

Esperimento sul rumore sismico alla Grotta di Seiano (Campi Flegrei): tecniche di acquisizione e primi risultati

Norma Damiano¹, Rosalba Maresca², Lucia Nardone², Danilo Galluzzo³

¹ Gruppo Speleologico CAI Napoli – Università degli Studi di Napoli “Federico II”, normadamiano@libero.it

² Università del Sannio

³ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, sezione di Napoli - Osservatorio Vesuviano

Riassunto

La Grotta di Seiano fa parte di un percorso archeologico di notevole interesse e consiste in una galleria artificiale che, traforando la collina di Posillipo, congiunge Coroglio con il vallone della Gaiola. In merito alle sue origini si ritiene che essa sia stata, in un primo momento, una cava per il reperimento di materiale da costruzione e, successivamente, abbia avuto funzione carrabile di accesso alla villa Pausilypon. La cavità si sviluppa per circa 770 metri in direzione NW-SE, con una larghezza variabile dai 2,5 ai 7 metri ed un'altezza compresa tra 4 e 8 metri; tre cunicoli secondari si aprono sul lato sud-orientale della galleria fornendo luce ed areazione. All'interno della cavità, il giorno 13 dicembre del 2007 si è svolta una campagna di acquisizione di dati sismici, mediante registrazione di rumore sismico, con lo scopo di determinare la successione sismotigrafica superficiale e valutare gli effetti di sito locali. Il rumore sismico è stato registrato utilizzando due array lineari installati lungo l'intero percorso della galleria, realizzati secondo due configurazioni geometriche dei sensori (A e B), ognuna formata da 5 stazioni sismiche a tre componenti e a corto periodo. La configurazione A è lunga 450 metri, mentre quella B è lunga 150 metri. Un'ulteriore stazione sismica è stata installata all'interno del Parco Virgiliano, in corrispondenza della cavità stessa, con lo scopo di valutare l'amplificazione del banco di tufo sovrastante l'ipogeo. Le stazioni sismiche hanno acquisito all'incirca un'ora di segnale sismico.

Sui dati registrati sono state effettuate le analisi spettrali ed è stata calcolata la funzione di trasferimento sperimentale per ogni stazione, usando il metodo di Nakamura (NAKAMURA, 1989).

In questo lavoro sono presentati i risultati preliminari delle frequenze di risonanza ed i valori di amplificazione ottenuti nella galleria artificiale della Grotta di Seiano, mediante l'applicazione della tecnica di Nakamura.

PAROLE CHIAVE: rumore sismico, array, Grotta di Seiano.

Abstract

SEISMIC NOISE EXPERIMENT AT THE SEIANO CAVE (CAMPI FLEGREI): ACQUISITION TECHNIQUES AND FIRST RESULTS

The Seiano Cave is part of a very interesting archaeological route; it consists of an artificial gallery that tunnels Posillipo hill and links Coroglio with the Gaiola valley. It seems that, originally, it was a quarry of building material and that, afterwards, it was used to reach the villa at Pausilypon. The cavity develops for about 770 metres in direction NW-SE, with a width varying from 2,5 to 7 metres and a height between 4 and 8 metres; three secondary tunnels open on the SE side of the gallery, supplying light and air. On december 13th 2007 a seismic survey was carried out in the cave with the purpose of inferring the shallow structure and evaluating local site effects. Seismic noise was recorded by two linear seismic arrays deployed along all the route. Two geometries (A and B) were designed, consisting of 5 short period three-component sensors. The geometry A was 450 meters long, the B one was 150 meters long. An other seismic station was installed in the Parco Virgiliano, very close to the underlying cave, with the purpose of evaluating the amplification of the tuff in the top of the cave. About 1-hour of seismic noise was recorded for each linear configuration. The spectral analysis has been carried out on the dataset and the experimental transfer function at each sampled point has been estimated using Nakamura's method (NAKAMURA, 1989).

In this paper we show the first results on the resonance frequencies and amplification values in the artificial gallery obtained from the application of Nakamura's method.

KEY WORDS: seismic noise, array, Seiano Cave.

INTRODUZIONE

L'analisi delle onde superficiali attraverso misure di rumore sismico costituisce un approccio alternativo ed economico per lo studio della successione sismostratigrafica superficiale e per la valutazione degli effetti di sito. Le onde superficiali si generano nella parte più superficiale della crosta terrestre a causa della discontinuità esistente tra la crosta terrestre e l'atmosfera; sono formate da due tipi fondamentali, le onde di Rayleigh e di Love.

Con il termine di rumore sismico si indicano le vibrazioni ambientali del suolo causate da sorgenti sia naturali che antropiche, come per esempio le maree, le onde che si infrangono lungo la costa, il vento ed il suo effetto su alberi o edifici, le vibrazioni provocate dai macchinari industriali, dal passaggio di automobili e treni, dai passi degli uomini, ecc. All'interno del rumore sismico possiamo distinguere tra microsisma e microtremore: il primo a bassa frequenza (<1 Hz) è prodotto da sorgenti naturali, il secondo a frequenza superiore a 1 Hz è prodotto da sorgenti antropiche.

Alcune metodologie applicate per l'acquisizione del rumore sismico sono rappresentate dalle tecniche multicanale (SPAC, AKI, 1957; MSPAC, BETTIG et al., 2001; FK, LA COSS et al., 1969 e KVAERNA & RINGDAHL, 1986) proposte per la determinazione della velocità di fase ed il modello di velocità definito può essere usato per il calcolo della risposta sismica locale. Altra metodologia, comunemente applicata, è rappresentata dalla tecnica dei rapporti spettrali della componente orizzontale rispetto a quella verticale (H/V) proposta da Nakamura (1989) per determinare la funzione di trasferimento del sito. In generale, la valutazione della risposta sismica di sito riveste grande importanza, soprattutto in aree densamente urbanizzate, dove la stima del fattore di amplificazione è necessaria per una corretta valutazione del rischio sismico.

I vantaggi nell'analizzare il rumore sismico per la stima dell'effetto di sito risiedono nella possibilità di eseguire misure in qualsiasi momento e luogo senza dover ricorrere a sorgenti attive o attendere il verificarsi di un evento sismico naturale, nonché nel permettere la realizzazione di esperimenti a basso costo con un impatto ambientale praticamente inesistente e nel consentire misure speditive.

Un modo per approfondire le conoscenze sul campo d'onda sismico è rappresentato dalle misure effettuate in pozzi, in quanto consentono di migliorare la qualità del segnale attraverso differenti fattori: la riduzione del rumore sismico (dati sperimentali dimostrano che già con i primi 30 metri si ha una rapida attenuazione del rumore, e a 100 metri di profondità si raggiungono le condizioni ideali per l'installazione dei sensori sismici); la stabilità della temperatura che si crea a maggiori profondità e la ridotta variabilità della pressione come conseguenza del rivestimento rigido del pozzo. Nel caso particolare di misure di rumore sismico, le misure in profondità contribuiscono a ridurre la presenza di transienti nel segnale, eventualmente provocati dalle attività antropiche.

Poiché l'esecuzione di un pozzo e l'acquisto di sismo-

metri idonei richiede l'utilizzo di grosse risorse, l'acquisizione di dati sismici in grotta può risolvere questo problema.

Le misure di rumore sismico eseguite nella Grotta di Seiano hanno potuto beneficiare delle condizioni descritte: infatti la cavità si trova ad una profondità di circa 100 metri dal piano campagna. Inoltre, molte tecniche comunemente usate per la stima degli effetti di sito sono basate sulla valutazione dei rapporti spettrali e, dunque, richiedono la registrazione di dati in due luoghi: la prima registrazione è idealmente effettuata alla base dei sedimenti e la seconda in corrispondenza della superficie libera del sito stesso. Le misure in pozzo approssimano le registrazioni alla base dei sedimenti così come le misure effettuate in galleria.

LA GROTTA DI SEIANO

La storia nell'area costiera di Napoli e dei Campi Flegrei è sempre stata ricca di avvenimenti testimoniati dal ritrovamento di numerosi reperti archeologici. In particolare, dall'età repubblicana e per tutto il periodo dell'Impero romano l'area è stata interessata dall'insediamento di numerose ville appartenenti, per lo più, a grandi esponenti dell'aristocrazia, della politica e della finanza del tempo. Le testimonianze più significative sono rappresentate dalle ville, poi trasformate in dimore imperiali, costruite sul promontorio di Pausilypon tra la baia di Trentaremi, le isole della Gaiola, la cala di San Francesco e dei Lampi, fino a Marechiaro.

La Grotta di Seiano (fig. 1) rappresenta l'accesso al complesso del Pausilypon così denominata erroneamente dall'umanista G. Pontano che attribuì l'opera a Tiberio Seiano. È una galleria artificiale che, traforando la collina di Posillipo, congiunge Coroglio con il vallone della Gaiola. La sua progettazione è attribuita all'architetto Cocceio e testimonia le grandi capacità costruttive e progettuali nonché le tecniche avanzate di rilevamento e misurazione raggiunte dall'ingegneria romana. Il ritrovamento della galleria, di cui dopo il XVI secolo si era perso il ricordo, avvenne nel maggio del 1840 nel corso del tracciamento di una strada che poi non fu più realizzata. Il re Ferdinando II di Borbone diede subito ordine all'ingegnere Ambrogio Mendia di riattivare l'antico passaggio e i lavori, lunghi, difficili e pericolosi a causa delle frane e delle esalazioni di gas mefitici, furono portati a termine nel 1841 (VIGGIANI, 2006). Con la Seconda Guerra Mondiale, l'area archeologica fu sequestrata dai comandi militari e adibita a rifugio per gli abitanti della zona industriale di Bagnoli, soggetta per lunghi giorni ai pesanti bombardamenti delle truppe alleate. Dopo tale utilizzo e la caduta negli anni Cinquanta di alcune frane, che ne ostruirono in parte gli ingressi, per il monumento ci fu di nuovo un lungo periodo, quasi un trentennio, di abbandono e di oblio, terminato con i lavori eseguiti in occasione del vertice del G7 nel 1994 che hanno permesso di rendere visitabili questi splendidi luoghi.

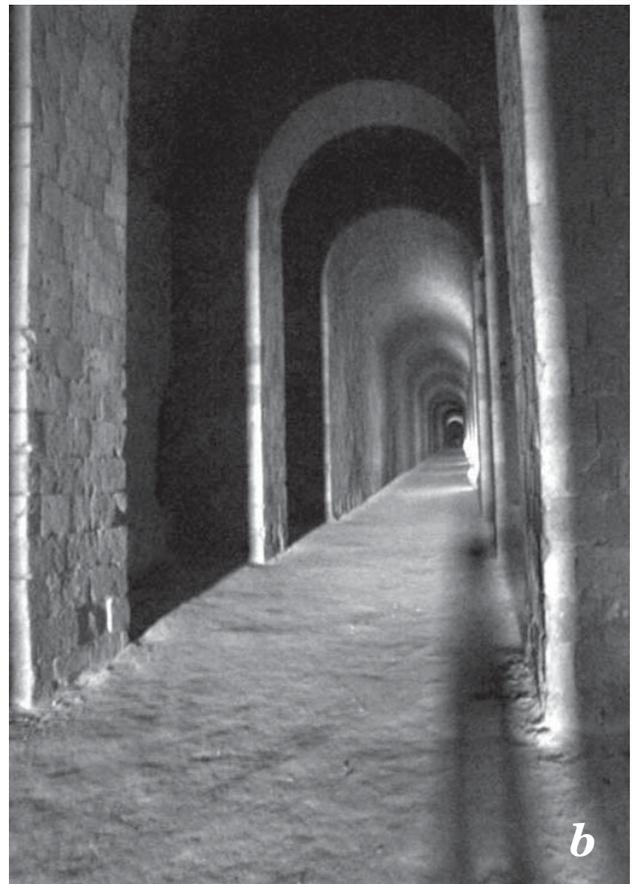
L'intero traforo inizia da Via Coroglio e termina al sito



Fig. 1 - Ingresso della Grotta di Seiano (a) e panoramica interna (b) (foto N. Damiano).

Fig. 1 - Seiano Cave opening (a) and indoor view (b) (photo N. Damiano).

archeologico della *villa d'otium*; è lungo 773 m con una larghezza compresa tra i 2,5 e i 7 m, per consentire il doppio senso di marcia, ed un'altezza che varia tra 4 e 8 m, per ottenere una migliore circolazione d'aria e d'illuminazione (fig. 2). La galleria si presenta tangente, con direzione NW-SE, ad un antico cratere sommerso di tufo; l'imbocco orientale è posto ad una quota superiore rispetto a quello occidentale, con una differenza di quota di circa 1,5 m, al fine di consentire un facile deflusso delle acque meteoriche. A causa della natura geologica della collina in cui si sviluppa la galleria, la progettazione romana per l'areazione e l'illuminazione ha previsto la costruzione di soli tre cunicoli laterali, tutti concentrati nella parte orientale dell'opera, anziché di pozzi verticali (BUSANA & BASSO, 1997). I cunicoli si trovano a circa 316, 190 e 73 m dall'ingresso sud-orientale della grotta, di cui il primo affaccia su Punta del Cavallo ed è lungo circa 175 m, gli altri due affacciano su cala Trentaremi e sono lunghi all'incirca 25 e 42 m, rispettivamente. La galleria presenta un tracciato rettilineo di semplice e rapida realizzazione; nella parte ricavata nei tufi stratificati si è resa necessaria la costruzione di 68 pilastri in muratura di tufo a sostegno della volta, utilizzando le tecniche dell'*opus reticulatum* e dell'*opus incertum*.



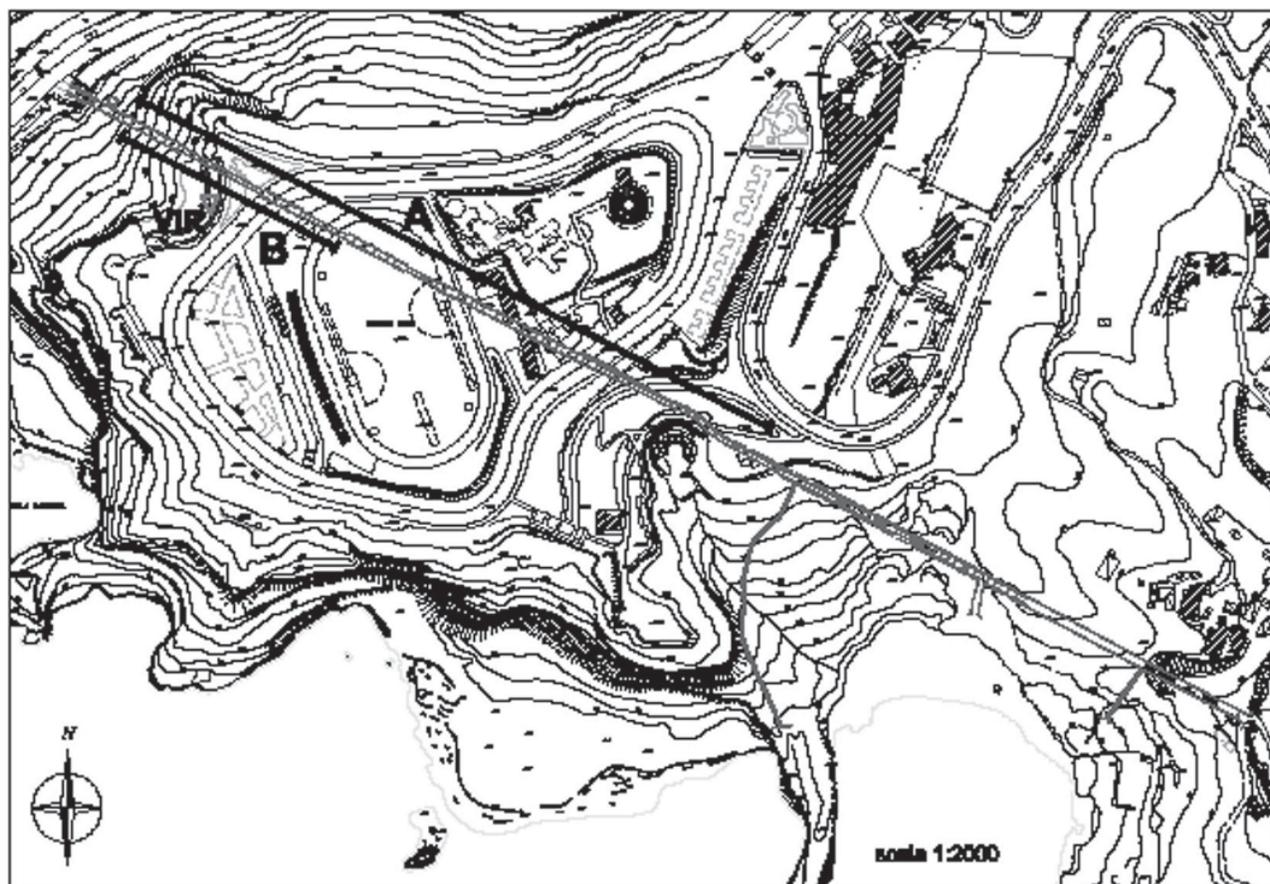


Fig. 2 - Rilievo della Grotta di Seiano e visualizzazione delle configurazioni degli array A e B.

Fig. 2 - Seiano Cave map and showing array A and B configuration.

GEOLOGIA DELLA COLLINA DI POSILLIPO

Il promontorio di Posillipo separa il golfo di Napoli da quello di Pozzuoli e rappresenta ciò che rimane della porzione meridionale di uno dei crateri appartenenti al complesso vulcanico dei Campi Flegrei. In questa zona affiorano successioni comprese tra l'ignimbrite Campana, datata 39000 anni fa ed il Tufo Giallo Napoletano (TGN), datato 15000 anni fa (ORSI et al., 2004). Sequenze più antiche del TGN affiorano solo ai piedi della scarpata che delimita la collina verso NW e SE e lungo la Grotta di Seiano. Una sequenza di due unità composte da depositi piroclastici di surge con minori strati di depositi da caduta è esposta in modo discontinuo lungo la scarpata NW di Villanova; a Coroglio e Trentaremi e nella Grotta di Seiano affiora quello che resta di un cono di tufo (TMa in fig. 3). Questo cono è ricoperto da una sequenza di due unità di depositi da surge e da un deposito rimaneggiato, tutti separati da paleosuoli (TMb e TMc in fig. 3); al di sopra si ha uno spessore di circa 100 metri di TGN (ORSI et al., 1996).

STRUMENTAZIONI E DATI

Le registrazioni del rumore sismico effettuate per il presente lavoro sono state eseguite utilizzando la tecnica di *array*, che consiste nell'impiego di più stazioni

sismiche in posizione diversa con cui effettuare misure contemporanee e sincronizzate. La strumentazione utilizzata per eseguire l'esperimento è composta da 6 stazioni sismiche Lennartz MarsLite e 6 sensori Mark LE3Dlite a 3 componenti e risposta strumentale elettronicamente estesa a 1 Hz (fig. 4). L'intera strumentazione è alimentata da batterie di 12 V.

I dati sono stati acquisiti con un passo di campionamento di 125 sps ed un fattore di scala di 8 μ Volt/count e sono immagazzinati nel formato binario su una PC-Card DPPCM2 di 1 GB e su dischi magneto-ottici di 500 MB; in seguito i dati sono stati trasferiti su un supporto rigido e convertiti nel formato SAC (<http://www.lnl.gov/sac/>).

I sensori installati nella Grotta di Seiano (SEI) non sono stati sotterrati a causa della presenza di substrato litoide, mentre per la stazione installata nel Parco Virgiliano (VIR) il sismometro è stato sotterrato in una buca di circa 20 cm di profondità. Le componenti orizzontali dei sensori sono orientate nella direzione N-S e E-W. Le coordinate degli array sono state definite mediante ubicazione delle stazioni sul rilievo topografico digitale della grotta e successivamente traslate su carta topografica; le coordinate della stazione VIR sono state ottenute tramite posizionamento GPS (Global Position System).

Nella Grotta di Seiano sono stati installati due array lineari (configurazioni A e B) composti da 5 stazioni sismiche (da SEI1 a SEI5) riportate in figura 2. La

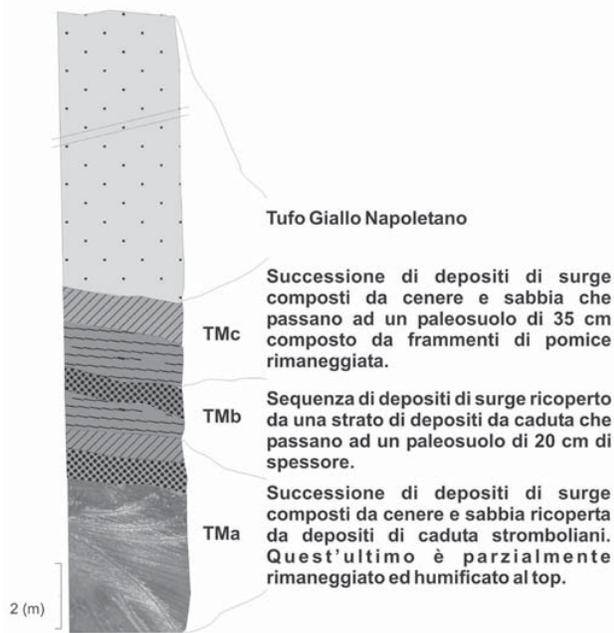


Fig. 3 - Sezione stratigrafica effettuata al sito di Trentaremi, Posillipo.

Fig. 3 - Stratigraphic section measured at Trentaremi site, Posillipo.

spaziatura tra le stazioni non è regolare; la configurazione A ha una lunghezza massima di 450 m, mentre la configurazione B ha una lunghezza massima di 150 m. In tabella 1 sono riportate le distanze delle singole stazioni rispetto alla stazione di riferimento SEI1.

Per ogni configurazione è stato acquisita una finestra di segnale della durata di circa 1 ora e mezza; la stazione SEI2 ha acquisito soltanto le componenti verticale e N-S, a causa di un problema di configurazione delle impostazioni dei parametri.

La stazione situata in superficie è necessaria per valutare l'amplificazione del moto sismico al suolo, confrontando le analisi eseguite in superficie con quelle eseguite in profondità attraverso le tecniche dei rapporti spettrali; in questa situazione le stazioni in grotta rappresentano quelle di riferimento.

Stazione	Distanza (m)
Configurazione A	
SEI1	0
SEI2	70
SEI3	170
SEI4	300
SEI5	450
Configurazione B	
SEI1	0
SEI2	20
SEI3	50
SEI4	90
SEI5	150

Tab. 1 - Configurazione array A e B.
Tab. 1 - Array A and B configuration.

METODOLOGIE

Analisi spettrale

L'analisi spettrale consiste nel calcolare lo spettro e lo spettrogramma del rumore sismico. Lo spettro di un segnale sismico è una funzione che esprime il contributo energetico di un treno d'onda (l'ampiezza spettrale misurata in micron) in funzione della frequenza, mentre lo spettrogramma è la rappresentazione dell'ampiezza spettrale in funzione del tempo e della frequenza. Pertanto, un'analisi spettrale consente di conoscere le proprietà del campo d'onda e di discriminare l'origine del segnale, se naturale (microsisma) o artificiale (microtremore). Inoltre, le caratteristiche spettrali del microtremore mostrano una buona correlazione con le condizioni geologiche del sito: un corto periodo predominante è caratteristico di rocce a comportamento rigido, mentre un lungo periodo dominante è indicativo di depositi incoerenti (BARD, 1999).

Metodo dei rapporti spettrali H/V di Nakamura

La tecnica applicata ai microtremori, basata sulla stima del rapporto spettrale tra la componente orizzontale e quella verticale (H/V) del moto sismico, è stata originariamente proposta da Nogoshi & Igarashi (1971) ed ampiamente diffusa, in seguito, da Nakamura (1989). Obiettivo di questa metodologia è la stima dei valori di amplificazione locale e di frequenza di risonanza di un sito in relazione alla funzione di trasferimento del sito stesso, usando misure di microtremore.

Nakamura ipotizza che i microtremori siano connessi a sorgenti molto locali e che possano essere interpretati come la propagazione dell'onda SH incidente verticalmente in un singolo strato poggiante su un semispazio. Il rapporto H/V rappresenta una stima affidabile per la funzione di trasferimento delle onde S.

In accordo con questa assunzione, l'amplificazione di sito può essere calcolata come:

$$S_j(f) = \frac{H_j(f)}{V_j(f)}$$

S_j = amplificazione al sito j-esimo;

H_j = componente orizzontale dell'ampiezza spettrale al sito j-esimo;

V_j = componente verticale dell'ampiezza spettrale al sito j-esimo.

ANALISI DATI

Ai dati sono state applicate le analisi spettrali e dei rapporti spettrali H/V di Nakamura. La fig. 5 mostra gli spettrogrammi e gli spettri delle 3 componenti delle stazioni SEI5 e SEI1, rispettivamente delle configurazioni A e B. La stazione SEI5 della configurazione A è situata a circa 450 m dall'ingresso di Via Coroglio, mentre la stazione SEI1 della configurazione B è situata all'ingresso dal lato di Via Coroglio; entrambe evidenziano un picco pronunciato a bassa frequenza

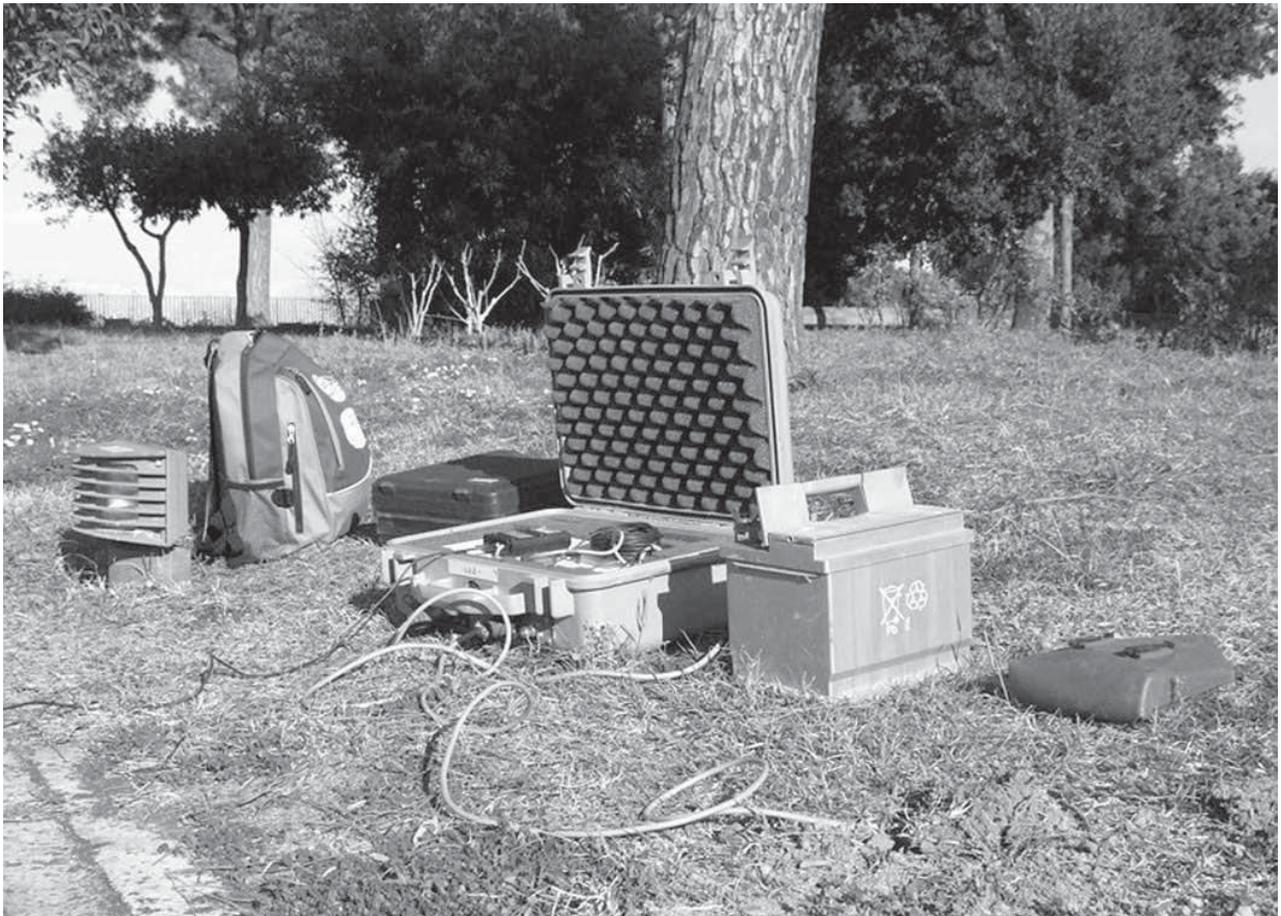


Fig. 4 - Strumentazione sismica.
Fig. 4 - Seismic instrument.

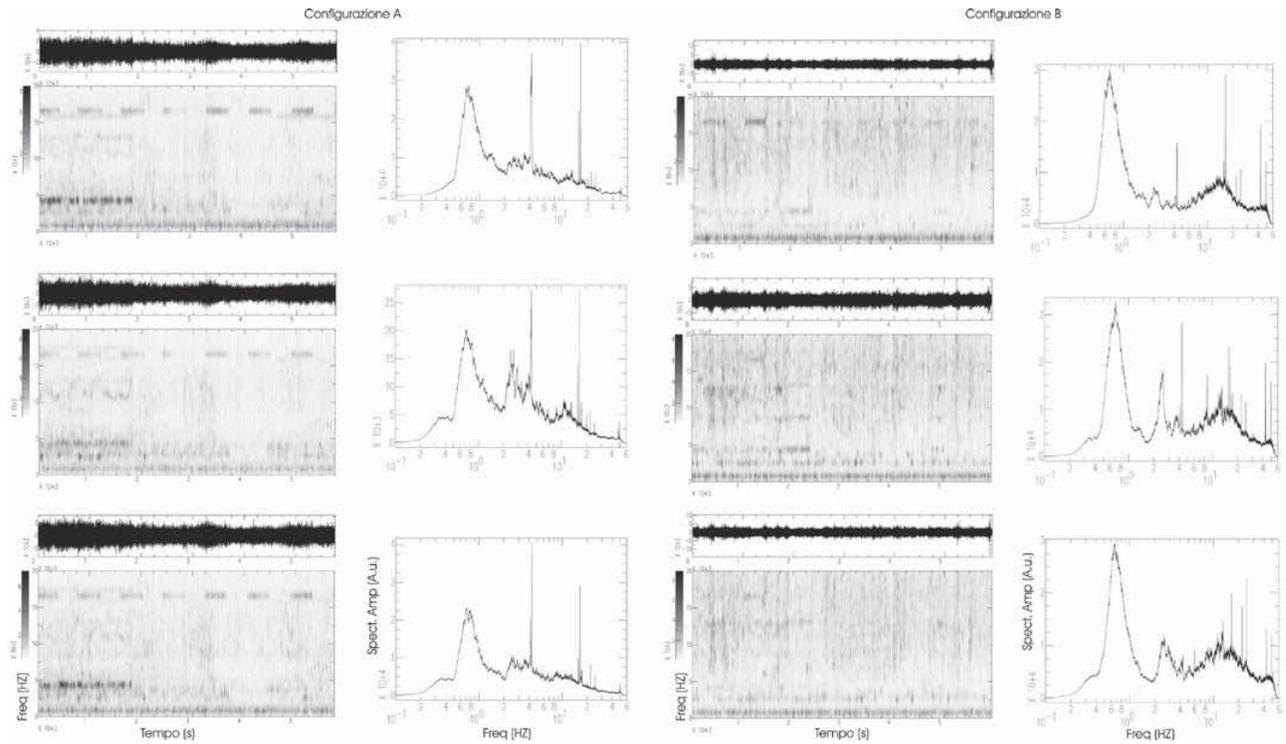


Fig. 5 - Analisi spettrale del rumore sismico registrato alla stazione SEI5, configurazione A ed alla stazione SEI1, configurazione B. Dall'alto verso il basso sono riportate le componenti verticali, N-S e E-W del segnale.
Fig. 5 - Spectral analysis of the seismic noise recorded by station SEI5, configuration A and by station SEI1, configuration B. From the top to the bottom: vertical, N-S and E-W component.

corrispondente a circa 0,7 Hz; un contributo energetico significativo di minore ampiezza è riscontrabile ad alte frequenze (> 15 Hz). Questi risultati si riscontrano a tutte le stazioni installate per entrambe le configurazioni; è possibile individuare anche un picco secon-

dario a circa 4,5 Hz presente solo per i primi 10 minuti di registrazione, ad esclusione della stazione SEI1. La stazione VIR (fig. 6), posta al Parco Virgiliano, evidenzia caratteristiche spettrali simili, con un marcato aumento delle ampiezze ad alte frequenze.

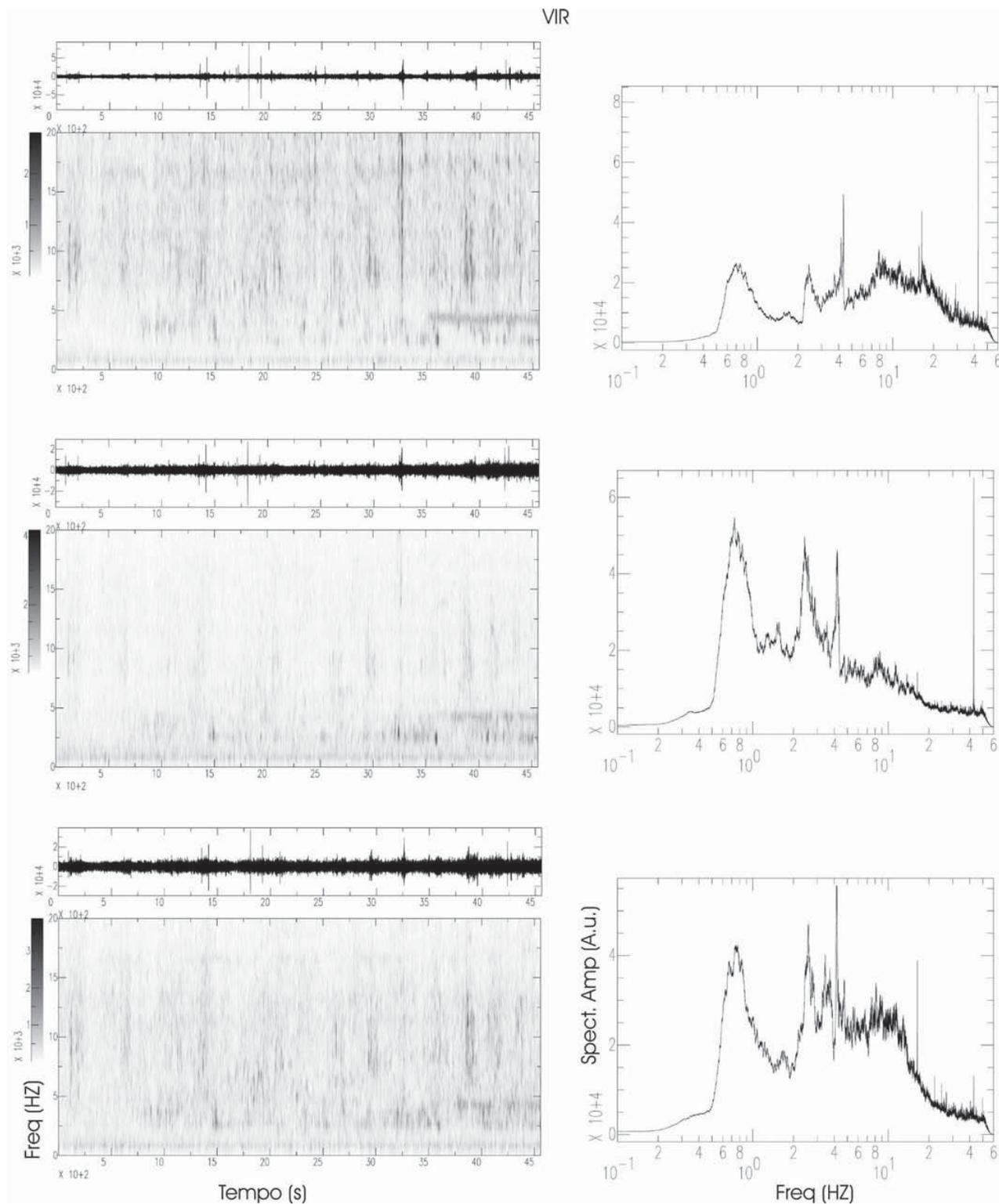


Fig. 6 - Analisi spettrale del rumore sismico registrato alla stazione VIR. Dall'alto verso il basso sono riportate le componenti verticali, N-S e E-W del segnale.
 Fig. 6 - Spectral analysis of the seismic noise recorded by station VIR. From the top to the bottom: vertical, N-S and E-W component.

I risultati ottenuti dall'analisi dei rapporti spettrali H/V di Nakamura, applicata ai dati di tutte le stazioni, sono mostrati nelle figure da 7 a 9. La fig. 7a rappresenta le curve spettrali H/V mediate su tutte le finestre di analisi delle stazioni dell'array A ad eccezione della stazione SEI2 in cui non è stato possibile applicare la tecnica per la mancata registrazione della componente E-W. Solo la stazione SEI1 ha un picco di amplificazione di poco superiore a 2, come evidenziato nel diagramma di figura 7b in cui il picco massimo corrisponde proprio alla posizione della stazione SEI1. Il valore di amplificazione diminuisce verso l'interno della grotta. Nella figura 7c si nota che il picco di am-

plificazione avviene alla stessa frequenza per tutte le stazioni, valore che varia tra 2,3 e 2,5 Hz. Il valore 2 di amplificazione è inteso come un valore limite al di sotto del quale il materiale attraversato dal segnale sismico non genera amplificazione (SESAME European Research Project, WP12 – Deliverable D23.12). La stessa immagine è stata eseguita per l'array B (fig. 8), i risultati sono simili, un picco relativo di amplificazione (2,3) è presente solo alla stazione SEI1 alla frequenza di circa 2,5 Hz; per le restanti stazioni il valore 2 non è mai raggiunto. La stazione VIR posta in superficie (fig. 9) presenta un valore massimo di amplificazione di circa 2,5 alla frequenza di 2 Hz.

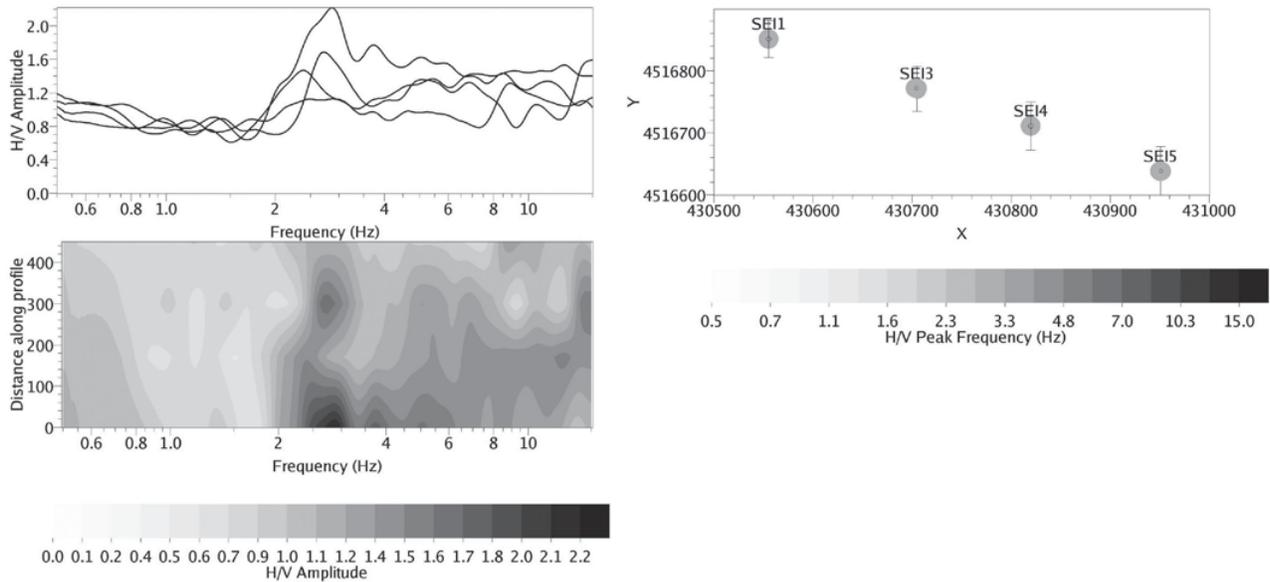


Fig. 7 - Analisi dei rapporti spettrali H/V del rumore sismico registrato all'array A.
 Fig. 7 - The horizontal to vertical (H/V) spectral ratio analysis of the seismic noise recorded by array A.

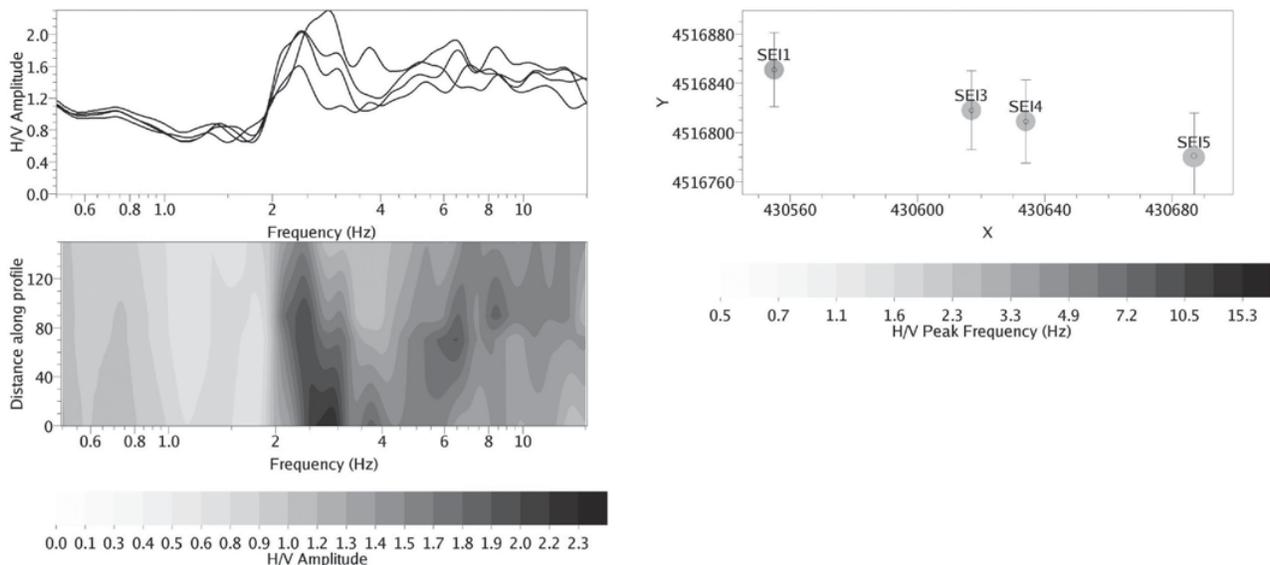


Fig. 8 - Analisi dei rapporti spettrali H/V del rumore sismico registrato all'array B.
 Fig. 8 - The horizontal to vertical (H/V) spectral ratio analysis of the seismic noise recorded by array B.

CONCLUSIONI

I risultati preliminari delle analisi spettrali delle registrazioni del rumore sismico acquisite durante l'esperimento effettuato alla Grotta di Seiano il 13 dicembre 2007, mostrano la presenza di segnali con un consi-

stente contenuto energetico ad alte frequenze, dovuto ad attività antropiche, e di un picco più pronunciato a bassa frequenza, probabilmente legato all'azione del mare. Anche la stazione posta nel Parco Virgiliano mostra gli stessi risultati con un contenuto energetico alle alte frequenze più marcato.

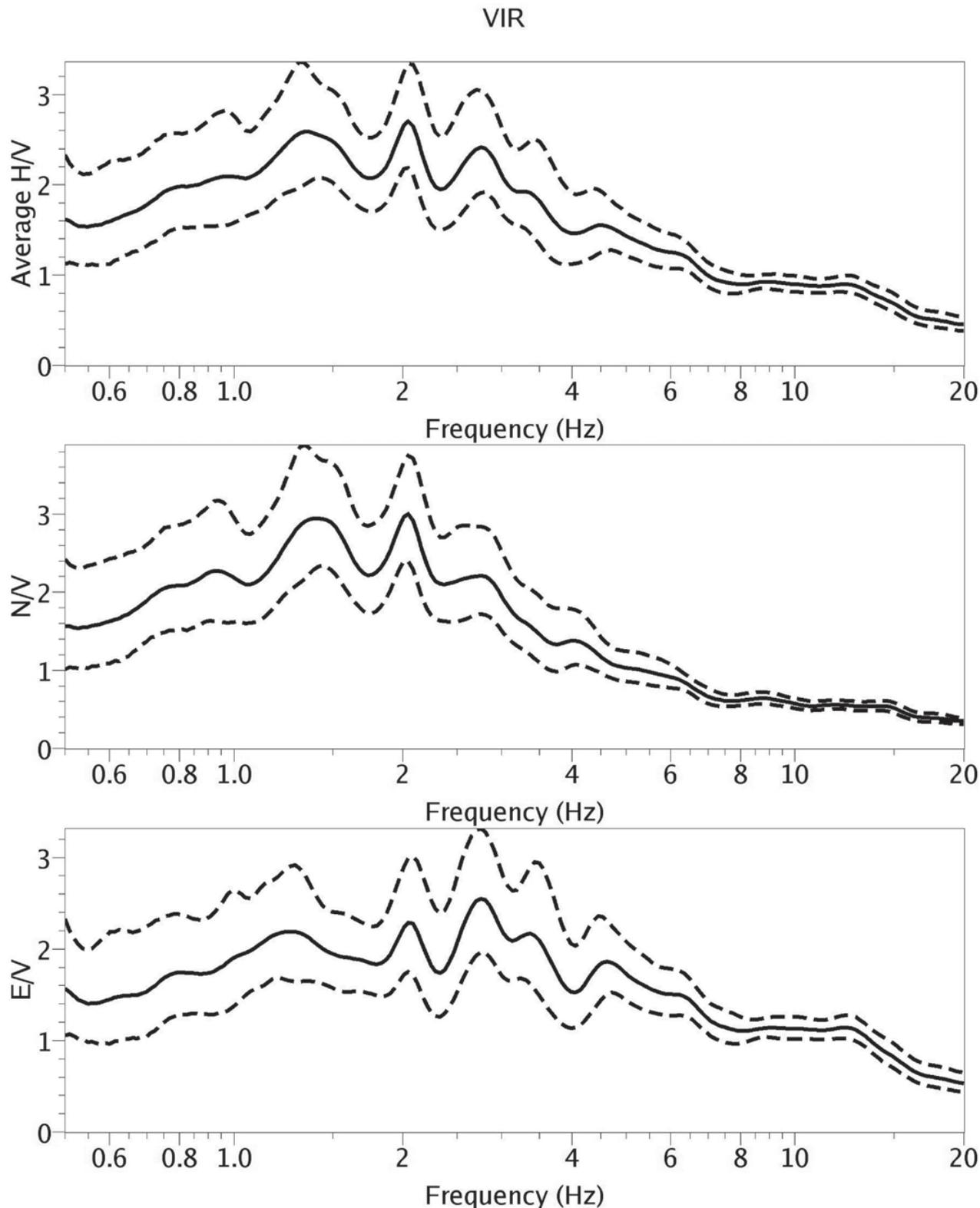


Fig. 9 - Analisi dei rapporti spettrali H/V del rumore sismico registrato alla stazione VIR.
 Fig. 9 - The horizontal to vertical (H/V) spectral ratio analysis of the seismic noise recorded by station VIR.

L'analisi dei rapporti spettrali H/V di Nakamura non evidenzia un reale picco di ampiezza alle stazioni installate nella Grotta di Seiano, mentre la stazione VIR installata al Parco Virgiliano mostra un'ampiezza di picco che supera di poco il limite di significatività di amplificazione assunto uguale a 2.

La mancanza di un picco di amplificazione alle stazioni da SEI1 a SEI5 (configurazioni A e B) può indicare la presenza di un bedrock, cioè di materiale compatto, mentre la limitata amplificazione alla stazione VIR può indicare la presenza di un basso contrasto di impedenza tra bedrock e strato superficiale, ma anche la vicinanza di strutture verticali come la scarpata del promontorio di Posillipo può influenzare il valore ottenuto.

Queste analisi preliminari saranno approfondite integrando i risultati con dati stratigrafici provenienti da sondaggi stratigrafici effettuati in loco, inoltre verranno applicate le tecniche multicanale FK proposta da LACOSS et al. (1969) e Kvaerna and Ringdahl (1986) ed il metodo SPAC modificato da CHAVEZ-GARCIA et al., (2005) per conoscere il modello di velocità, che confrontato con i dati geologici, potrà essere utilizzato per una modellazione della risposta sismica in superficie. Il confronto della risposta di sito ottenuta in superficie con quella ottenuta in profondità potrà fornire interessanti informazioni sulla propagazione delle onde sismiche e quindi evidenziare l'influenza degli strati più superficiali sul moto sismico, strati che generano le maggiori amplificazioni del sito.

Ringraziamenti

Ringraziamo Simona Petrosino e Paola Cusano per gli utili commenti e discussioni che hanno permesso di migliorare la versione del manoscritto. Inoltre, ringraziamo la Soprintendenza per i Beni Archeologici di Napoli e Caserta per aver consentito lo svolgimento dell'esperimento all'interno della Grotta di Seiano.

Bibliografia

- AKI K., 1957, *Space and time of stationary stochastic wave, with special reference to microtremors*, Bull. Earthq. Res. Ins., V. XXXV, pp. 415-457.
- BARD P.Y., 1999, *Microtremor measurements: a tool for site effect estimation?*, in: Irikura, Kudo, Okada and Satasani eds., *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Balkema, Rotterdam, pp. 1251-1279.
- BETTIG B., BARD P.Y., SCHERBAUM F., RIEPL J., COTTON F., CORNOU C., HATZFELD D., 2001, *Analysis of dense array noise measurements using the modified spatial auto-correlation method (SPAC). Application to the Grenoble area*, Boll. di Geofisica Teorica ed Applicata, 42, pp. 281-304.
- BUSANA M.S., BASSO P., 1997, *Via per montes excisas - Le strade in galleria nell'Italia romana*, Ed. L'Erma di Bretschneider, pp. 175-176.
- CHAVEZ-GARCIA F.J., RODRIGUEZ M., STEPHENSON W.R., 2005, *An alternative approach to the SPAC analysis of microtremors: exploiting stationarity of noise*, Bull. Seism. Soc. Am., 95, 277-293.
- KVAERNA T. RINGDAHL F., 1986, *Stability of various fk-estimation techniques*, Semiannual Technical Summary, 1 October 1985 - 31 March 1986. In NORSAR Scientific Report, 1-86/87, Kjeller, Norway, pages 29-40.
- LACOSS R.T., KELLY E.J., TOKSOZ M.N., 1969, *Estimation of seismic noise structure using arrays*, Geophysics, 34, 21-38.
- LERMO J., CHAVEZ-GARCIA F.J., 1994, *Are microtremors useful in site response evaluation?*, Bull. Seism. Soc. Am., 84, pp. 1350-1364.
- NAKAMURA Y., 1989, *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI), 30, No. 1.
- NOGOSHI M., IGARASHI T., 1971, *On the Amplitude Characteristics of Microtremor (Part 2)*, Jour. Seism. Soc. Japan, 24, pp. 26-40, in Japanese with English abstract.
- ORSI G., DE VITA S., DI VITO M., 1996, *The restless, resurgent Campi Flegrei nested caldera (Italy): constraints on its evolution and configuration*, J. Volcanol. Geotherm. Res., 74, pp. 179-214.
- ORSI G., DI VITO M. A., ISAIA R., 2004, *Volcanic hazard assessment at the restless Campi Flegrei caldera*, Bull. Volcanol., 66, pp. 514-530.
- SESAME European research project, WP12-Deliverable D23.12, 2004, *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation*, Project n° EVG1-CT-2000-00026 SESAME.
- VIGLIANI C., 2006, *Opere e protagonisti tra antico e moderno: un ingegnere Romano di epoca tardorepubblicana: Lucio Cocceio Aucto*, Atti del I Convegno Nazionale di Storia dell'Ingegneria, Napoli 8-9 marzo 2006, vol. 2, pp. 807-818.