

## 7. MODELLAZIONE DEL MOTO DEL SUOLO ATTESO PER VARI SCENARI SISMICI

*P. Suhadolc, F. Vaccari, F. Romanelli, A. Saraò, G.F. Panza, F. Mollaioli, L. Decanini*

### 7.1 Stima realistica dell'input sismico con sorgente estesa

Utilizzando una sorgente bidimensionale, abbiamo calcolato accelerogrammi a 3 componenti, nell'intervallo 0-1 Hz, per ricevitori posti a Catania, Augusta, Siracusa, Noto, Giarre, Sortino, Piana-CT e Scordia (Fig. 7.1).

La sorgente è stata modellata con due sottofaglie rettangolari (Fig. 7.1) di dimensioni 22x15 km (sottofaglia A) e 50x15 km (sottofaglia B) poste alla profondità di 0.2 km per rappresentare la scarpata Ibleo-Maltese che ha probabilmente originato il terremoto del 1693 ( $M_s=7$ ). I dati sono stati ottenuti da informazioni raccolte in ambito GNDT. Due diversi meccanismi di sorgente sono stati usati sulle due sottofaglie; la sottofaglia A ha strike=352°, dip=80° rake=270°, la sottofaglia B ha strike=346°, dip=80° rake=270°. La nucleazione principale è a 15 km di profondità. Una griglia di celle quadrate è stata usata per discretizzare le due sottofaglie, ciascuna avente lato 400 m, al centro delle quali sono state poste delle sorgenti puntiformi. Per ciascuna sorgente puntiforme i sismogrammi sono stati calcolati col metodo della somma multimodale (Panza, 1985, Panza e Suhadolc, 1987). Alle diverse stazioni il segnale completo è ottenuto sommando i sismogrammi, relativi a ciascuna sorgente puntiforme, opportunamente ritardati secondo i tempi di propagazione della rottura. La rottura si propaga a velocità costante, pari al 75% di velocità delle onde S.

Gli accelerogrammi sono stati calcolati per un momento sismico scalare totale pari a  $4 \times 10^{19}$  Nm distribuito uniformemente sulla faglia e per tre diversi modelli di propagazione della rottura al fine di valutare gli effetti di direttività sulle serie temporali calcolate. La rottura si propaga da Sud a Nord nel modello 1, dal centro della faglia bilateralmente verso le due estremità nel modello 2 e da Nord a Sud nel modello 3 (Fig.7.1)

In Tab. 7.1 sono riportati (in  $\text{cm/s}^2$ ) i valori di massima accelerazione per ciascuna delle otto stazioni considerate (componenti verticale = Z, trasversale = T, radiale = R Est-Ovest = EW e Nord Sud = NS) in corrispondenza dei 3 diversi modelli di rottura (M).

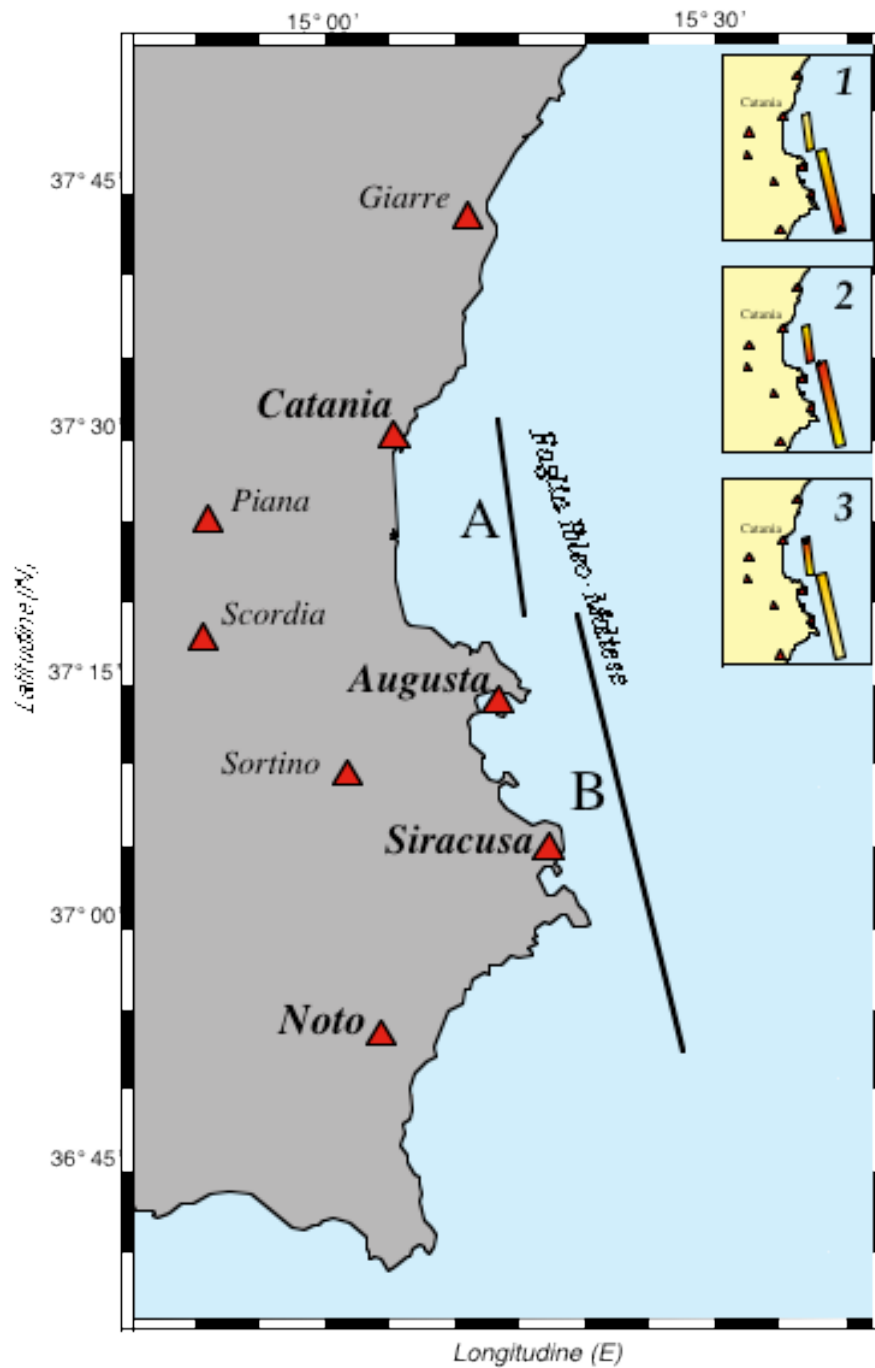


Fig. 7.1 - Mappa con le stazioni (triangoli) ove sono stati calcolati i sismogrammi. La faglia è stata modellata con le due sottofaglie A e B. Nei riquadri in alto a destra sono riportati i 3 diversi modelli di propagazione della rottura adottati nel calcolo. La nucleazione della rottura è evidenziata con una stella (la figura a colori è riportata a pag. 12).

Tab. 7.1: Valori di massima accelerazione (in  $cm/s^2$ ) per ciascuna delle otto stazioni considerate (componenti verticale = Z, trasversale = T, radiale = R Est-Ovest = EW e Nord Sud = NS) in corrispondenza dei 3 modelli di rottura (M).

<b>Giarre</b>				<b>Sortino</b>		
M	Z	WE	NS	Z	WE	NS
1	20.94	158.56	52.53	100.51	185.52	305.98
2	19.69	101.21	28.78	68.22	40.03	32.18
3	5.68	17.28	3.90	160.84	377.39	233.83

<b>Catania</b>						
M	Z	WE	NS	Z	WE	NS
1	232.99	270.95	235.63	79.19	56.99	36.69
2	182.29	360.79	315.15	99.38	185.08	151.82
3	47.39	38.52	21.18	60.54	145.67	58.45

<b>Piana</b>				<b>Augusta</b>		
M	Z	WE	NS	Z	WE	NS
1	158.37	205.24	209.13	193.91	280.96	260.94
2	53.81	62.79	179.48	84.67	72.43	37.61
3	64.69	46.51	14.07	112.00	348.84	146.18

<b>Scordia</b>				<b>Siracusa</b>		
M	Z	WE	NS	Z	WE	NS
1	110.43	189.99	243.57	174.58	341.89	357.58
2	103.98	60.45	52.32	160.00	407.25	263.85
3	105.48	84.40	62.25	162.30	214.11	113.28

## 7.2 Microzonazione di Augusta

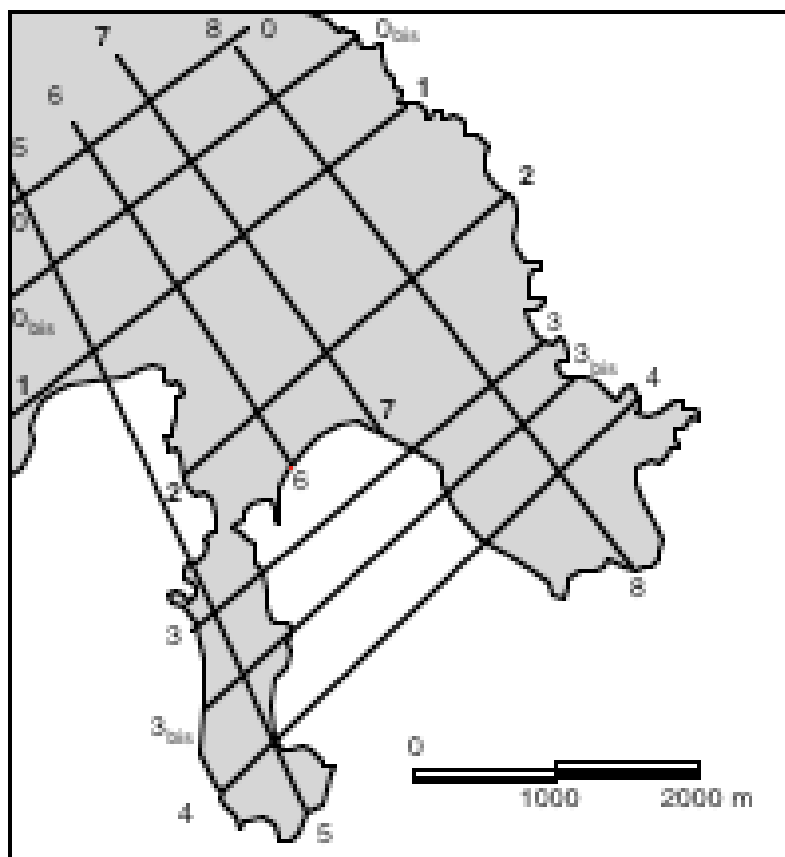
Lo scenario considerato è quello di un terremoto analogo all'evento distruttivo dell'11 gennaio 1693, con epicentro localizzato sul segmento settentrionale della faglia Ibleo-Maltese (Fig. 7.2).



Fig. 7.2 - Mappa generale dell'area di Augusta, con evidenziato l'epicentro usato per la modellazione dell'evento dell'11 gennaio 1693, localizzato sul segmento settentrionale della faglia Ibleo-Maltese. Il rettangolo evidenzia l'area per la quale è stata effettuata la microzonazione, visibile in dettaglio in Fig. 7.3.

Utilizzando le informazioni geotecniche dettagliate raccolte dall'UR Uni CT (Prof. Tortorici) è stata effettuata un'analisi di microzonazione per la città di Augusta, considerando i profili 1, 2 e 7 mostrati in Fig. 7.3 e 7.4. Tali profili sono stati scelti in quanto rappresentativi della stratigrafia e della litologia riscontrabili anche nelle rimanenti sezioni. I parametri descrittivi delle varie unità litologiche sono dati in Fig. 7.4.

La propagazione delle onde è stata studiata applicando la metodologia ibrida (Fäh et al., 1993) basata sulla somma multimodale (Panza, 1985; Florsch et al., 1991) e sulle differenze finite. I segnali sintetici vengono calcolati con un contenuto in frequenza massimo pari a 5 Hz. Come modello strutturale medio di riferimento (Fig. 7.5), anelastico a strati piani e paralleli, utilizzato per la propagazione delle onde dalla sorgente alla città di Augusta, è stato scelto quello impiegato per la zonazione deterministica del territorio italiano (Costa et al., 1993), già adottato nell'ambito del progetto Catania (GNDT, PE98; Romanelli e Vaccari, 1999). Tale modello strutturale viene anche utilizzato per il calcolo di segnali di riferimento da confrontare con i risultati della modellazione dettagliata, al fine di studiare gli effetti di sito mediante rapporti di spettri di risposta.



*Fig. 7.3 - Profili per i quali sono disponibili dettagliate informazioni litotecniche. In grassetto sono evidenziate le sezioni utilizzate per la microzonazione.*

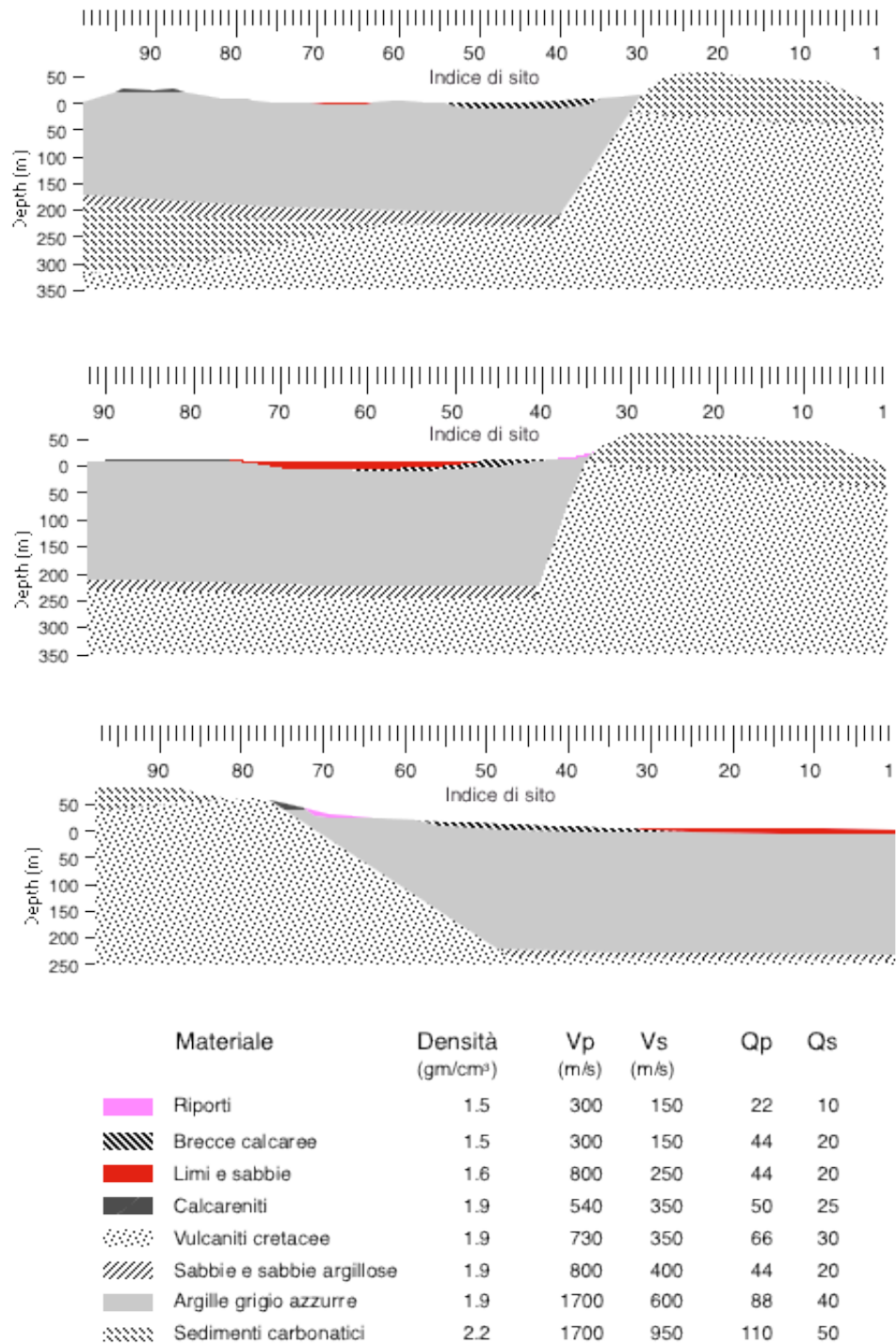


Fig. 7.4 - Stratigrafia delle sezioni utilizzate per la microzonazione.

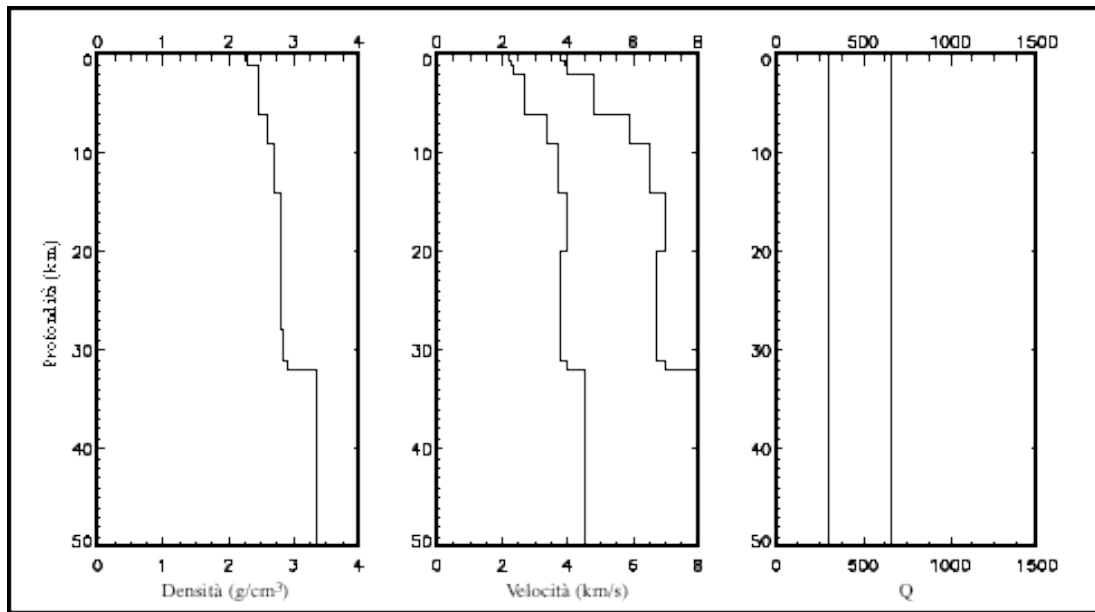


Fig. 7.5 - Modello strutturale medio di riferimento utilizzato per la propagazione del campo d'onda dalla sorgente ad Augusta e per la stima delle amplificazioni spettrali 2D/1D mostrate in Figg. 7.7, 7.8 e 7.9.

Per quanto riguarda la sorgente, i parametri adottati inizialmente sono: strike =  $352^\circ$ , dip =  $80^\circ$ , rake =  $270^\circ$ , profondità ipocentrale 10 km, momento sismico  $3.5 \cdot 10^{19}$  Nm. Tale configurazione implica un angolo fra la direzione della faglia e la congiungente epicentro-Augusta pari a circa  $170^\circ$ , ed una distanza di circa 25 km. Analizzando i profili di radiazione della sorgente per le onde P-SV (componenti radiale e verticale del moto) ed SH (componente trasversale) si è notato però che per tale configurazione Augusta viene a trovarsi in un minimo di radiazione per tutte e tre le componenti, come evidenziato in Figura 7.6. Si è pertanto deciso di effettuare la modellazione per un angolo faglia-profilo di  $140^\circ$ , che permette di analizzare anche i pattern di amplificazione dovuti alle onde SH.

Con il metodo ibrido sono stati calcolati lungo ciascun profilo circa 90 sismogrammi sintetici a tre componenti, localizzati sui siti indicati nelle relative figure (segnali 2D). Negli stessi siti, i calcoli sono stati ripetuti utilizzando il modello di riferimento a strati piani e paralleli (segnali 1D). Di ciascun sismogramma è stato calcolato lo spettro di risposta in accelerazione, e quindi, sito per sito, il rapporto fra lo spettro del segnale 2D e quello del segnale 1D. Per ogni profilo e per ciascuna componente del moto si è scelto di rappresentare il risultato dei rapporti fra gli spettri di risposta in un'unica mappa, evidenziando con una scala di grigi le amplificazioni spettrali alle varie frequenze lungo il profilo.

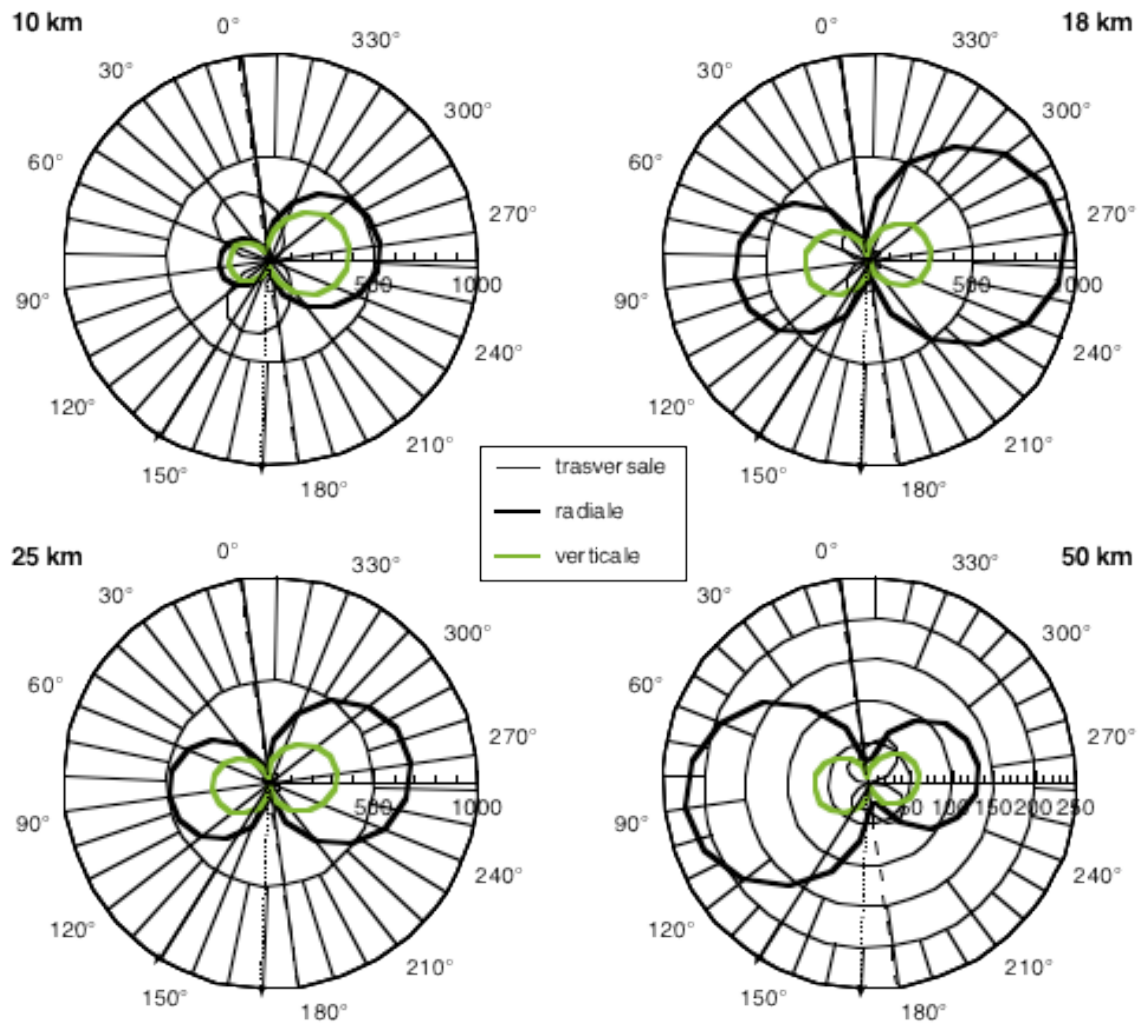


Fig.7.6 - Analisi parametrica del profilo di radiazione della sorgente utilizzata per la generazione dei sismogrammi sintetici. Si considerano le tre componenti del moto osservate alle distanze epicentrali di 10 km, 18 km, 25 km (che corrisponde alla distanza epicentrale per Augusta) e 50 km. La linea tratteggiata indica lo strike della faglia Ibleo-Maltese, da cui sono misurati gli angoli verso i siti, in senso antiorario. La direzione di Augusta, indicata dalla freccia punteggiata, si trova in un minimo di radiazione particolarmente marcato alla distanza di 25 km. Pertanto nella modellazione si è deciso di utilizzare un angolo di 140°, evidenziato dalla freccia continua. La scala delle unità di misura è espressa in  $\text{cm/s}^2$ .



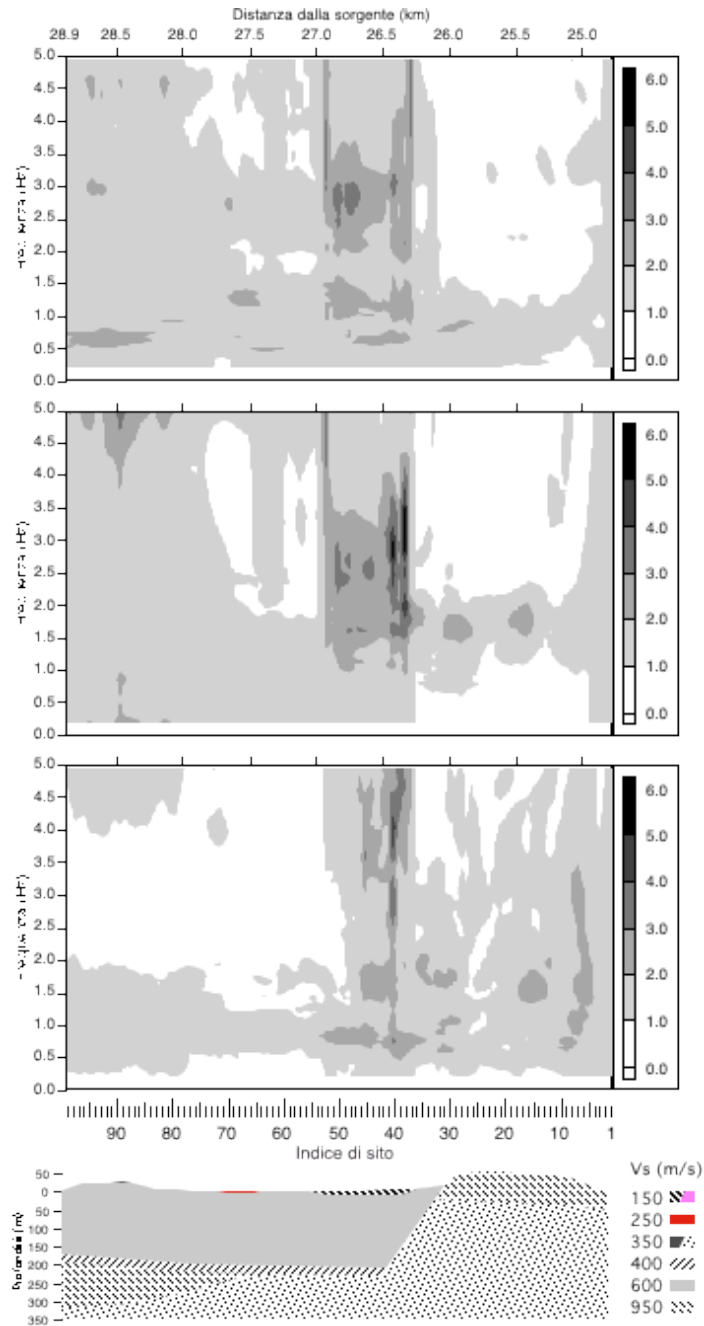


Fig. 7.7 - Amplificazioni spettrali (scala di grigi) ottenute come rapporto fra gli spettri di risposta calcolati per i segnali sintetici calcolati lungo il profilo 1 e i segnali sintetici calcolati in corrispondenza dei medesimi siti utilizzando il modello strutturale di riferimento di Fig. 7.5. Dall'alto verso il basso: componente trasversale, radiale e verticale del moto, ed il profilo con le velocità delle onde S.

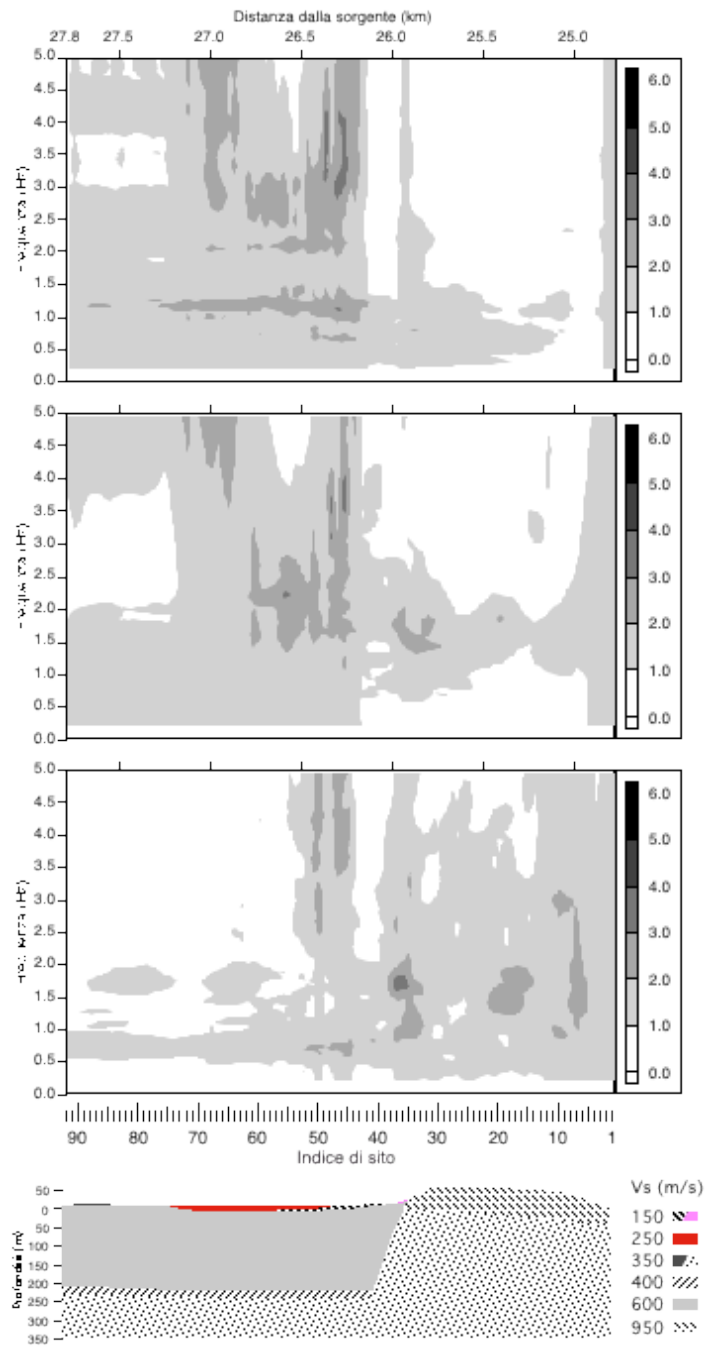


Fig. 7.8 - Come in Fig. 7.7 ma per il profilo 2.

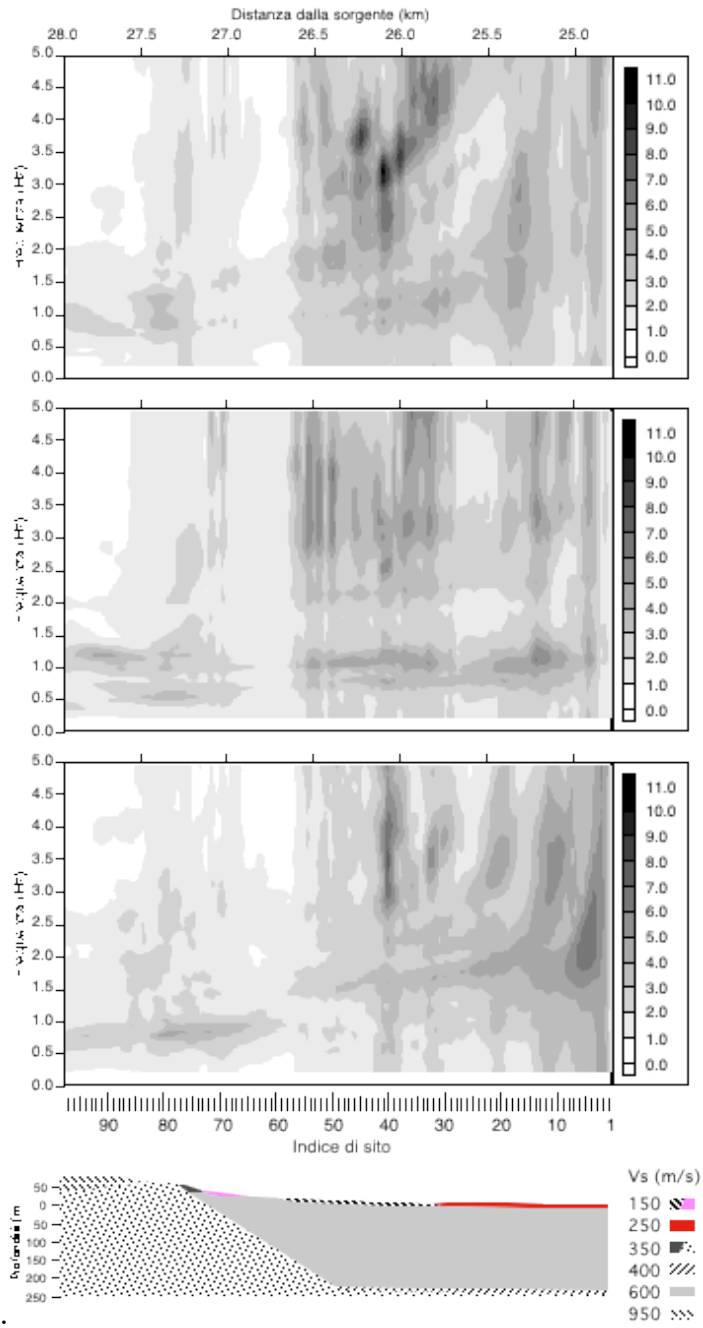


Fig. 7.9 - Come in Fig. 7.7 ma per il profilo 7

Le Figg. 7.7, 7.8 e 7.9 si riferiscono ai profili 1,2 e 7 rispettivamente. In ciascuna figura, dall'alto verso il basso, sono rappresentati il pattern di amplificazione per la componenti trasversale, radiale e verticale, e la sezione con le velocità delle onde S. Risulta pertanto agevole correlare le amplificazioni con le caratteristiche topografiche e litologiche dei modelli. Si può così notare come le amplificazioni più rilevanti si manifestano per frequenze superiori a 2 Hz in corrispondenza dei sedimenti superficiali più soffici, anche se di spessore ridotto, caratterizzati da  $V_s$  di 150 m/s. In tali siti, le amplificazioni sono maggiori per le componenti orizzontali rispetto alla componente verticale e, in generale, le amplificazioni massime sulla componente verticale si manifestano a frequenze più elevate rispetto alle componenti orizzontali. Gli affioramenti dei sedimenti carbonatici che caratterizzano l'inizio dei profili 1 e 2 (siti da 1 a 31) e la fine del profilo 7 (siti da 85 a 97) comportano invece amplificazioni meno accentuate. In corrispondenza di questi sedimenti, caratterizzati da elevate velocità, per frequenze maggiori di 1.5 Hz (componente trasversale) o 2 Hz (componente radiale) si può ottenere anche una deamplificazione, che nei profili 1 e 2 non trova riscontro nella componente verticale. Tale discrepanza può essere dovuta alla diversa risposta della componente verticale alle caratteristiche del profilo topografico. Le amplificazioni ottenute lungo il profilo 7 sono mediamente più elevate di quelle osservate nei profili 1 e 2. Una possibile spiegazione può essere ricercata nel fatto che il campo d'onda proveniente dalla sorgente non viene intercettato e riflesso dallo spesso strato di sedimenti carbonatici presente nei profili 1 e 2, e nella continuità dello strato sedimentario superficiale a bassa velocità (150-250 m/s) nel profilo 7.

### **7.3 Stima del potenziale distruttivo associato ai segnali sintetici**

Nonostante in letteratura sia stato proposto un gran numero di parametri, che misurano la capacità di danneggiamento da parte del moto del suolo causato da un evento sismico, la maggior parte di essi non sembra essere consistente con le osservazioni dei danni provocati alle strutture da un terremoto. Uno dei più promettenti parametri proposti per la definizione del potenziale distruttivo sembra essere l'Energia di Input ( $E_I$ ), ed i parametri ad essa associati, studiata da Uang e Bertero (1990); essa considera il comportamento effettivo di un sistema sollecitato da un'azione sismica e dipende dalle caratteristiche dinamiche sia del moto del terreno che della struttura stessa (Decanini e Mollaioli, 1998).

Il database di segnali sintetici costruito per l'area della Sicilia Orientale, che può essere facilmente esteso ad altri scenari, può essere utilizzato per l'input sismico in una fase successiva di analisi ingegneristica ad un basso rapporto costi/benefici. Per la stima del potenziale distruttivo associato ad alcuni dei segnali sintetici calcolati per i modelli semplificati (Romanelli e Vaccari, 1999) si è proceduto, in collaborazione con l'UR

UNIRM (Prof. L. Decanini) al calcolo di parametri ottenibili da: a) analisi diretta, b) integrazione nel dominio dei tempi e delle frequenze e c) calcolo della risposta strutturale, dei segnali considerati (Decanini et al., 1999). Lo stesso tipo di analisi, in termini di energia di input, è stato effettuato per alcuni dei segnali sintetici calcolati per il Profilo 2 (Fig. 7.2, siti 9, 36 e 57) di Augusta. Gli spettri di energia dei segnali sintetici sono stati confrontati con quelli relativi a due registrazioni dell'evento dell'Irpinia 1980 (stazione di Calitri, componenti NS e EW),  $M_S=6.8$ , ed a tre registrazioni dell'evento Loma Prieta 1989 (stazione di Ysidro, comp. N90; stazione di Gav. Tower, comp. N90; stazione di Uscs, comp. N0),  $M_S=7.1$ . I segnali (sintetici e registrati) sono relativi a distanze epicentrali molto simili, cioè nell'intervallo tra 15 e 25 km. I risultati sono mostrati in Fig. 7.10.

Dalla Fig. 7.10, si può notare che l'accordo, in termini di valore massimo dell'energia di input, è molto buono. Inoltre, l'involuppo relativo ai segnali sintetici riproduce piuttosto bene quello delle registrazioni, dimostrando che i segnali sintetici possono riprodurre la distribuzione di energia nell'insieme di periodi che va da 0.3 s a 2.5 s, che rappresenta l'intervallo più importante dal punto di vista ingegneristico.

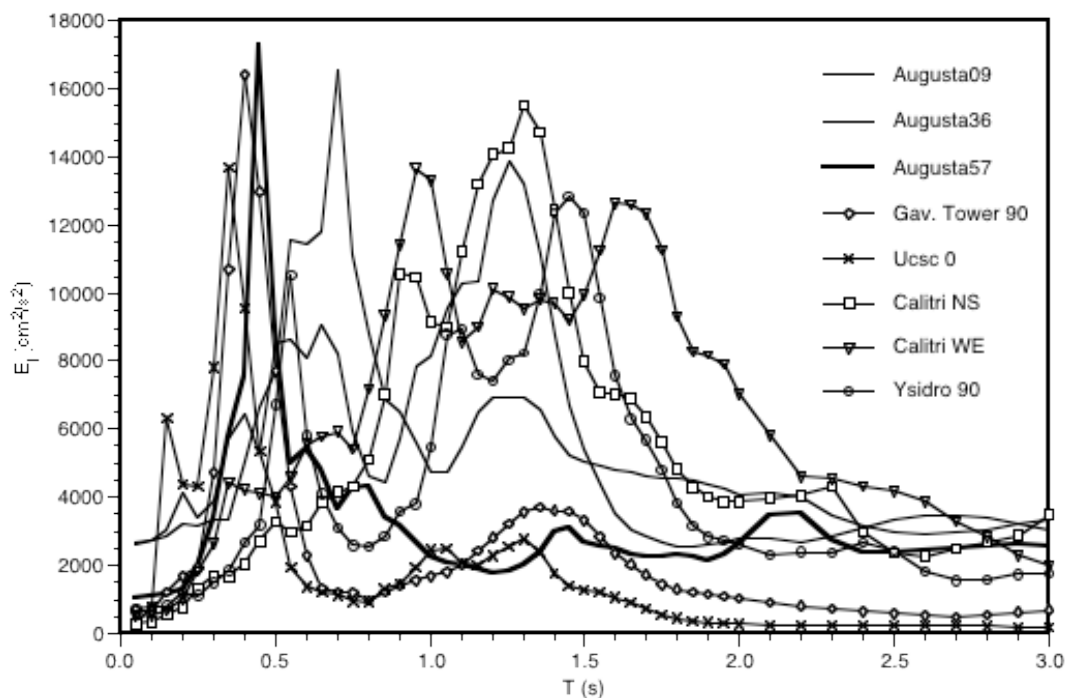


Fig. 7.10 - Spettro elastico  $E_1$  ( $cm^2/s^2$ ). Confronto tra i segnali sintetici (profilo 2 della Fig. 7.2, siti 9, 36 e 57, componenti radiali) e le registrazioni strong motion relative agli eventi Irpinia 1980 (stazione Calitri) e Loma Prieta 1989 (stazioni Gav. Tower, Uscs and Ysidro); la figura a colori è riportata a pag. 198.

## BIBLIOGRAFIA

- Costa, G., Panza, G.F., Suhadolc, P., Vaccari, F. (1993): Zoning of the Italian territory in terms of expected peak ground acceleration derived from complete synthetic seismograms, *J. Appl. Geophys.*, **30**, 149-160.
- Decanini, L., Mollaioli, F. (1998): Formulation of Elastic Earthquake Input Energy Spectra, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **27**, 1503-1522.
- Decanini, L., Mollaioli, F., Panza, G. F., Romanelli, F. (1999): The realistic definition of the seismic input: an application to the Catania area. In: Proc. Of Eres 1999 (G. Oliveto and C.A. Brebbia eds), Catania (Italy), 425-434, WIT Press, Boston.
- Fäh, D., Iodice, C., Suhadolc, P., Panza, G.F. (1993): A new method for the realistic estimation of seismic ground motion in megacities: the case of Rome, *Earthquake Spectra*, **9**, 643-668.
- Florsch, N., Fäh, D., Suhadolc, P., Panza, G.F. (1991): Complete Synthetic Seismograms for High-Frequency Multimode SH-Waves, *PAGEOPH*, **136**, 529-560.
- Panza, G. F. (1985): Synthetic Seismograms: the Rayleigh Waves Modal Summation, *J. Geophys.*, **58**, 125-145.
- Panza, G.F., Suhadolc, P. (1987): Complete strong motion synthetics. In: B. A. Bolt (ed.) *Seismic Strong Motion Synthetics, Computational Techniques 4*, Academic Press, Orlando, 153-204.
- Romanelli, F., Bing, Z., Vaccari, F., Panza, G.F. (1996): Analytical Computation of Reflection and Transmission Coupling Coefficients for Love Waves, *Geophys. J. Int.*, **125**, pp. 132-138.
- Romanelli, F., Vaccari, F. (1999): Site response estimation and ground motion spectral scenario in the Catania Area, *J. Seism.*, **3**, 311-326
- Uang, C. M., Bertero, V. V. (1990): Evaluation of seismic energy in structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **19**, 77-90.