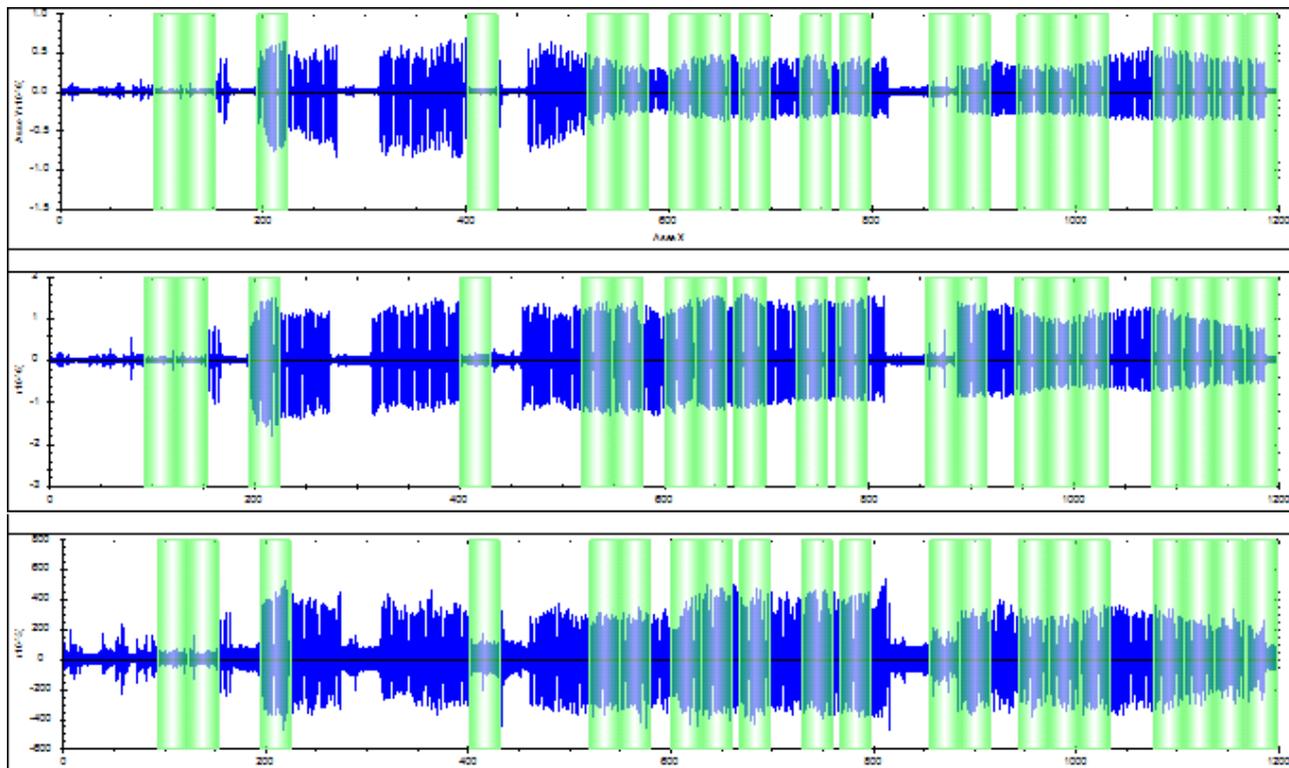


Fig. 4 – Segnali sismici del microtremore acquisito nelle tre componenti ortogonali tra loro (verticale ed orizzontali). In verde sono riportate le finestre temporali utilizzate.

L'elaborazione è stata effettuata con le seguenti caratteristiche (Tab. 2):

---

<b>frequenza di campionamento:</b>	250 Hz
<b>finestre temporali (nw):</b>	20
<b>tempo di ogni finestra (Lw):</b>	30 s
<b>intervallo di ricerca:</b>	0.3-30.0 Hz
<b>costante di lisciamento:</b>	11

---



Concessione Ministeriale 5030  
Del 24.5.2011

**GEOSEVI S.A.S.**  
Sede legale: Via del Centenario 142  
C.A.P. 84084 FISCIANO (SA)  
Tel. Fax 089/9484088 cell. 347/2301400  
Partita IVA – C.F. 04666680659  
e- mail: geosevisas1@gmail.com



## 6 - RISULTATI

L'indagine sismica HVSr ha permesso di individuare una frequenza di picco ( $f_0$ ) pari a **4.78 ± 0.43 Hz**.

Si consiglia pertanto di tenere in considerazione che i manufatti con frequenze proprie di oscillazione coincidenti con le frequenze di oscillazione dei terreni di interesse progettuale sono soggetti a fenomeni di risonanza e, quindi, effetti amplificativi delle sollecitazioni strutturali.

L'indagine effettuata soddisfa tre criteri di affidabilità e tre criteri di evidenza del progetto SESAME.

**classificazione picco: affidabile**

**dettagli affidabilità:**

- 1)  $f_0 > 10/L_w$ : SI (5.86 > 0.33)
- 2)  $n_c(f_0) > 200$ : SI (3516 > 200)
- 3) per  $f_0/2 < f < 2f_0$ ,  $\sigma_A(f) < 2$ : SI (max  $\sigma_A(f) = 1.2$ )

**dettagli evidenza:**

- 1)  $A(f_-) < A_0/2$ : SI ( $f_- = 1.46$  Hz)
- 2)  $A(f_+) < A_0/2$ : SI ( $f_+ = 7.39$  Hz)
- 3)  $A_0 > 2$ : NO ( $A_0 = 1.3$ )
- 4)  $f_{peak}[A(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$  NO ( $D_f = 0.89$ )
- 5)  $\sigma_f < \epsilon(f_0)$  NO ( $\sigma_f = 2.39$ ;  $\epsilon(f_0) = 0.29$ )
- 6)  $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$  SI ( $\sigma_A(f_0) = 0.69$ ;  $\theta(f_0) = 1.58$ )



Concessione Ministeriale 5030  
Del 24.5.2011

**GEOSEVI S.A.S.**  
Sede legale: Via del Centenario 142  
C.A.P. 84084 FISCIANO (SA)  
Tel. Fax 089/9484088 cell. 347/2301400  
Partita IVA - C.F. 04666680659  
e- mail: geosevisas1@gmail.com



Di seguito si riportano le curve H/V Spectral Ratio dell'analisi effettuata (Fig. 5).

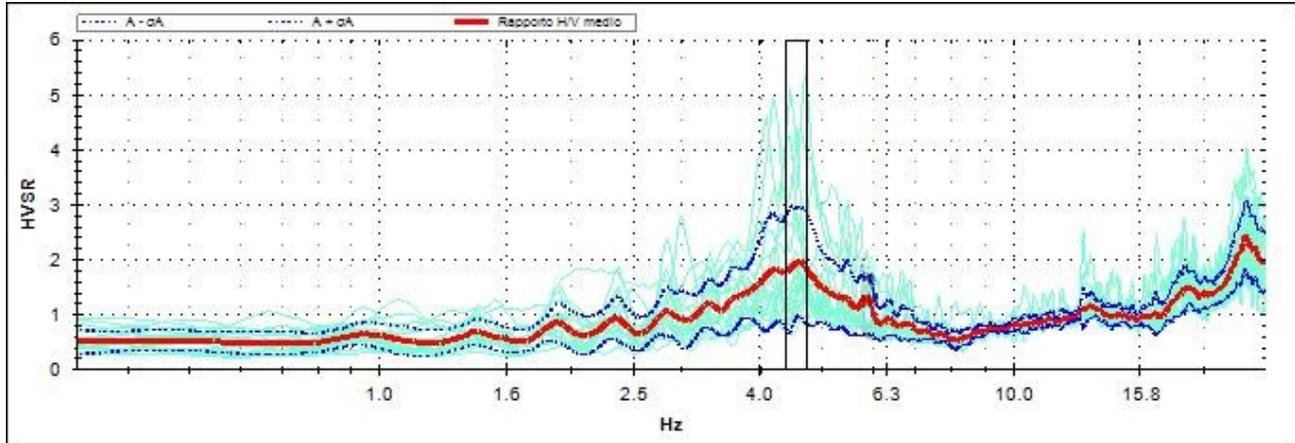


Fig. 5 – Andamento del rapporto H/V per il gruppo di registrazioni effettuate.

Tanto dovevasi per l'incarico ricevuto.

Fisciano, maggio 2015

Geosevi s.a.s.

Il tecnico

Dr. Geol. Francesco Cuccurullo

GEOSEVI s.a.s.  
Il Direttore Responsabile  
Dott. Domenico Sessa