

ANALISI GEOSTATISTICA DEI PERIODI DI RISONANZA DEL BACINO PROFONDO DI KATHMANDU

Pettenati F.¹, Sandron D.¹, Trevisani S.²,

¹ Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, OGS, Trieste

² Università IUAV di Venezia

Introduzione

In questa nota mostriamo come si possono ricavare informazioni strutturali sul basamento di un bacino profondo e complesso, analizzando un dataset appena sufficiente di misure HVSR. Il dataset è formato da 39 misure di sismica passiva a stazione singola acquisite nel bacino di Kathmandu (Nepal). Il bacino di Kathmandu è un bacino profondo (Fig. 1), caratterizzato da una coltre eterogenea di sedimenti di origine lacustre glaciale in un contesto geologico complesso, che influenza notevolmente la risposta sismica in termini di periodi di risonanza (RP), rendendo quindi difficoltosa l'interpretazione di tali dati come proxy della profondità del basamento. La

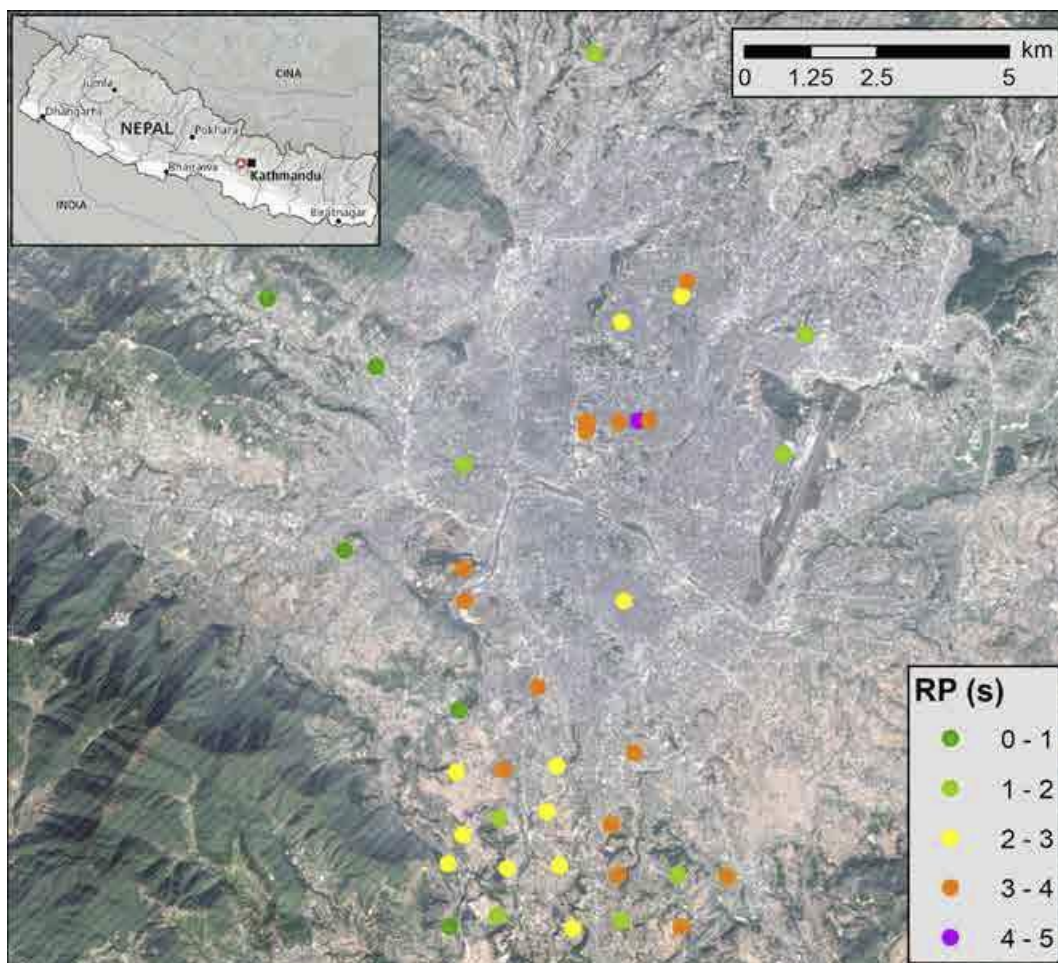


Fig. 1 - Inquadramento geografico di Kathmandu e distribuzione spaziale delle misure HVSR nel bacino urbano di Kathmandu. RP = periodi di risonanza (s) usati nel presente lavoro.

geostatistica, può venire in aiuto, essendo un ramo della statistica che si focalizza sulla struttura di correlazione spaziale dei dati. Utilizzando la struttura di correlazione spaziale, generalmente tramite l'inferenza di un modello di variogramma, essa permette di interpolare i dati disponibili, fornendo anche una valutazione dell'incertezza (Goovaerts, 1997). In relazione al complesso contesto strutturale del bacino, l'interpretazione e l'analisi dei dati HVSR tramite metodi geostatistici sono una vera sfida, sia dal punto di vista dell'analisi del substrato roccioso che del rilevamento degli effetti sismici del sito. Sempre in relazione alla complessità del caso, si sottolinea che non vengono analizzate misure di array per lo studio delle velocità, per cui non vengono stimate le profondità del basamento sui singoli siti dove è stato misurato ogni HVSR.

Il dataset

Il dataset è composto da un insieme di 26 misure eseguite durante una prima missione nel 2015, dopo il terremoto di Gorkha (Mw7.8) del 25 aprile e 5 misure eseguite nel 2018 (Fig. 2). La campagna di misure del 2015 (Sandron *et al.*, 2019) aveva interessato in un primo momento la zona sud del bacino (Lalitpur), non coperta da una precedente campagna di misure (Paudyal *et al.*, 2013). Questo ultimo dataset, con un totale di 172 HVSR, interessava la zona centrale del bacino, cioè la zona più urbanizzata. Le misure sono state eseguite con uno strumento giapponese con frequenza di 4.5 Hz, e la durata della misura pari a 5 minuti. Il dataset, infatti, non contiene curve con picchi H/V per periodi T maggiori di 2 s. Durante la nostra prima campagna ci siamo accorti che i periodi di risonanza (RP) nella zona di Lalitpur sono per la maggior parte maggiori di 2.5 s, per cui abbiamo eseguito alcuni HVSR a nord, nell'area centrale di Kathmandu dove il terremoto ha fatto i maggiori danni su monumenti ed edifici a più piani. Nel dataset (tabella 1) abbiamo aggiunto 8 misure prese dall'articolo di Molnar *et al.* (2017), sempre registrate durante una campagna post terremoto nel 2015. Nel dataset è stato aggiunto un sito di riferimento su roccia (quindi sul bedrock), ubicato sul bordo ovest del bacino (KTP, dove è installato un accelerometro). La distribuzione spaziale non è uniforme, con una concentrazione di dati in due aree: una a nord e una più a sud (Fig. 1).

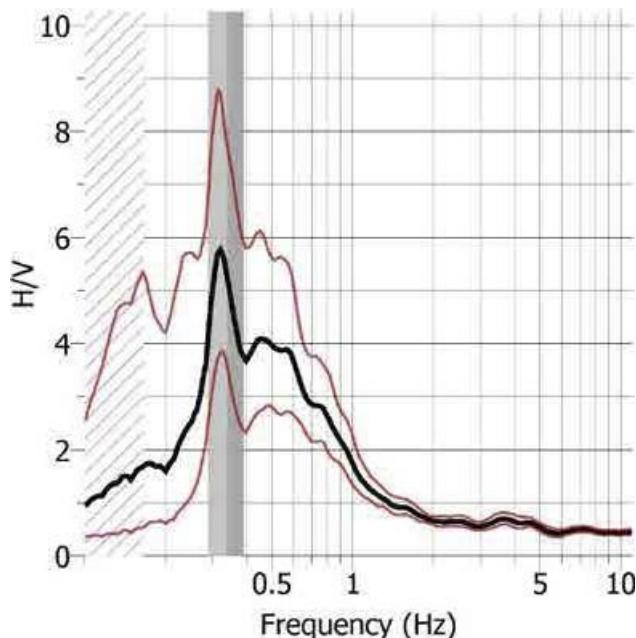


Fig. 2 - Esempio di HVSR misurato. Sito di Baluwatal (zona nord, al margine della zona più profonda del bacino che raggiunge i 550 metri).

L'analisi geostatistica

L'analisi statistica spaziale degli RP è stata eseguita seguendo un approccio geostatistico standard. I metodi geostatistici sono correntemente implementati in diversi GIS e sono una parte importante delle metodologie ESDA (Explorative Spatial Data Analysis), includendo lo studio della continuità spaziale. L'analisi geostatistica è basata principalmente su tre passi: 1) ESDA; 2) studio delle funzioni di continuità spaziale (variogrammi); 3) interpolazione e valutazione dell'accuratezza tramite cross-validation.

In questo studio, la struttura di continuità spaziale dei dati HVSR viene analizzata e interpretata, tramite variogrammi, tenendo in considerazione l'assetto geologico strutturale. Inoltre, si verifica la possibilità di integrare l'analisi con potenziali variabili ausiliarie, derivate da variabili geomorfometriche (Florinsky, 2017) e considerando la distanza dal substrato roccioso affiorante. L'analisi geostatistica esplorativa conferma la complessità dell'assetto geostrutturale dell'area. Infine, una mappatura dei periodi di risonanza HVSR, con la valutazione dell'incertezza di interpolazione, è ottenuta mediante interpolazione con Kriging ordinario e Kriging con external drift (KD).

Discussione

Le analisi geomorfometriche sono state derivate dal DEM ALOS DSM (Jaxa, 2018) e hanno dato come risultato solo una debole correlazione con la distanza dal bordo roccioso occidentale del bacino delle varie misure RP. Dal punto di vista geostatistico vero e proprio, i risultati migliori sono stati ottenuti con il KD, utilizzando una interpolazione a blocchi di dimensione di 250 m (Goovaerts 1997).

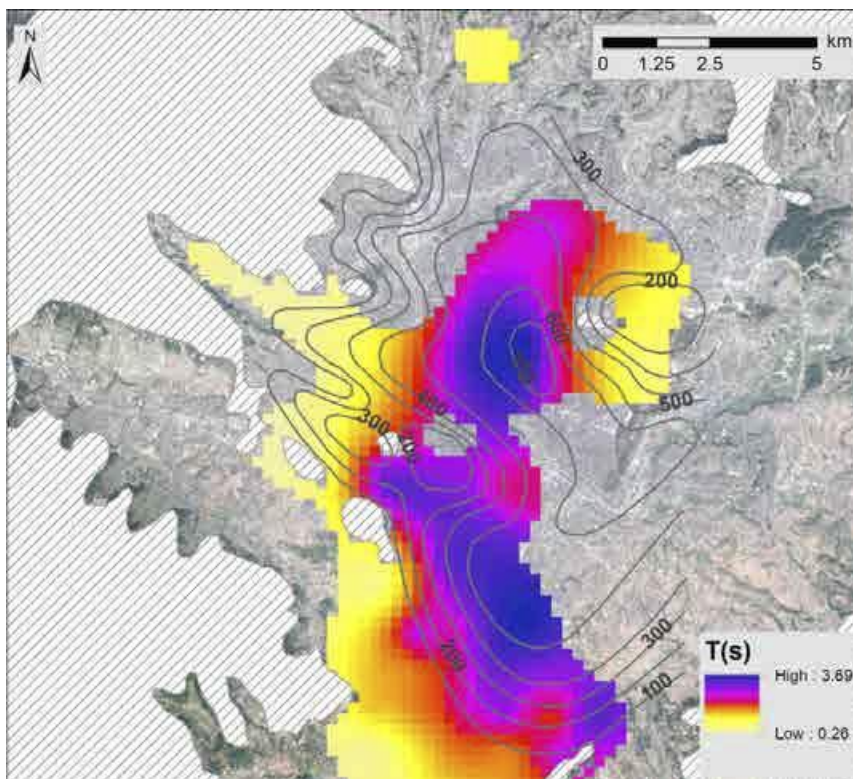


Fig. 3 - Mappa degli RP ottenuta con Kriging con external drift (KD nel testo) e con sovrapposte le isopache del basamento da Moribayashi and Maruo (1980).

La mappa risultante, anche se caratterizzata da un ampio supporto di interpolazione, è congruente con l'assetto geostrutturale e con i principali lineament dell'area. La mappa è stata confrontata con la mappa delle profondità del basamento (Moribayashi and Maruo, 1980) derivata tramite l'inversione di 112 misure gravimetriche (Fig. 3), considerando una differenza di densità tra bedrock e sedimenti di 0.8 g/cm³. La mappa da noi ottenuta mostra un massimo di RP, compatibile con i massimi di spessore ottenuti da Moribayashi and Maruo (1980). Inoltre, si evidenzia la porzione sud-occidentale dell'area, caratterizzata da una brusca variazione degli RP con un pattern allungato in direzione NW-SE, compatibile con il trend dei lineament strutturali dell'area (Sakai *et al.*, 2006, 2015). Gli stessi risultati sono visibili con il confronto della nuova mappa ottenuta da dati di pozzo (Gilder *et al.*, 2020).

L'approccio adottato è particolarmente utile nel contesto degli studi di microzonazione basati sulla metodologia HVSR condotti in aree urbane storiche. Inoltre, questo lavoro contribuisce alla conoscenza geostrutturale della struttura profonda del bacino di Kathmandu. Per maggiori dettagli si rimanda all'articolo Trevisani *et al.* (2021).

Bibliografia

Florinsky I.V., 2017. *An illustrated introduction to general geomorphometry*. Progress in Physical Geography, **41**, 6, 723-752.

Gilder C.E.L., Pokhrel R.M., Vardanega P.J., De Luca F., De Risi R., Werner M.J., Asimaki D., Maskey P. N. and Sextos, A., 2020. *The SAFER geodatabase for the Kathmandu Valley: Geotechnical and geological variability*. Earth Spectra, **36**, 3, 1549-1569.

Goovaerts P., 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, Oxford.

JAXA, 2018. **ALOS Global Digital Surface Model "ALOS World 3D - 30m" (AW3D30)**. Tsukuba, Japan: JAXA, <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/>

Molnar S., Onwuemeka J. and Adhikari S.R., 2017. *Rapid Post-Earthquake Microtremor Measurements for Siter Amplification and Shear Wave Velocity Profiling in Kathmandu, Nepal*. Earthq. Spectra, **33**(1), S55-S72.

Moribayashi S. and Maruo Y., 1980. *Basement topography of the Kathmandu Valley, Nepal - an application of the gravitational method to the survey of a tectonic basin in the Himalaya*. Journal of Japan Society of Engineering Geology, **21**, 30-37.

Paudyal YR, Yatabe R, Bhandary NP, Dahal RK, 2013. *Basement topography of the Kathmandu Basin using microtremor observation*. J Asian Earth Sci 62:627-637, doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.11.011.

Sakai H., Yahagi W., Fujii R., Hayashi T., Upret B.N., 2006. *Pleistocene rapid uplift of the Himalayan frontal ranges recorded in the Kathmandu and Siwalik basins*. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, **241**, 1, 16-27.

Sakai T., Gajurel A.P., and Tabata H., 2015. *Seismites in the Pleistocene succession and recurrence period of large earthquakes in the Kathmandu Valley, Nepal*. Geoenvironmental Disasters, **2**, 25 pp.

Sandron D., Maskey S., Giorgi M., Maharjan D. V., Shrestha S. N., Cravos C. and Petenat F., 2019. *Environmental and on buildings noise measures: Lalitpur (Kathmandu)*. Earthquake Engineering. **60**, 1, 17-38: March 2019, doi 10.4430/bgta0259.

Trevisani S., Petenat F., Paudyal S. and Sandron D., 2021. *Mapping long-period soil resonances in the Kathmandu basin using microtremors*. Environmental Earth Sciences (ENGE), Open access, doi:10.1007/s12665-021-09532-7, **80**, 265, 16 pp.