



**Determinazione del profilo  $V_s$  dall'analisi congiunta delle velocità di gruppo delle componenti Z e R (*HoliSurface*®) e HVSR: Lido del Sole, Bibione (VE)**



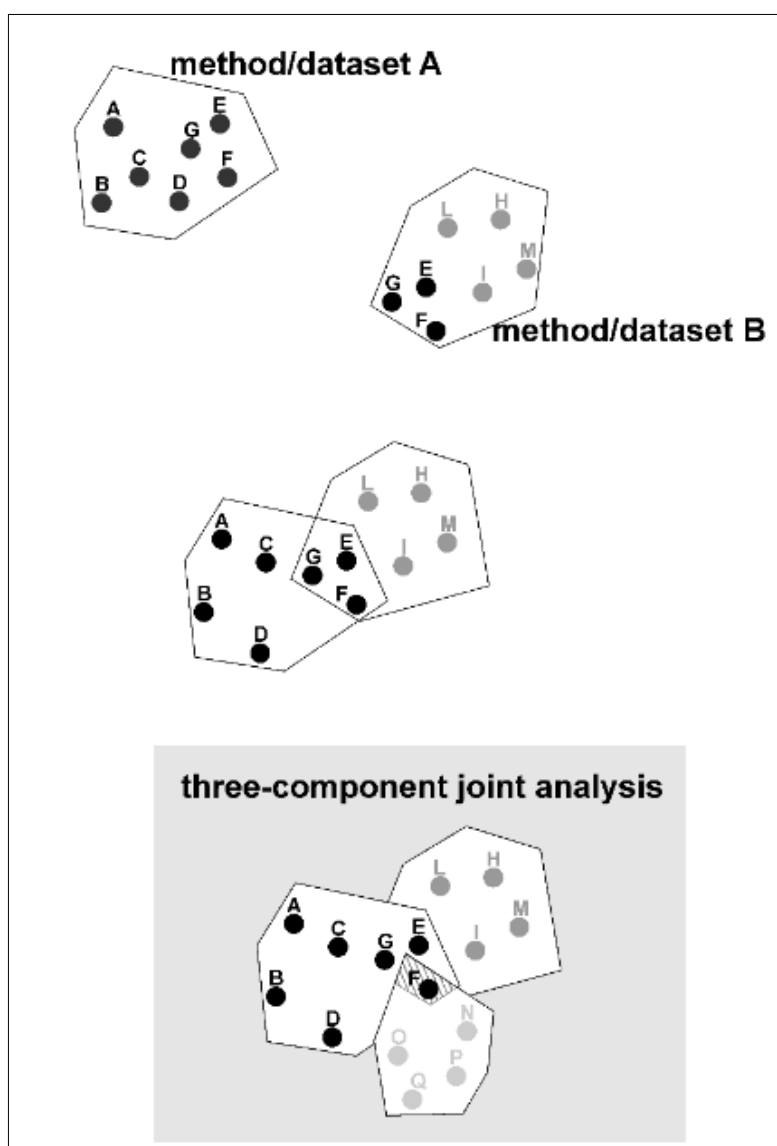
## INDICE

Indice.....	2
1. Breve introduzione.....	3
2. L'area di studio.....	4
3. Metodologie HS e HVSR in estrema sintesi.....	5
3.1 <i>HoliSurface</i> <sup>®</sup> .....	5
3.2 HVSR.....	7
4. Analisi.....	8
4.1 HVSR.....	8
4.2 Inversione congiunta Z+R+HVSR.....	11
5. Commenti.....	12
6. Riferimenti bibliografici.....	13

## 1. BREVE INTRODUZIONE

In riferimento alla relazione geologica allegata al progetto che prevede il rifacimento del tratto di pista ciclo-pedonale “Lido del Sole” lungo la spiaggia di Bibione e, precisamente, il tratto tra Piazzale Adriatico e Via Bosco Canoro nel Comune di San Michele al Tagliamento (VE), si è proceduto all’effettuazione di un’indagine sismica *HoliSurface*<sup>®</sup> (*Holistic analysis of Surface waves - HS*) + *HVSR* (*Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio*) utile a definire il profilo verticale delle  $V_s$  (velocità di propagazione delle onde di taglio) e la determinazione della  $V_{s30}$  e velocità equivalente per individuare il tipo di sottosuolo così come indicato nelle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018.

La tecnica HS si fonda sulla determinazione di diversi *observables* (spettri di velocità di gruppo delle componenti verticale (Z), radiale (R) e trasversale (T), *Radial-to-Vertical Spectral Ratio* – *RVSR* e curva *Rayleigh-wave Particle Motion*, RPM) che, anche congiuntamente alla curva HVSR, consentono di impostare un’inversione congiunta utile a determinare in modo robusto e puntuale il profilo  $V_s$  (vedi schema concettuale riportato in **Figura 1.1** e tratto da Dal Moro, 2019).



**Figura 1.1** Schema concettuale per descrivere il significato dell’analisi congiunta possibile da dati multi-componente. Solamente l’utilizzo di diversi “oggetti di analisi” (*observables*) consente di restringere l’ambiguità che, altrimenti, caratterizza qualsiasi indagine di superficie.



## 2. L'AREA DI STUDIO

L'area in oggetto, ubicata nel Comune di San Michele al Tagliamento (VE), è inquadrata nella CTRN n. 108130 scala 1:10.000 della Regione Veneto, posto lungo il margine litorale ad una quota di 1.5 m s.l.m. (Figura 2.1 e 2.2). Il territorio comunale si sviluppa nella bassa pianura veneto-friulana, ad est è delimitato dal tratto terminale del fiume Tagliamento, che rappresenta anche il confine amministrativo con la Regione Friuli Venezia Giulia.



**Figura 2.1** Ubicazione dell'area (Lido del Sole – Bibione, VE)

L'area di studio ricade in un ambito in cui sono presenti depositi costieri, tipo cordoni dunali e spiagge, alimentati dalle alluvioni del fiume Tagliamento, caratterizzati da sabbie fini, medio-fini e medio-grossolane, limi e limi argillosi, talvolta organici nelle lame interdunali. Lo spessore di questi sedimenti arriva generalmente a 10-12 m, al di sotto dei quali vi sono depositi di origine principalmente marina.



**Figura 2.2** Ubicazione della pista ciclabile e della traccia dell'indagine eseguita.

### 3. METODOLOGIE HS E HVSR IN ESTREMA SINTESI

#### 3.1 HoliSurface®

La metodologia *HoliSurface*® (HS) è una procedura di acquisizione ed analisi di dati di sismica attiva che considera in modo congiunto (olistico) tutta una serie di *oggetti di analisi (observables)* che, nel loro insieme, descrivono in maniera appunto olistica la propagazione delle onde di Rayleigh e Love (vedi riferimenti bibliografici in calce).

Tale tipo di indagine è una evoluzione (oggetto di brevetto – [www.holisurface.com](http://www.holisurface.com)) del metodo di analisi delle velocità di gruppo tramite MFA (*Multiple Filter Analysis* – Dziewonski et al., 1969) e/o FTAN (*Frequency Time ANalysis* – Natale et al., 2004), quindi basata sulla dispersione delle onde di superficie (velocità di gruppo; rapporto tra spazio e tempo di arrivo dell'onda frequenza per frequenza) e la sua analisi secondo l'approccio FVS (*Full Velocity Spectrum*).

Per il presente lavoro si sono considerate entrambe le componenti dell'onda di Rayleigh (componente Z e R – vedi **Figura 3.1**) e il rapporto spettrale H/V, ovvero si è svolta un'inversione congiunta di tali *observables* secondo i principi del fronte di Pareto così come presentato ad esempio in Dal Moro et al. (2015; 2016; 2019). L'acquisizione tanto dei dati HS (attivi) che HVSR (passivi) avviene grazie ad un semplice geofono triassiale (evidentemente *triggerabile*).

Acquisire un dato per analisi *HoliSurface*® non è molto diverso rispetto alle tradizionali acquisizioni di sismica attiva finalizzate, ad esempio, ad effettuare analisi MASW o a rifrazione (lo zero dei tempi è determinato dal trigger, il quale dà inizio alla registrazione).

Rispetto alla cosiddetta tecnica MASW (ma tale acronimo è stato abbondantemente frainteso – vedi libro "Acquisizione e analisi di dati sismici e vibrazionali per studi di caratterizzazione sismica e geotecnica" Flaccovio Editore, 2019), la differenza sostanziale sta nel fatto che per effettuare acquisizioni e analisi *HoliSurface*®, invece di utilizzare *n* geofoni a componente singola, si utilizza un unico geofono a tre componenti (geofono triassiale) opportunamente orientato in modo da poter definire nell'ordine le componenti verticale (Z), radiale (R) e trasversale (T).

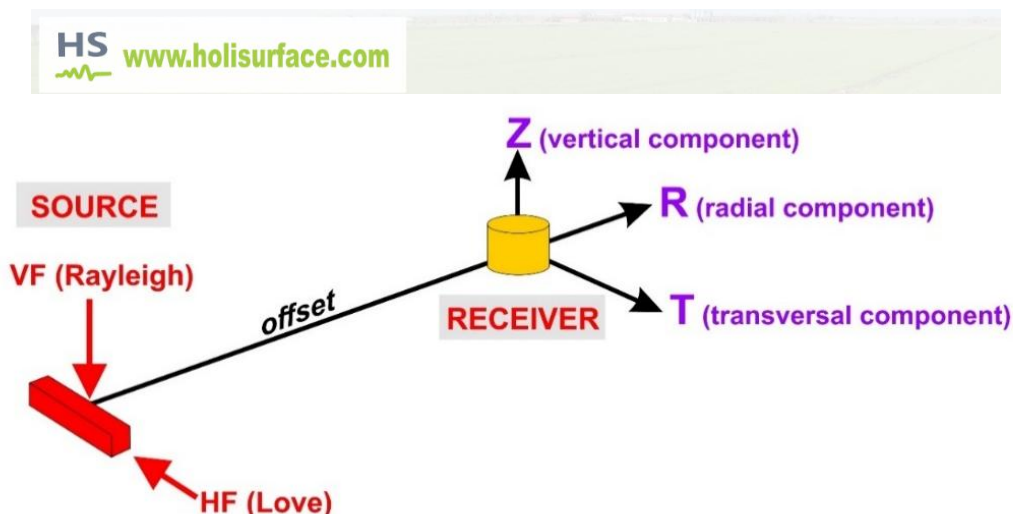


Figura 3.1 Componenti sismiche.

La seguente tabella riporta i principali parametri di acquisizione:

offset	60 m
lunghezza registrazione	2 s (poi ridotto a 0.7 s in fase di elaborazione)
frequenza di campionamento	1000 Hz
sorgente	Mazza da 10 kg su piastra (per la generazione delle onde di Rayleigh) e su traversina (per la generazione delle onde di Love)
stack	5





**Figura 3.2** Ubicazione stendimento (offset 60 m).



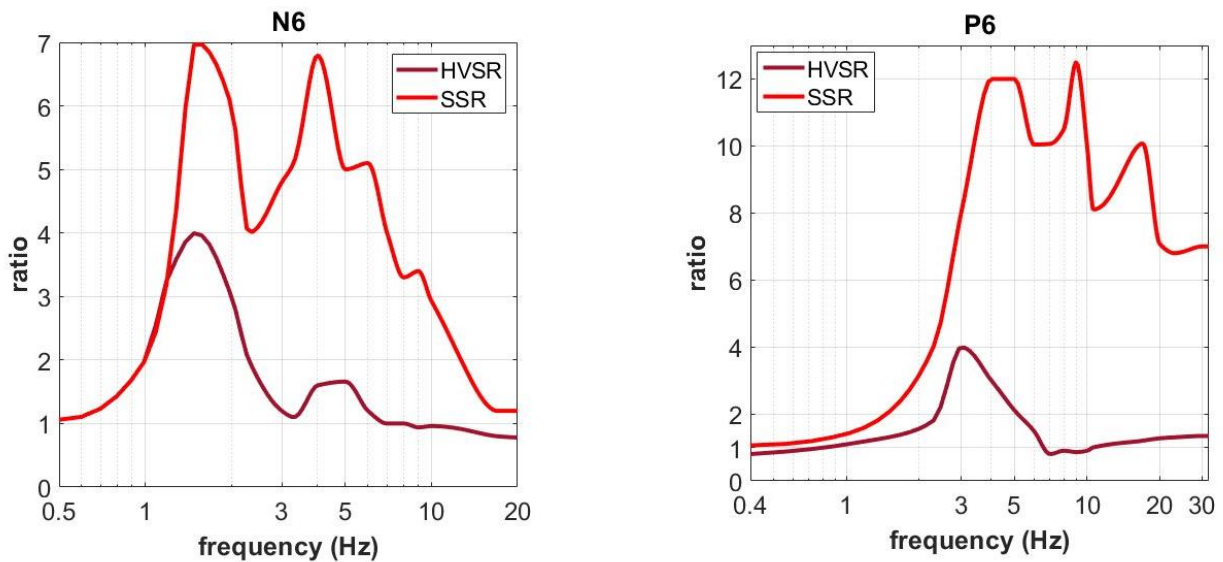
**Figura 3.3** Stendimento HS: in primo piano il geofono a 3 componenti, in lontananza la sorgente.

### 3.2 HVSR

Il rapporto HVSR è in uso in sismologia indicativamente dalla fine degli anni '60 (vedi ad esempio Mark and Sutton, 1975). Negli anni ottanta, in Giappone, si sono poi svolti diversi studi sul suo utilizzo in relazione alla valutazione del rischio sismico (vedi studi di Nakamura riportati tra i riferimenti bibliografici). Di fatto non è mai stata dimostrata la relazione tra amplificazione e curva HVSR. Tanto considerazioni teoriche che osservazioni sperimentali non supportano infatti l'idea (purtroppo molto popolare) che la curva HVSR rappresenti, *sic et simpliciter*, la curva di amplificazione.

Diversi studi hanno infatti dimostrato (vedi ad esempio Perron et al., 2018 e riferimenti bibliografici in esso contenuti) che l'amplificazione effettivamente registrata durante un terremoto si discosta anche di molto rispetto alla curva HVSR (vedi ad esempio dati riportati in **Figura 3.4**).

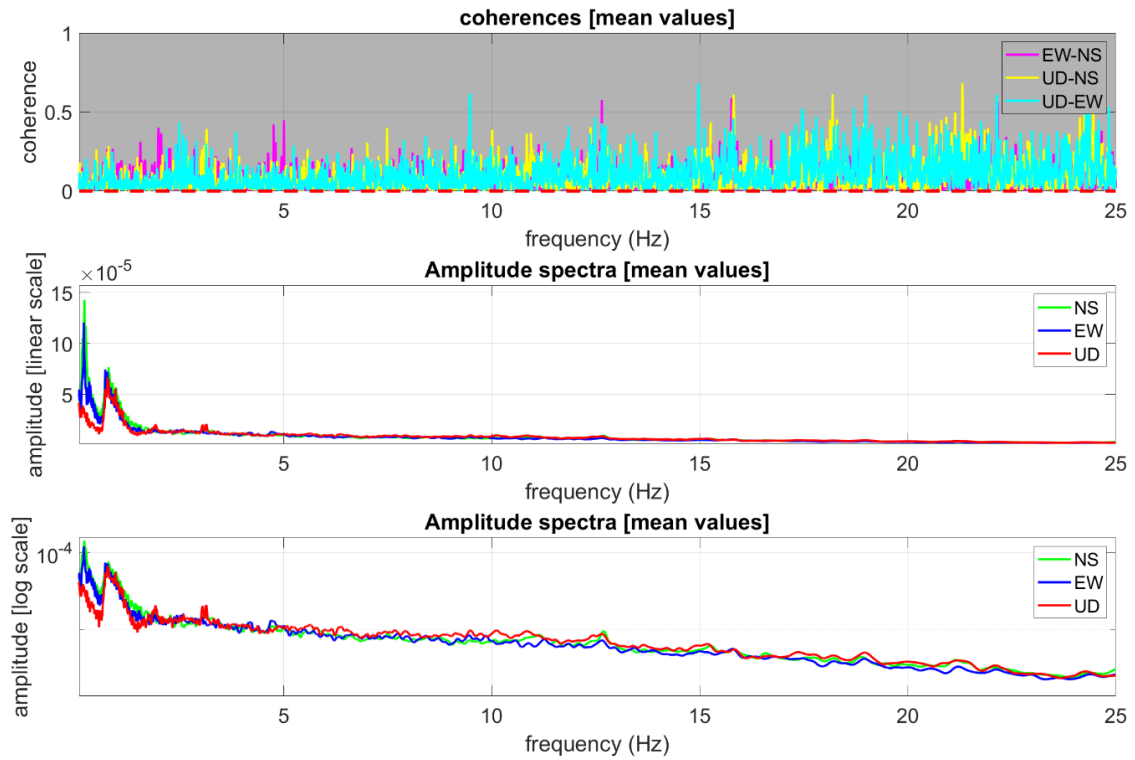
Se quindi, unitamente a dati riguardanti la velocità di propagazione delle onde di superficie, l'HVSR rappresenta un valido sussidio a stimare le  $V_s$  delle parti più profonde (e.g. Arai & Tokimastu, 2005; Dal Moro, 2015), essa non deve essere intesa come misura dell'amplificazione di sito.



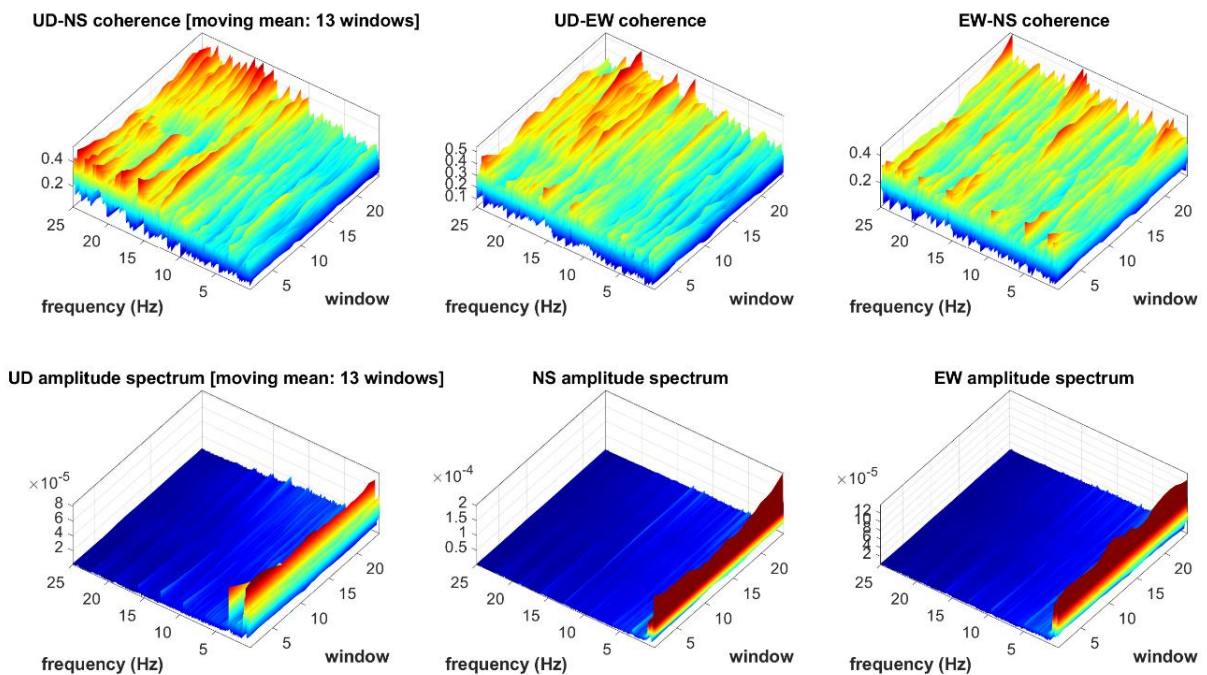
**Figura 3.4.** Confronto tra curva HVSR e curva di amplificazione reale (da analisi SSR – *Standard Spectral Ratio*) in caso di evento sismico (da Perron et al., 2018). Si noti la profonda differenza tra curva HVSR ed amplificazione effettivamente misurata.

## 4. ANALISI

### 4.1 HVSR

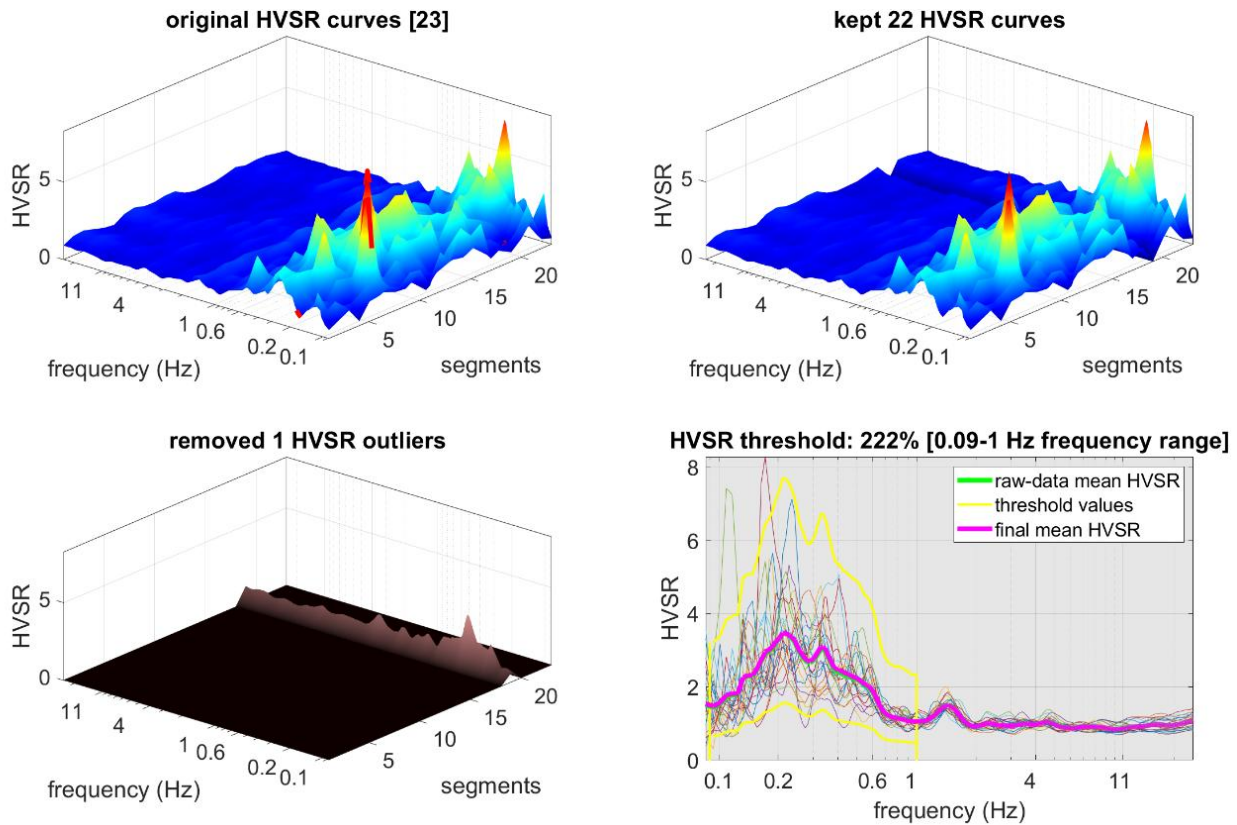


**Figura 4.1.** Dall'alto: funzioni di coerenza per le tre coppie di sensori indicati, spettri di ampiezza (*smoothing* del 3%) delle tre componenti con scala verticale lineare e con scala verticale logaritmica.

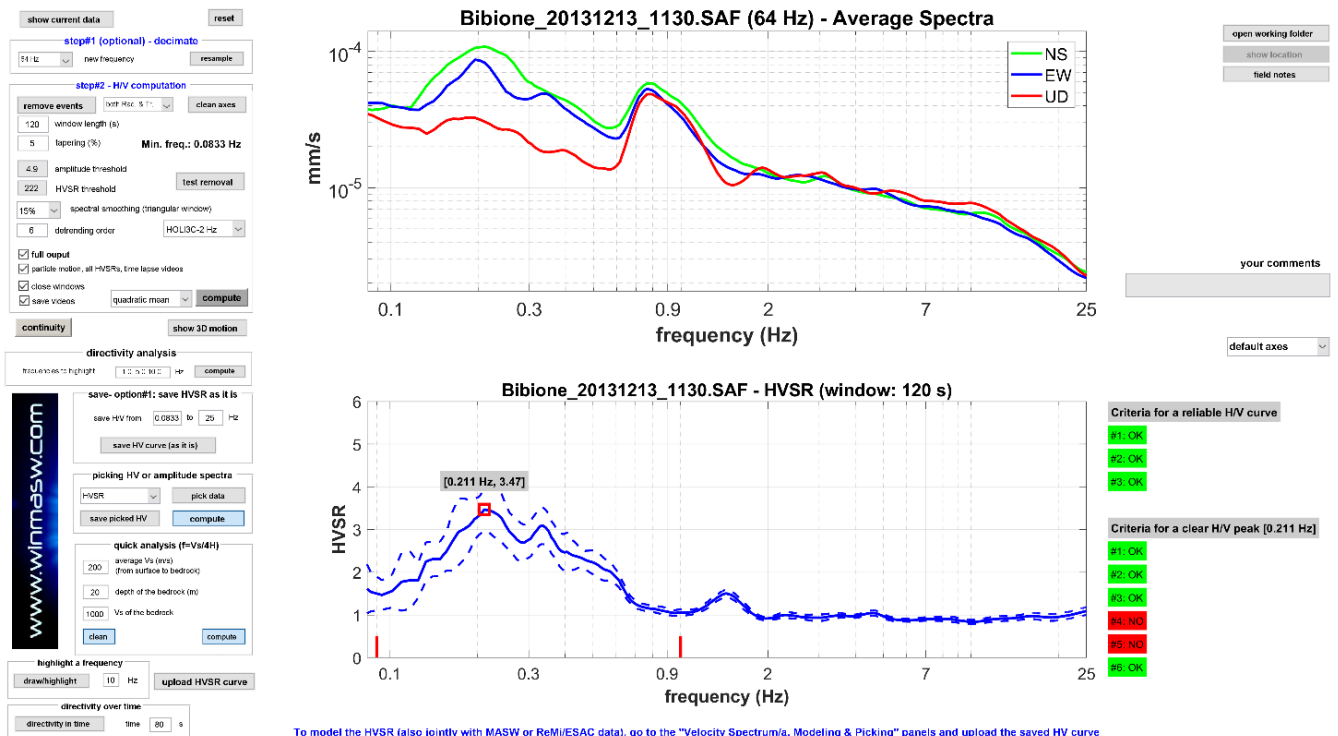


**Figura 4.2.** Funzioni di coerenza nel tempo per le tre coppie di sensori e, sotto, spettri di ampiezza nel tempo per le componenti UD, NS e EW (spetrogrammi).

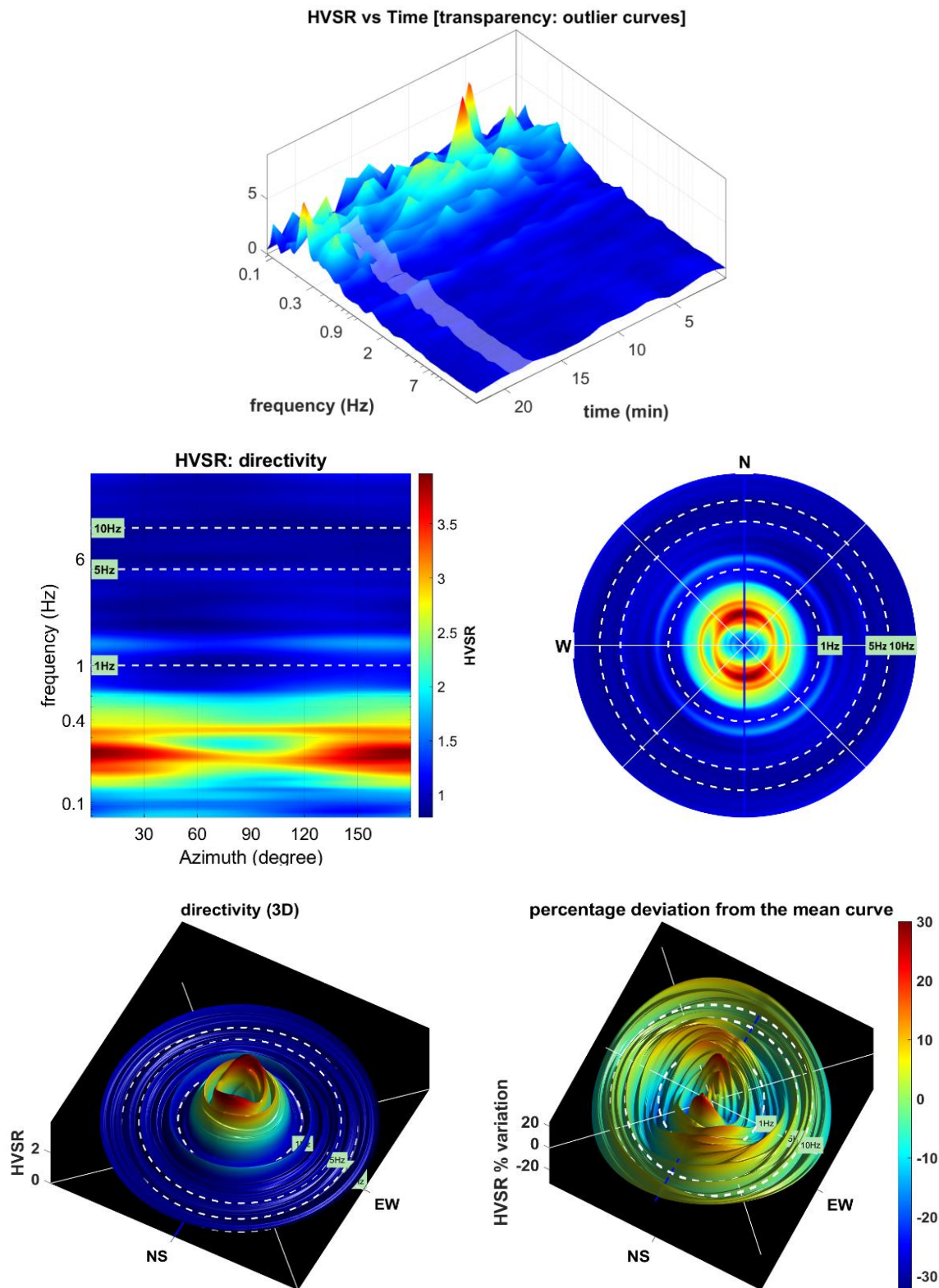




**Figura 4.3.** Dall'alto a sinistra in senso orario: 1) totalità delle curve HVSR per tutte le finestre considerate; 2) curve HVSR mantenute successivamente alla rimozione delle curve *outliers*; 3) curve HVSR rimosse (in quanto *outlier* – in questo caso è stata rimossa un'unica curva); 4) curve HVSR con indicato il limite fissato (curva in giallo) oltre il quale le curve vengono rimosse in quanto *outlier*.



**Figura 4.4.** Spettri di ampiezza (smussati) e, in basso, curva HVSR finale.

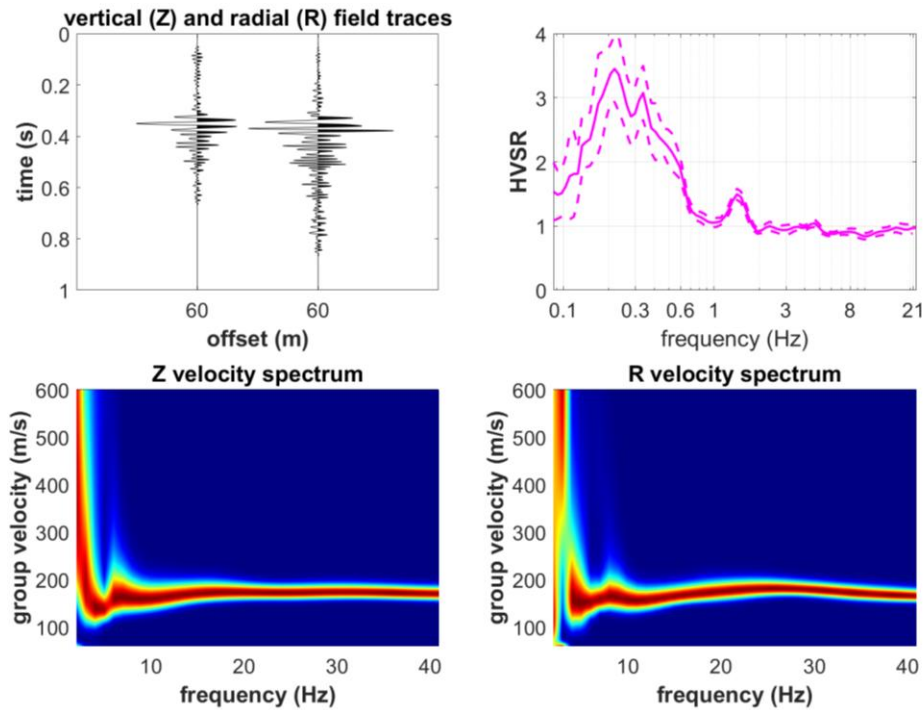


**Figura 4.5.** Continuità del rapporto H/V nel tempo e direttività.

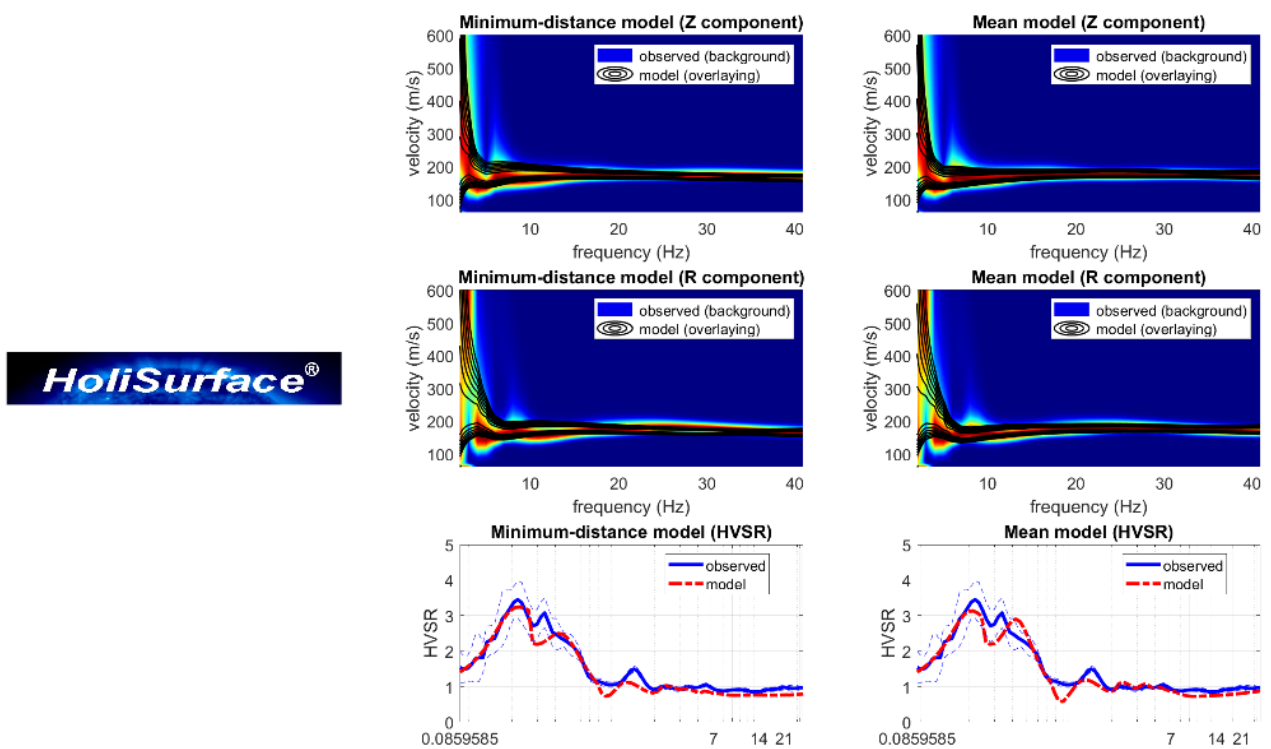
L'analisi dei dati mostra la completa assenza di segnali di natura industriale (vedasi spettrogrammi e funzioni di coerenza – Dal Moro, 2020) e la presenza di un picco (a circa 0.21 Hz) che soddisfa quattro su sei criteri SESAME. Per una maggiore precisione della curva alle frequenze più basse sarebbe stato utile un *dataset* di maggior durata ma gli obiettivi del presente studio non richiedevano una migliore definizione degli strati più profondi (nell'area considerata la copertura sedimentaria è di svariate centinaia di metri). Si consideri che la lunghezza della finestra di analisi dipende dalla frequenza minima che si desidera definire. Conseguentemente, per ottenere un elevato numero di segmenti/finestre in caso si adottino finestre da 120 s (come nella presente indagine), sarebbe necessario un dataset di notevole lunghezza.

## 4.2 Inversione congiunta Z+R+HVSR

Gli spettri di velocità di gruppo delle componenti Z e R (verticale e radiale) dell'onda di Rayleigh e l'HVSR sono stati invertiti congiuntamente secondo i criteri dell'ottimo paretiano (e.g. Dal Moro et al., 2019). Gli spettri di velocità sono stati gestiti tramite approccio FVS (*Full Velocity Spectrum* – Dal Moro 2014; 2019) quindi senza alcun *picking*/interpretazione in termini di curve modali. La curva HVSR è stata modellata in accordo ad Arai & Tokimastu (2004), quindi considerando anche l'apporto delle onde di Love presenti nel campo dei microtremori (fattore  $\alpha$  - vedi Dal Moro, 2014; 2019).

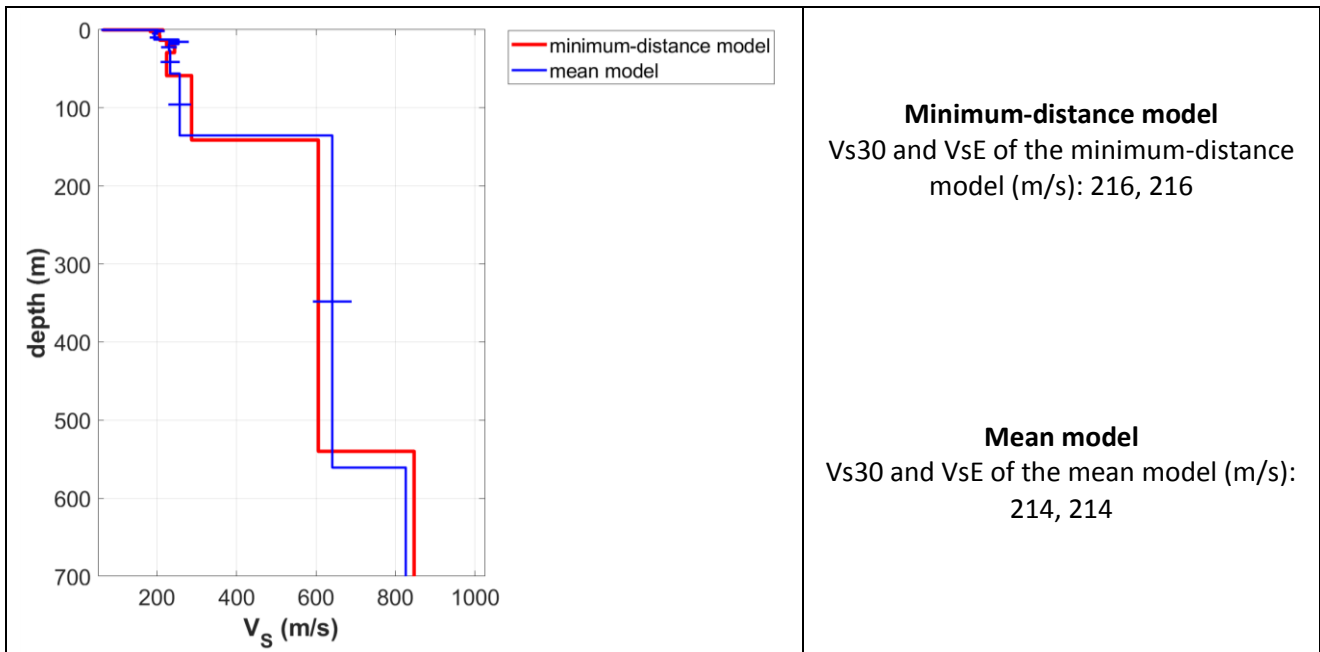


**Figura 4.6.** I tre *observables* utilizzati per l'inversione congiunta: le tracce sismiche attive delle componenti Z e R, la curva HVSR e gli spettri delle velocità di gruppo computati dalle due tracce attive (Z e R).



**Figura 4.7.** Risultati riferiti al modello *minimum-distance* e a quello medio.





**Figura 4.8.** Risultato dell'inversione congiunta svolta (mostrati i dati riferiti al modello medio e al *minimum-distance model*).

## 5. COMMENTI

L'analisi dei dati HVSR mostra la completa assenza di segnali di qualsivoglia natura industriale e la presenza di un picco (a circa 0.21 Hz) che soddisfa quattro su sei criteri SESAME, geologicamente riferibile al tetto del *bedrock* (piuttosto profondo nell'area in esame).

L'indagine sismica realizzata tramite analisi congiunta degli spettri di velocità di gruppo delle componenti Z e R e della curva HVSR (approccio *HoliSurface*<sup>®</sup>) ha consentito la determinazione del profilo  $V_s$  in modo robusto (cioè scevro da assunzioni che possano andare ad incrementare l'ambiguità della soluzione).

I dati HS e HVSR a disposizione sono ben caratterizzati e l'accordo tra i dati di campagna e del modello risulta piuttosto buono potendo definire il sito come appartenente alla categoria C (*Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 e 360 m/s - NTC2018*).

## 6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Arai, H., Tokimatsu, K., 2005. *S-Wave velocity profiling by joint inversion of microtremor dispersion curve and horizontal-to-vertical (H/V) spectrum*. Bull. Seism. Soc. Am. 95, 1766–1778.
- Arai, H., Tokimatsu, K., 2004. *S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum*. Bull. Seism. Soc. Am 94, 53–63.
- Dal Moro G., 2020. *On the identification of industrial components in the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSr) from microtremors*. Pure and Applied Geophysics, <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02424-0>
- Dal Moro G., Al-Arifi N., Moustafa S., 2019. *On the efficient acquisition and holistic analysis of Rayleigh waves: Technical aspects and two comparative case studies*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 125. On-line: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726118310613>
- Dal Moro G., 2019. *Effective Active and Passive Seismics for the Characterization of Urban and Remote Areas: Four Channels for Seven Objective Functions*. Pure and Applied Geophysics, 176, 1445-1465. Available on-line: <https://rdcu.be/bbT04>
- Dal Moro G., Al-Arifi N., Moustafa S.R., 2017. *Improved Holistic Analysis of Rayleigh Waves for Single- and Multi-Offset Data: Joint Inversion of Rayleigh-wave Particle Motion and Vertical- and Radial-Component Velocity Spectra*. Pure and Applied Geophysics, on-line: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00024-017-1694-8.pdf>
- Dal Moro G. and Puzzilli L.M., 2018. *Single- and multi-component inversion of surface waves acquired by a single 3-component geophone: an illustrative case study*, Acta Geodyn. Geomater., 14, 4 (188), 431-444, online: [https://www.irsm.cas.cz/materialy/acta\\_content/2017\\_doi/DalMoro\\_AGG\\_2017\\_0024.pdf](https://www.irsm.cas.cz/materialy/acta_content/2017_doi/DalMoro_AGG_2017_0024.pdf)
- Dal Moro G., Al-Arifi N., Moustafa S.R., 2017. *Analysis of Rayleigh-Wave Particle Motion from Active Seismics*. Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA), 107, 51-62
- Dal Moro G., Keller L., Al-Arifi N., Moustafa S.R., 2016. *Shear-wave velocity profiling according to three alternative approaches: a comparative case study*. Journal of Applied Geophysics, 134, 112-124
- Dal Moro G., 2016. *Four Geophones for seven possible objective functions: active and passive seismics for tricky areas*. Invited presentation and Extended Abstract for the Urban Geophysics workshop of the 22nd EAGE Near Surface Geoscience conference (4-8 September 2016 - Barcelona, Spain)
- Dal Moro G., Moustafa S.R., Al-Arifi N., 2015. *Less is more: from van der Rohe to the 4-channel system for the efficient and holistic acquisition and analysis of surface waves. An urban case study*. Proceedings of the GNGTS (Gruppo Nazionale Geofisica della Terra Solida - ogs.trieste.it) congress (17-19 November 2015 - Trieste, Italy)
- Keller L., Weber T., Dal Moro G., 2015. *Geophysikalische In-situ-Bestimmung der Eingangsparameter in die seismischen Standortanalysen am Beispiel des Ambassador House Opfikon*. Proceedings of the 14th D-A-CH conference of the Swiss Society for Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Zurich, August 21-21, SIA D0255, ISBN 978-3-03732-060-0
- Dal Moro G., Keller L., Poggi V., 2015. *A Comprehensive Seismic Characterization via Multi-Component Analysis of Active and Passive Data*. First Break, 33, 45-53
- Dal Moro G., Moustafa S.R., Al-Arifi N., 2015. *Efficient acquisition and holistic analysis of Rayleigh waves*. Proceedings of the Near-Surface EAGE 2015 congress (Turin - Italy) [having received a very high score from the reviewers, the work was invited to be published in *Near Surface Geophysics* (the paper was instead published in *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*)]
- Dal Moro G., 2015. *Joint Inversion of Rayleigh-Wave Dispersion and HVSr of Lunar Seismic Data from the Apollo 14 and 16 sites*. ICARUS, 254, 338-349
- Dal Moro G., Ponta R., Mauro R., 2015. *Unconventional Optimized Surface Wave Acquisition and Analysis: Comparative Tests in a Perilagoon Area*. Journal of Appl. Geophysics, 114, 158-167
- Dziewonski A., Bloch S., Landisman N., 1969. *A technique for the analysis of transient seismic signals*. Bull. Seism. Soc. Am. 59, 427-444.

- Keller L., Dal Moro G., Spillmann T., Deplazes G., Madritsch H., 2019. *Mapping bedrock topography of the Lower Aare valley using seismic surface waves*. 7<sup>th</sup> Swiss Geoscience Meeting, Fribourg 2019 (22-23 November 2019)
- Mark, N., Sutton, G.H., 1975. *Lunar shear velocity structure at Apollo sites 12, 14, and 15*. J. Geophys. Res.80, 4932–4938.
- Nakamura, Y., 2000. *Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications*. In: Proc XII World Conf. Earthquake Engineering, New Zealand. Paper no 2656.
- Nakamura, Y., 1996. *Realtime Information Systems for Seismic Hazard Mitigation*. Quarterly Report of Railway Technical Research Inst. (RTRI), 37, 112–127.
- Nakamura, Y., 1989. *A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface*. Quarterly Report of Railway Technical Research Inst. (RTRI), 30, 25–33.
- Natale M., Nunziata C., Panza G.F. 2004. *FTAN method for the detailed definition of Vs in urban areas*. In 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, p. 2694. Vancouver, B.C., Canada.
- Perron V., Gélis C., Froment B., Hollender F., Bard P.-Y., Cultrera G., Cushing E.C., 2018. *Can broad-band earthquake site responses be predicted by the ambient noise spectral ratio? Insight from observations at two sedimentary basins*. Geophysical Journal International, 215, 1442–1454.

