

Consiglio Nazionale delle Ricerche

Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali

Elementi di microzonazione sismica dell'area di Predappio Bassa

Alberto Tento¹, Veronica Arrigoni¹, Giorgio Frassinetti², Luca Martelli²

¹ Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali - CNR

² Regione Emilia-Romagna

Milano, settembre 2002

Indice

1	Sintesi dei risultati	1
2	Inquadramento Geologico	6
3	Caratterizzazione geotecnica	8
4	Pericolosità Sismica	10
5	Acquisizione dei dati velocimetrici	11
6	Elaborazioni dei dati sismometrici	17
7	Discussione dei risultati	20
7.1	Sito PEP	22
7.2	Il sito GR2	23
7.3	Il sito SCM	25
7.4	Il sito SCA	26
8	Conclusioni	28
9	Riferimenti	31

1 Sintesi dei risultati

La Regione Emilia Romagna e la Provincia di Forlì - Cesena in collaborazione con il Consiglio Nazionale delle Ricerche di Milano, hanno promosso un programma per la messa a punto di linee guida per la elaborazione di microzonazioni sismiche da utilizzarsi nell'ambito della redazione dei Piani Territoriali di Coordinamento Provinciale.

La Legge Regionale 40/95 dell'Emilia Romagna, infatti, propone nuovi elementi che permettono di inserire nella pianificazione comunale obiettivi di prevenzione più sofisticati di quelli attualmente suggeriti dalla normativa italiana sfruttando i progressi, ottenuti negli ultimi 10 anni, nelle conoscenze relative al rischio sismico a scala regionale e locale.

L'attuazione di questo programma prevede l'individuazione di un'area test dove effettuare uno studio di dettaglio per sperimentare sia la metodologia di indagine sia le modalità per l'applicazione dei risultati ottenuti. L'esperienza ottenuta permetterà di derivare i criteri per l'estrapolazione dei risultati in altre situazioni con caratteristiche analoghe.

L'area del comune di Predappio (Forlì - Cesena) relativa alla località di Predappio Bassa è stata scelta come area test per lo sviluppo e la taratura della metodologia. Questa località infatti si è rivelata particolarmente rappresentativa sia da punto di vista geologico e litologico sia da quello urbanistico dei comuni dell'Appennino Romagnolo che si sviluppano per lo più nei fondovalle.

Lo studio di microzonazione sismica di Predappio ha due finalità:

- fornire mappe che individuino le aree con comportamento sismico differente in un formato direttamente utilizzabile in sede applicativa
- raccogliere i dati geologici, geotecnici e sismici necessari per individuare i criteri per l'estrapolazione dei risultati a situazioni analoghe

Le indagini e le elaborazioni effettuate che sono basate su:

- Dati geologici e geolitologici disponibili.
- Studio della pericolosità sismica già disponibile a scala regionale.
- Registrazioni sismologiche ottenute tramite l'installazione di una rete sismometrica che ha registrato numerosi eventi sismici, tra cui la sequenza di Faenza di aprile - maggio 2000. La rete ha monitorato 24 siti scelti opportunamente per campionare al meglio le varie tipologie litologiche presenti. In numerosi altri siti sono state effettuate registrazioni di rumore sismico.
- Indagini geofisiche effettuate in tre siti per la determinazione della velocità delle onde sismiche.

A causa delle caratteristiche dei depositi superficiali, non e' stato possibile effettuare il previsto prelievo di campioni indisturbati per eseguire in laboratorio le prove dinamiche geotecniche finalizzate alla caratterizzazione del comportamento non lineare dei litotipi indagati.

Le elaborazioni effettuate hanno portato alla suddivisione dell'area di Predappio bassa in 4 zone caratterizzate da un comportamento sismico differente (vedi fig. 1). Per ogni zona vengono proposti dei fattori di amplificazioni dello spettro di risposta della pericolosità sismica a scala regionale valutata per il Comune di Predappio. Nella figura 2 sono riportate sia le amplificazioni dello spettro di risposta ottenute nei siti stazione indagati sia i fattori di amplificazione spettrale proposti per ogni zona.

Le zone individuate hanno le seguenti caratteristiche:

ZONA 0 Questa zona coincide con l'affioramento della Formazione Marnoso-Arenacea e dei litotipi argillosi e marnosi pliocenici, entrambi caratterizzati da proprietà meccaniche buone. I siti che hanno monitorato la FMA sono stati, infatti, associati ai valori di scuotimento del suolo forniti dalle analisi di pericolosità'.

ZONA 1 E' l'area che ospita i depositi alluvionali inferiori e prossimi all'alveo fluviale con limitati spessori di sedimento (≤ 6 metri). I terrazzi b1 (interessati dall'attuale sedimentazione del fiume Rabbi) ed i terrazzi b2 mostrano entrambi un'amplificazione media dello spettro di risposta relativa all'intervallo $0.1 s \leq T_0 \leq 0.5 s$ (RSI) di circa 1.4.

ZONA 2 Le registrazioni acquisite hanno permesso di osservare amplificazioni (RSI) di circa 1.7 in corrispondenza terrazzi fluviali più' antichi (b3 e b4), generalmente più' alti e distanti dall'alveo del Rabbi, lungo i bordi della valle e con spessori dei depositi detritici maggiori rispetto a quelli zona precedente anche per l'apporto di detriti dai versanti.

ZONA 3 Questa si e' rivelata la zona più' pericolosa dell'area di Predappio Bassa, mostrando dei valori di amplificazione dello spettro della pericolosità' anche dell'ordine di 5 volte per alcuni periodi e valori di amplificazioni medie (RSI) di circa 3. A differenza delle altre zone, questa e' rappresentata da isole, ad estensione spesso non definita, poggianti su configurazioni geologiche appartenenti alle tre zone descritte precedentemente. Questo comportamento può', pertanto, essere ricondotto a caratteri geolitologici che ne rendono il comportamento particolarmente pericoloso. Rientrano in quest'area i casi di frane quiescenti riscontrati sul territorio comunale e di smottamenti, zone a caratteristiche meccaniche particolarmente scadenti ed aree che presentano spessori di sedimenti elevati rispetto alla media dei terrazzi fluviali.

Nella presentazione della carta di zonazione di Predappio Bassa, si cercato di operare un'estrapolazione dei risultati ottenuti anche alle aree comunali non direttamente interessate dal monitoraggio sismico. L'area ad alta amplificazione che stata denominata "Zona 3" non assume lo stesso significato delle altre; a differenza delle Zone 0, 1 e 2, quest'area e' composta unicamente dai siti monitorati ed, inoltre, i suoi limiti non sempre risultano ben definibili. Questo implica che nell'area di Predappio Bassa soprattutto in corrispondenza dei litotipi argilloso-marnosi di eta' pliocenica dove si incontrano situazioni geologiche particolarmente instabili o alterate (frane, zone calanchive) si possono riscontrare amplificazioni analoghe. La "Zona 3" non e' quindi stata mappata completamente ma puo' essere estrapolata a tutte le zone in frana cartografate sulla carta geologica e a tutte le zone interessate da dissesto.

Bisogna sottolineare che le analisi e i risultati ottenuti sono basati su registrazioni di eventi di moto debole. Tali risultati implicano un comportamento lineare dei vari litotipi. L'influenza della non linearita' dei terreni sulle amplificazioni spettrali e' stata valutata qualitativamente con simulazioni numeriche utilizzando dati relativi a situazioni analoghe non avendo potuto effettuare, come gia'accennato, prove specifiche per i litotipi presenti a Predappio. Dai risultati ottenuti si puo' dedurre che in questo caso, la non linearita' dei terreni puo' comportare una riduzione dei valori di amplificazione spettrale per periodi inferiori a 0.2 s e un aumento per periodi superiori. Tuttavia si puo' concludere che gli effetti della non linearita' dei terreni non influenzino la suddivisione in zone proposta per l'area investigata e che le corrispondenti amplificazioni dello spettro di riposta, valutate utilizzando il moto sismico effettivamente registrato, mantengano la loro validita'.

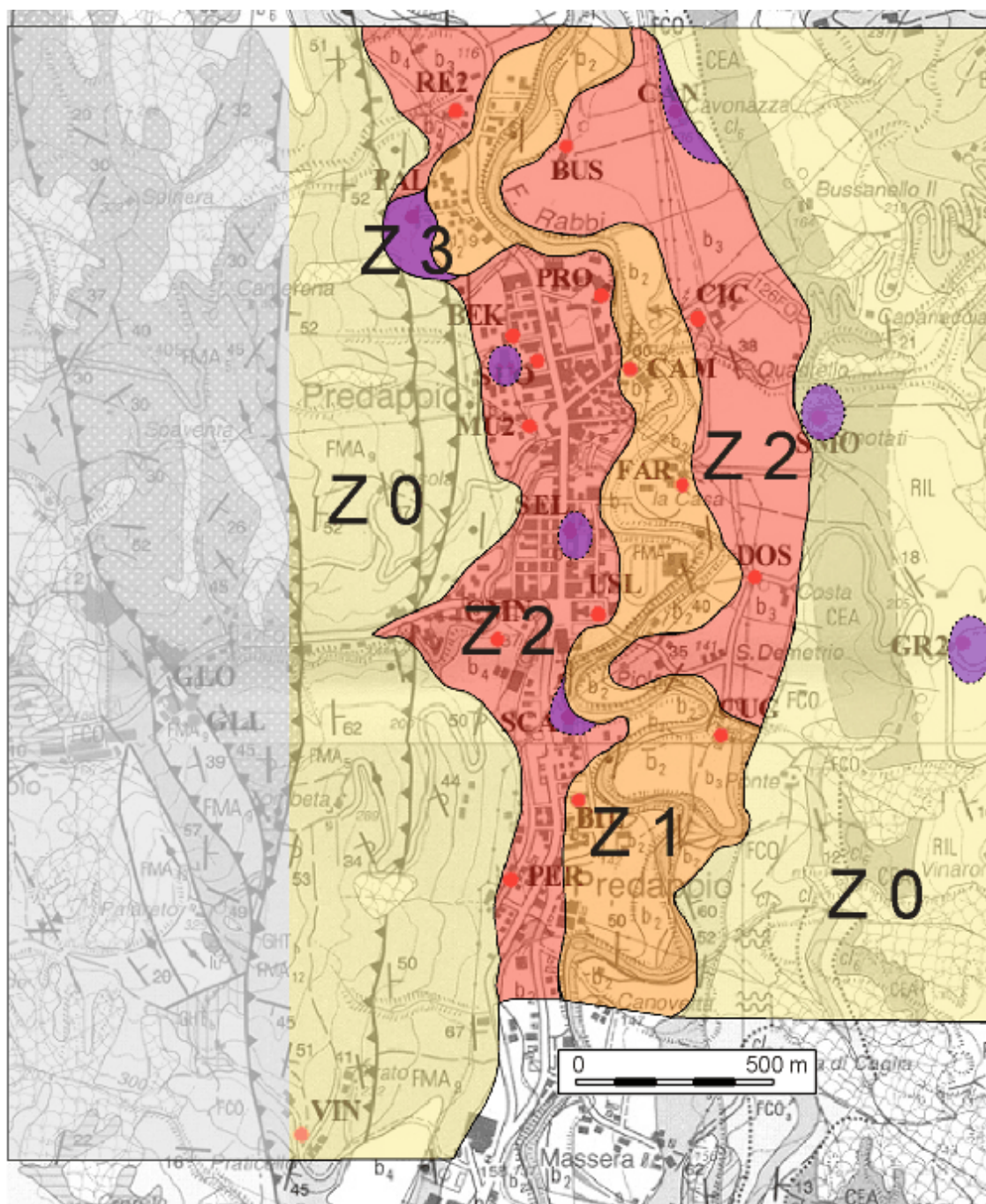


Figura 1: Microzonazione sismica di Predappio Bassa

SA_zona / SA_pericolosita'

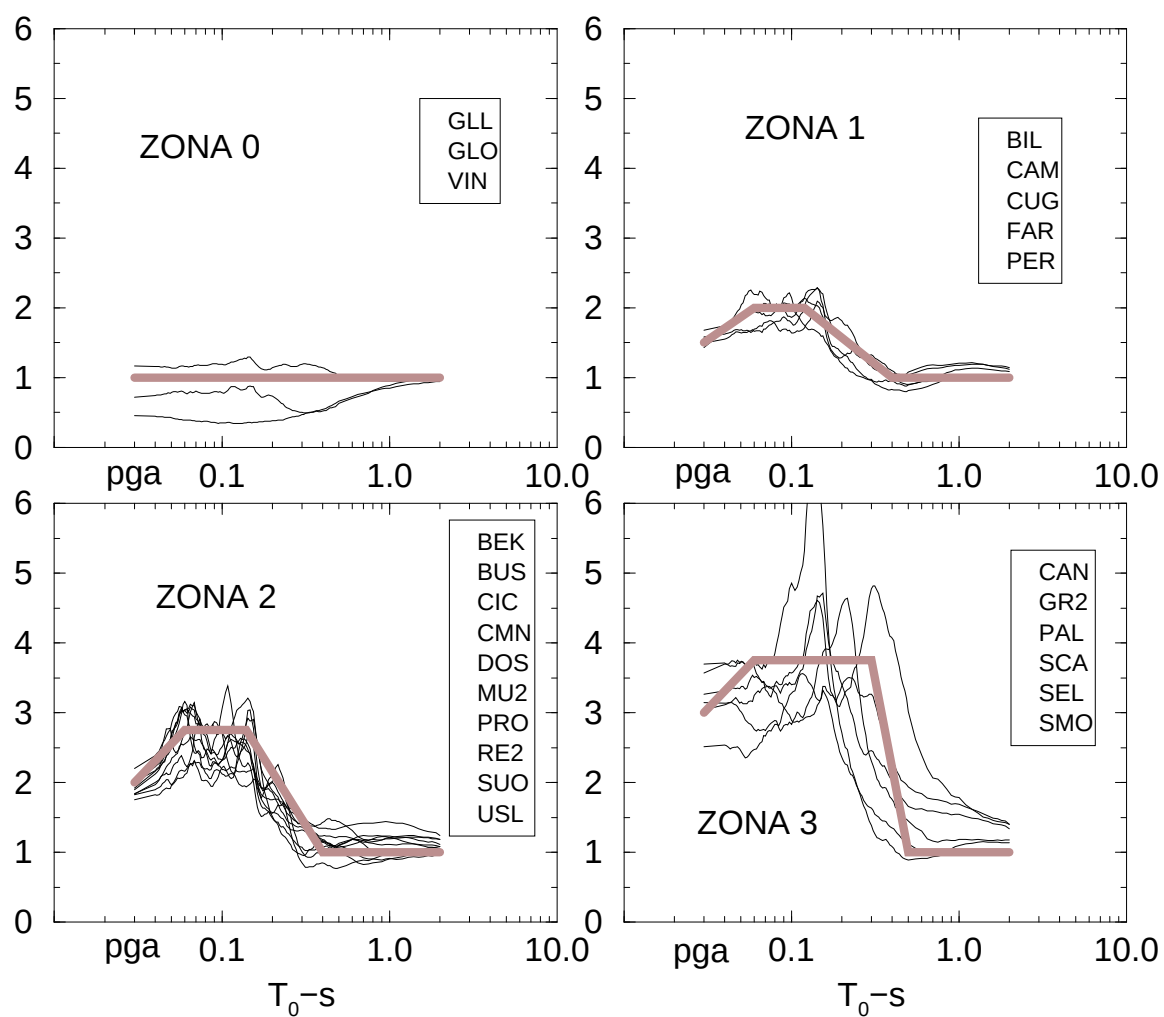


Figura 2: Rapporto fra gli spettri di risposta valutati nei vari siti stazione e quello della pericolosita' sismica associato a un generico sito posto sulla Formazione Marnosa Arenacea. In neretto le amplificazioni degli spettri di risposta proposte per le varie zone.

2 Inquadramento Geologico

Il quadro geologico del territorio di Predappio e' rappresentato da rocce sedimentarie di eta' mio-pliocenica e tardo-pleistocenica-olocenica. Le prime sono riferibili alla *successione romagnola* che qui risulta costituita, a partire dalla formazione piu' antica, da:

- **Formazione Marnoso-Arenacea, FMA** (Langhiano-Messiniano inf.)
Successione torbiditica pelitico-arenacea ed arenaceo-pelitica di piana bacinale con subordinate emipelagiti marnose.
- **Formazione di Tetto, GHT** (Messiniano superiore)
Brecce di dolomie e calcari dolomitici grigi e gessi micro e mesocristallino di colore grigio-rosato riferibili alla Formazione Gessoso-Solfifera.
- **Formazione a Colombacci, FCO** (Messiniano superiore)
Argille e argille-marnose in strati medio-fini con intercalazioni di siltiti ed arenarie di colore grigio e grigio-verdastro e lamine calcareo-marnose.
- **Marne di Cella, CEA** (Pliocene inferiore basale, zona a *Sphaerodinellopsis*)
Marne e marne argillose chiare con abbondanti fossili a stratificazione difficilmente riconoscibile.
- **Argille e marne di Riolo Terme, RIL** (Pliocene inferiore, zona a *G. margaritae* - Pleistocene inferiore, zona a *H. Balthica*)
Argille, argille marnose e marne argillose bioturbate, con abbondanti microfossili, in strati di medio spessore con locali intercalazioni di strati arenacei, lamine siltose.
- **Arenarie di Borello, BOE** (Pliocene inferiore, zona a *G. Puncticulata*)
Prevalenti arenarie alternate a marne argillose, organizzate in strati medi e spessi con locali accumuli di bioclasti.
- **Spungone, SPG** (Pliocene medio)
Calcari organogeni, calcareniti ed arenarie bioclastiche variamente alternati lateralmente e verticalmente.

I sedimenti quaternari, che ricoprono le unita' geologiche del substrato, sono per lo piu' rappresentati da depositi alluvionali terrazzati (b2-b4), da detriti di versante s.l. (a3) e da corpi di frana in evoluzione (a1) e quiescenti (a2).

Gli attuali corsi d'acqua romagnoli, tra cui il Rabbi, sono in fase erosiva: molti di questi hanno eroso i propri depositi fino ad incidere il substrato.

Tuttavia, localmente, si riconoscono anche alluvioni non terrazzate (b1), attualmente in evoluzione in alveo, che risentono delle normali variazioni di portata stagionali.

Per quanto riguarda i corpi franosi, a Predappio, come in tutto l'Appennino Romagnolo, non sono molto frequenti, tuttavia possono interessare aree estese, con accumuli spessi anche decine di metri.

I detriti di versante s.l. sono dati da accumuli detritici eterometrici dovuti all'alterazione in posto e a limitati trasporti per l'azione combinata della gravità e del ruscellamento. La presenza diffusa di terreni argilloso-marnosi, in particolare sulla sponda destra del Rabbi, produce frequenti forme calanchive.

La figura 6 mostra la carta geologica del comune di Predappio e dintorni (Regione Emilia Romagna e Università di Bologna, 1991). La figura 7 illustra, invece, una sezione E-W che taglia il comune di Predappio al centro ed un ingrandimento interpretativo della disposizione dei terrazzi alluvionali attorno all'alveo del fiume Rabbi.

3 Caratterizzazione geotecnica

L'abitato di Predappio bassa sorge quasi esclusivamente sui depositi alluvionali terrazzati che si sono sviluppati lungo tutto il fondovalle, sia sulla destra che sulla sinistra idrografica. Fanno eccezione due modeste fasce urbanizzate che si sono sviluppate sui versanti marnoso-arenacei occidentali e costruzioni isolate localizzate sulle formazioni argilloso-marnose plioceniche.

I terrazzi alluvionali sono prevalentemente composti da ghiaie, sabbie e limi e raggiungono spessori dell'ordine di pochi metri. Sono sedimenti ben assestati e addensati ($\phi = 30^\circ - 35^\circ$).

I terrazzamenti alluvionali piú alti, e quindi piú antichi, hanno uno spessore variabile da 5 a 10 m e, specie quelli a quote topografiche maggiori, sono spesso isolati tra loro e rispetto al fondovalle da incisioni del rilievo; gli spessori maggiori si trovano in corrispondenza dei terrazzi piú distanti dall'alveo del fiume e maggiormente estesi. Di questi terrazzi alluvionali antichi, quelli interessati dall'abitato sono costituiti da ghiaie sabbiose a cui si sovrappongono terreni argilloso-limosi alterati in superficie.

La potenza del sedimento piú fine, solitamente pedogenizzato in superficie, é dell'ordine di 3-4 metri; solo localmente raggiunge potenze maggiori, fino a 6 metri. Le ghiaie sabbiose sottostanti sono di norma ben addensate ed assestate ($\phi = 30^\circ - 35^\circ$). La coltre coesiva, generalmente preconsolidata per essiccamento in prossimitá della superficie, é compatta ($q_u = 1.0 - 2.0 \text{ kg/cm}^2$) fino ad 1.5 metri di profonditá; piú in profonditá tendono ad essere maggiormente compatti.

Nonostante la permeabilitá di queste alluvioni sia buona ($k > 10^{-4} \text{ cm/s}$), le acque sotterranee sono molto scarse e limitate alla parte piú profonda dei depositi, soprattutto a causa dell'effetto drenante esercitato dal Rabbi, il cui alveo é arrivato ad incidere il substrato lapideo. Nel terrazzamento di fondovalle, ghiaioso e sabbioso in tutto il suo spessore, il livello della falda é connesso con l'andamento del livello fluviale ed é normalmente piuttosto alto.

I livelli di terrazzi poggiano in parte su unitá marnoso-arenacee ed in parte su rocce argilloso-limose appartenenti alla Formazione a Colombacci (*FCO*) del Messiniano, affioranti sulla destra idrografica del fiume Rabbi. La Formazione Marnoso-Arenacea (*FMA*), che a Predappio tende a presentare una composizione essenzialmente arenacea, presenta parametri meccanici in genere elevati. La facies marnosa, che rappresenta il costituente meno resistente della formazione, mostra, se inalterata, resistenze alla compressione semplice (q_u) maggiori di $4.5-6.0 \text{ kg/cm}^2$. La roccia presenta, però, in tutta la sua estensione una coltre di alterazione di varia potenza che, localmente, puó raggiungere anche i 4 metri. Queste coltri sono solitamente argilloso-sabbiose e presentano immersi dei frammenti arenacei degradati derivanti dalla roccia originaria. La consistenza di queste alterazioni é da mediamente compatta ($q_u = 0.5-1.0 \text{ kg/cm}^2$) a compatta ($q_u = 1.0-2.0 \text{ kg/cm}^2$).

La Formazione Marnoso-Arenacea, permeabile per fratturazione ma con valori

molto bassi ($k < 10^{-6}$ m/s), non contiene acque sotterranee nella zona di pertinenza dell'abitato comunale.

Le argille e marne messiniano-plioceniche, che affiorano sul versante destro del fiume Rabbi, non affiorano nelle aree interessate dall'urbanizzazione ma sono presenti sotto le alluvioni nelle immediate vicinanze. In strato si presentano come litotipi duri ($q_u=4.0$ kg/cm²) e sovraconsolidate. Alterate ed imbevute, possono arrivare ad assumere una consistenza molle, dato il grande potere assorbente e rigonfiante dei loro costituenti. Anche questi sedimenti sono poveri di acque sotterranee. Come per la Formazione Marnoso-Arenacea, fatta eccezione per i suoli e le coltri di alterazione superficiali dove si possono trovare irrisorie falde non confinate poco profonde e discontinue, queste masse litologiche, se inalterate, risultano praticamente impermeabili o, al massimo, dotate di acquiferi locali generati per intensa fratturazione della roccia.

4 Pericolosità Sismica

L'analisi di pericolosità sismica utilizzata in questa sede si riferisce allo studio eseguito da Marcellini et al., 2000, relativamente alla provincia di Forlì-Cesena, nell'ambito di un contratto C.N.R.-Regione Emilia-Romagna.

In tale lavoro lo scuotimento sismico atteso è rappresentato in termini di ordinate spettrali dello spettro di risposta considerando un periodo di ritorno di 475 anni. Lo spettro di risposta in accelerazione, 5 %, a probabilità uniforme corrispondente alla località di Predappio è riportato in fig. 8.

È importante sottolineare che tale spettro è implicitamente calcolato per un generico sito superficiale poggiante su un litotipo caratteristiche meccaniche medie e che non presenta rilevanti effetti di amplificazione locale. Gli effetti di sito saranno quindi valutati rispetto a questo spettro che viene considerato come riferimento dopo averlo *assegnato* a un particolare litotipo o situazione geologica specifica dell'area indagata.

Per le analisi descritte in seguito vi è la necessità di disporre di storie temporali da utilizzarsi come input sismico, dalla banca dati accelerometrica italiana sono stati selezionati, e opportunamente scalati, una decina di accelerogrammi che hanno lo spettro di risposta compatibile con quello definito dalle analisi di pericolosità sismica.

La selezione effettuata implica che la media degli spettri di risposta di questi accelerogrammi abbia una forma simile allo spettro di risposta a probabilità uniforme.

5 Acquisizione dei dati velocimetrici

Nel presente lavoro la valutazione degli effetti di sito in Predappio e' basata principalmente sull'elaborazione delle registrazioni velocimetriche di eventi sismici e di rumore sismico. A tale scopo e' stata installata nell'area di indagine una rete sismometrica che, nel corso del suo funzionamento, ha monitorato 24 siti scelti scelti opportunamente per campionare al meglio le varie tipologie litologiche presenti e sono state condotte campagne di registrazione di rumore sismico per migliorare la copertura areale ottenuta. L'obiettivo consiste nella valutazione quantitativa delle differenze dello scuotimento sismico registrato nelle varie stazioni e causato dalle differenti condizioni geolitologiche locali.

Vi e' quindi la necessita' di individuare fra le stazioni installate almeno una che si suppone sia priva di effetti di sito e dove viene registrato il segnale sismico che dovrebbe quindi corrispondere al moto al bedrock di ogni sito indagato. In realta' questa situazione puo' essere problematica da ottenere in pratica, infatti le alterazioni superficiali delle formazioni geologiche e gli effetti dovuti alla topografia possono causare amplificazioni o deamplificazioni delle onde sismiche per particolari frequenze, anche per stazioni installate su formazioni particolarmente competenti.

Le scelte operate per la mini rete di Predappio sono illustrate in seguito.

Lo studio di dettaglio del comune ha richiesto l'installazione di una rete sismometrica, che ha operato per 11 mesi sull'intero territorio comunale, attraverso la quale e' stato possibile acquisire registrazioni di eventi sismici, molti dei quali relativi alla crisi sismica di Faenza di maggio-giugno 2000, in corrispondenza delle differenti situazioni geologiche riscontrate in tutto l'abitato.

Una particolare attenzione e' stata posta nella ricerca del sito di riferimento che e' stato individuato all'interno della Galleria Caproni dove e' stato possibile posizionare il sismometro direttamente sulla Formazione Marnoso-Arenacea a minor grado di alterazione (GLL). Questa scelta e' stata ritenuta il miglior compromesso ottenibile in zona rispetto a quanto richiesto ad un sito riferimento. Infatti le registrazioni all'interno di un rilievo, come quelle ottenute in pozzo, se da un lato registrano il campo d'onda incidente non modificato dalla parte superficiale e alterata della struttura geologica, dall'altro sono perturbate dal campo d'onda riflesso verso l'interno dalla superficie libera. La situazione ottimale, ma difficilmente riscontrabile, sarebbe rappresentata dall'affioramento superficiale di roccia competente in zona pianeggiante.

Tuttavia il sito GLL presenta i seguenti vantaggi:

- la possibilità di installare la stazione di registrazione all'interno di una galleria ha garantito la quasi totale assenza di disturbi di origine antropica, favorendo registrazioni di alta qualità;
- come già ricordato, essendo localizzata all'interno di un rilievo, la stazione

stata posizionata in corrispondenza del litotipo marnoso-arenaceo a minor grado di alterazione possibile rintracciabile in zona;

- la sua vicinanza rispetto all'abitato (750 m in linea d'aria dal Comune) e quindi alle altre stazioni, ha soddisfatto un ulteriore requisito necessario: la differenza fra le registrazioni sismiche e' interpretabile esclusivamente come l'effetto sul moto sismico delle differenti condizioni geologiche locali se il percorso del campo d'onda dalla sorgente alle varie stazioni e' praticamente lo stesso per distanze epicentrali superiori a circa 15 Km.

Inoltre, é stata attivata per la maggior parte del tempo di operativita' della rete, una stazione sugli affioramenti della Marnoso-Arenacea a SSW dell'abitato (VIN). Questa stazione e l'installazione per un breve periodo di una stazione all'esterno della galleria Caproni (GLO) hanno permesso un utile confronto e valutazione dei dati raccolti relativi al problema del riferimento.

La rete, attiva dal 13 Aprile 2000 al 14 Marzo 2001, era costituita mediamente da 5 sismometri e relative stazioni di registrazione, solo periodicamente da 6 o 7, che hanno permesso di monitorare 24 siti attraverso 5 campagne di acquisizione dati distinte.

Come gia' accennato GLL e in parte VIN hanno operato per l'intero periodo di funzionamento della rete mentre le altre stazioni sono state periodicamente spostate sul territorio comunale con l'intento sia di ottenere una copertura areale il più omogenea possibile che di approfondire le indagini in zone particolarmente complesse.

Le campagne di acquisizione hanno monitorato i seguenti siti:

- **dal 14 Aprile 2000 all' 8 Maggio 2000:**
Cug, Far, Gr2, Glo, Gll, Suo, Vin
In fig. 10 sono riportati i sismogrammi di un evento registrato contemporaneamente da tutte le stazioni installate.
- **dal 9 Maggio 2000 al 12 Maggio 2000:**
Bus, Cam, Can, Cic, Gll, Vin
vedi fig. 11.
- **dal 12 Maggio 2000 al 18 Maggio 2000:**
Gll, Pal, Re2, Sel, Usl, Vin
vedi fig. 12.
- **dal 18 Maggio 2000 al 24 Maggio 2000:**
Bil, Gll, Per, Pro, Sca, Vin
vedi fig. 13.
- **dal 25 Ottobre 2000 al 2 febbraio 2001:**
Bek, Cmn, Dos, Gll, Mu2, Smo
vedi figure 14, 15 e 16.

Dalla figura 17, che illustra la localizzazione globale delle stazioni sull'intero territorio comunale, é rilevabile che la maggior parte di esse é stata installata in corrispondenza dei depositi alluvionali del fiume Rabbi. Oltre ai 3 siti localizzati sulla Formazione Marnoso-Arenacea, solamente due hanno acquisito dati in corrispondenza delle argille e marne di età pliocenica.

La scelta dei siti da indagare ha anche privilegiato le aree in corrispondenza del centro abitato e le zone di prossima urbanizzazione previste dal piano regolatore: alluvioni terrazzate intemedie e di fondovalle a debole acclività superficiale.

In particolare la disposizione logistica delle stazioni sismometriche é stata:

1. GLL (13/04/2000-14/03/2001) STAZIONE DI RIFERIMENTO
La stazione poggia sulla Formazione Marnoso-Arenacea non alterata (o molto debolmente), all'interno di una galleria con andamento NW-SE sulla strada per Predappio Alta. Il geofono é stato cementato al pavimento della galleria (figura 9).
2. VIN (11/02/2000-25/10/2000)
La stazione é stata installata sulla Formazione Marnoso-Arenacea alterata in località Praticello, a SSW di Predappio. Il geofono é stato interrato.
3. FAR (10/02/2000-09/05/2000)
La stazione é stata installata ad una ventina di metri da un'abitazione di due piani e poggia su un terrazzo alluvionale b3 del Rabbi (cfr. sondaggio poco a nord-est). Geofono interrato.
4. GR2 (10/02/2000-08/05/2000)
Stazione attivata vicino ad un edificio a due piani in corrispondenza delle Argille e Marne di Riolo Terme. Geofono interrato.
5. SUO (13/04/2000-09/05/2000)
Stazione attivata all'interno del cortile della scuola materna sul lato Sud dell'edificio di tre piani. Il geofono, interrato, poggia sui terrazzi alluvionali del Rabbi.
6. CUG (14/04/2000-09/05/2000)
Localizzato ad Est dell'abitato di Predappio, il sito si trova in corrispondenza dei terrazzi alluvionali, presumibilmente di ridotto spessore. Geofono interrato.
7. GLO (08/05/2000-08/05/2000)
É stata attivata all'esterno della galleria Caproni in cui é stata installata GLL. Poggia sulla Formazione Marnoso-Arenacea. Geofono interrato.
8. BUS (09/05/2000-12/05/2000)
Stazione attivata a Nord del centro di Predappio in corrispondenza dei terrazzi alluvionali. Geofono interrato.

9. CAM (09/05/2000-12/05/2000)
Stazione installata nelle vicinanze del fiume Rabbi su depositi alluvionali. Geofono interrato.
10. CAN (09/05/2000-12/05/2000)
Attivato in località Cavonazza, a Nord dell'abitato, al confine tra i terrazzi alluvionali e le argille marnose della Formazione a Colombacci. Geofono interrato.
11. CIC (08/05/2000-12/05/2000)
Stazione installata sui terrazzi alluvionali del Rabbi in zona Bussanello. Geofono interrato.
12. USL (12/05/2000-17/05/2000)
Installata nel cortile della U.S.L. di Predappio, in corrispondenza dei depositi alluvionali. Il geofono é stato interrato ad un paio di metri dalla parete sud dell'edificio.
13. SEL (12/05/2000-18/05/2000)
Localizzata nel cortile della scuola elementare a circa 2 metri dall'edificio al di sopra dei terrazzi alluvionali. Geofono interrato.
14. PAL (12/05/2000-18/05/2000)
La stazione é stata installata a NNW del centro di Predappio in corrispondenza di una probabile frana quiescente. Geofono interrato.
15. RE2 (12/05/2000-18/05/2000)
Situata a Nord dell'abitato al di sopra dei terrazzi alluvionali. Geofono interrato.
16. PER (17/05/2000-24/05/2000)
Stazione installata in zona di confine tra i terrazzi alluvionali del Rabbi e la Formazione Marnoso-Arenacea ad Ovest. Geofono interrato.
17. BIL (18/05/2000-25/05/2000)
Sito attivato nella zona Sud dell'abitato in corrispondenza dei terrazzi alluvionali del Rabbi. Geofono interrato.
18. SCA (18/05/2000-24/05/2000)
Stazione installata presso l'Istituto San Camillo, ad una decina di metri dalla serie di terrazzi fluviali che sviluppano su quest'ansa del fiume, a ridosso di una scarpata di una quindicina di metri. Geofono interrato.
19. PRO (18/05/2000-25/05/2000)
Posizionata a Nord dell'abitato in corrispondenza dei depositi alluvionali. Geofono interrato.

20. MU2 (25/10/2000-14/03/2001)
Stazione installata all'interno della casa natale di Benito Mussolini, in corrispondenza dei terrazzi alluvionali piú antichi. Il geofono é stato appoggiato sul pavimento a piano terra.
21. BEK (25/10/2000-13/03/2001)
Sito attivato sui depositi alluvionali in zona Nord dell'abitato. Geofono interrato.
22. DOS (26/10/2000-13/03/2001)
Stazione installata in un'area di recente urbanizzazione ad Est del corso del fiume Rabbi, in corrispondenza dei terrazzi alluvionali a ridosso delle Marne di Cella. Geofono interrato.
23. SMO (26/10/2000-13/03/2001)
Attivata in localitá Smotati, ad Est dell'abitato sulle Marne plioceniche di Cella. Geofono interrato.
24. CMN (25/10/2000-13/03/2001)
Stazione installata nel parco comunale di Predappio, in corrispondenza dei depositi alluvionali. Geofono interrato.

Alle stazioni elencate si aggiunge la seguente installata per un breve periodo di prova precedente all'attivazione della rete. Le sue registrazioni non sono quindi in coincidenza con quelle relative agli altri siti.

- SCM (luglio-agosto 1999) Stazione installata nel giardino a est dell'edificio della scuola media, nell'angolo tra il lato lungo e il lato corto dell'edificio, su detriti di versante e terrazzi alluvionali (cfr sondaggio). Geofono interrato.

La strumentazione utilizzata é omogenea e consiste in sensori velocimetrici Mark P. L4c, con frequenza propria 1 Hz, e acquisitori digitali Lennartz Mars88FD. Il funzionamento delle stazioni é a trigger, ovvero la stazione immagazzina i dati se il segnale proveniente dal sensore supera alcuni parametri prefissati. In questo modo la registrazione é attivata in presenza di eventi sismici ma, purtroppo, anche in presenza di disturbi particolarmente energetici. Una successiva selezione individua gli eventi registrati simultaneamente nelle varie stazioni. La sincronizzazione dell'orologio interno della stazione con il tempo assoluto DCF garantisce la corrispondenza fra le registrazioni delle varie stazioni.

L'installazione di questa rete sismometrica ha permesso l'acquisizione di un numero relativamente alto di eventi sismici medio-deboli provenienti soprattutto dalla sequenza di scosse sismiche di Forl -Faenza, avvenuta nel maggio-giugno 2000, dalla quale sono state ottenute molte registrazioni di buona qualita' (in termini di rapporto segnale/disturbo) e in tempi relativamente brevi. La fig. 18 riporta la magnitudo locale degli eventi registrati dalla rete in funzione della

distanza ipocentrale valutata rispetto al centro di Predappio. La maggior parte degli eventi sono localizzati a $25 \div 35 Km$ da Predappio e i valori di magnitudo locale, nonostante varino tra 1.5 e 4.5, si concentrano nell'intervallo compreso tra 2 e 3.5.

Nella figura 20 sono riportati il numero di eventi registrati da ogni stazione per i quali si ha il corrispondente evento registrato a GLL. Questi eventi sono un sottoinsieme di quelli effettivamente registrati poiché si sono utilizzate per le analisi descritte in seguito solo le registrazioni che hanno un buon rapporto segnale disturbo. Il numero totale delle registrazioni utili per le successive elaborazione è 1168 che corrispondono a 846 coppie di registrazioni *stazione* - GLL.

Sia nei siti stazione che in altri siti appositamente scelti per avere migliore copertura areale delle informazioni oppure per approfondire la conoscenza di alcune situazioni specifiche, sono state effettuate misure di rumore ambientale. I siti monitorati sono riportati in fig.17. In questo caso le registrazioni hanno una durata di circa 10 minuti continuativi.

6 Elaborazioni dei dati sismometrici

L'elaborazione dei dati sismometrici e' stata effettuata utilizzando alcune tecniche che vengono qui di seguito descritte.

La prima tecnica utilizzata e' il metodo dei rapporti spettrale che attualmente e' largamente impiegato poiche' e' ritenuto capace di fornire stime affidabili e stabili dell'amplificazione sismica. I rapporti spettrali sono stati calcolati utilizzando le registrazioni degli eventi ottenute simultaneamente dalla stazione considerata e dalla stazione di riferimento. Gli spettri delle coppie di registrazioni sono stati calcolati su finestre temporali di 8 secondi a partire dall'arrivo della fase S. I rapporti spettrali cosi' ottenuti per gli eventi a disposizione, sono quindi stati mediati per ricavare la stima della amplificazione sismica spettrale.

In fig. 19 e' possibile osservare l'influenza del numero di registrazioni utilizzate sulla media dei rapporti spettrali. La stazione VIN che ha un numero elevato (197) di registrazioni in coincidenza con GLL e' stata scelta per questo test. Nella figura il rapporto spettrale ottenuto con tutte le registrazioni e' messo a confronto con quelli calcolati con 5 eventi (39, riportati nel pannello superiore) e con 10 eventi (19, riportati pannello inferiore). Si puo' osservare che 10 eventi sono sufficienti per caratterizzare la risposta di sito, con un numero inferiore i risultati sono piu' instabili e vanno quindi considerati con cautela. Dalla fig. 20 si puo' osservare che nel data base a disposizione i 3/4 delle stazioni hanno un numero di eventi registrati superiore a 10.

Nelle figure 21 e 22 sono riportati i rapporti spettrali, relativi a GLL, delle componenti orizzontali delle varie stazioni. Si puo' osservare che, in generale, non vi e' una differenza significativa fra le amplificazioni delle due componenti orizzontali, nel proseguo per ogni stazione sara' quindi utilizzata la media dei rapporti spettrali delle componenti orizzontali.

La particolare configurazione di GLL, pur garantendo una buona qualita' dei risultati delle elaborazioni, rende poco agevole l'interpretazione *geofisica* dei rapporti spettrali inoltre per ottenere una valutazione degli effetti di sito piu' direttamente utilizzabile in sede applicativa si e' ritenuto opportuno caratterizzare ogni sito stazione in termini di amplificazione dello spettro di risposta in accelerazione con smorzamento 5%, (RSA).

Bisogna osservare che RSA e' l'amplificazione spettrale riferita allo spettro di riferimento ottenuto dalle analisi di pericolosita' sismica, quest'ultimo deve essere associato a una situazione di superficie priva, per quanto possibile, di effetti di sito.

Lo scuotimento derivato dalla pericolosita' viene quindi associato agli affioramenti della Marnoso-Arenacea che e' stata appositamente campionata con le stazioni GLO e VIN. E' stato quindi definito un generico sito posto sulla Formazione Marnosa Arenacea, chiamato RIF, il cui rapporto spettrale e' ottenuto come media pesata fra i rapporti spettrali lisciati di GLO e VIN (vedi fig. 23). Per ottenere la stima di RSA si e' utilizzata la seguente procedura. I rapporti spettrali de-

scritti precedentemente, figure 21 e 22, possono essere considerati come funzioni di trasferimento empiriche fra il moto sismico a GLL e quello alle varie stazioni di registrazione. Seguendo la procedura approssimata descritta in Tento et al., 1998, gli accelerogrammi compatibili con lo spettro di risposta della pericolosità (vedi capitolo *pericolosità sismica*) sono stati riportati al livello di GLL utilizzando la funzione relativa a RIF riportata in fig. 23. Successivamente, utilizzando i rapporti spettrali delle figure 21 e 22, si sono calcolati gli accelerogrammi, e quindi i loro spettri di risposta, relativi ai vari siti stazioni. Gli spettri di risposta così ottenuti sono stati divisi per lo spettro di risposta della pericolosità ottenendo la stima di RSA.

Si sono utilizzate dieci registrazioni accelerometriche per poter avere, tramite la media dei risultati ottenuti per le singole registrazioni, un risultato finale più liscio.

I risultati, riportati nelle figure 25, 26 e 27 consistono quindi nei rapporti degli spettri di risposta calcolati nei vari siti indagati rispetto a quello ottenuto dall'analisi della pericolosità sismica che è stato associato a un generico sito posto sull'affioramento della Marnoso-Arenacea.

Analogamente sono stati calcolati anche i valori di RSI, ovvero il rapporto dell'intensità spettrale. Quest'ultima è definita come la media dei valori dello spettro di risposta di velocità all'interno di un intervallo stabilito. In questo lavoro si è utilizzato l'intervallo : $0.1 s \leq T_0 \leq 0.5 s$ come proposto in Pergalani et. al, 1999, poiché è ritenuto il più idoneo per rappresentare globalmente le strutture presenti nell'area. I valori di RSI sono riportati nella tabella 1.

GLL	0.42	BIL	1.18	SUO	1.56	CAN	3.04
GLO	0.64	CUG	1.32	MU2	1.56	GR2	3.01
RIF	1.00	FAR	1.40	PRO	1.6	PAL	3.07
VIN	1.18	CMN	1.49	USL	1.64	SCA	2.67
		PER	1.50	BEK	1.71	SEL	2.22
		CAM	1.52	RE2	1.75	SMO	4.00
				CIC	1.79		
				DOS	1.80		
				BUS	1.88		

Tabella 1: Valori di RSI (vedi testo)

Un'altra elaborazione effettuata consiste nel calcolo delle *funzioni ricevitore* ovvero del rapporto spettrale fra le componenti orizzontali e quella verticale di ogni singola stazione. Analogamente ai rapporti spettrali, si è considerata una finestra temporale di 8 secondi a partire dall'arrivo delle onde S. Le funzioni ricevitore forniscono informazioni qualitative sull'amplificazione sismica, identificando soprattutto gli intervalli di frequenza dove si verificano le amplificazioni

maggiori. Sono utili quando non si dispone di una stazione di riferimento nelle vicinanze e nel nostro caso sono impiegati principalmente per l'interpretazione del sito SCM dove una stazione sismologica ha registrato alcuni eventi sismici precedentemente all'installazione della rete.

Le funzioni ricevitore sono riportate in fig. 28 e 29 insieme ai *rapporti di Nakamura* ovvero al rapporto spettrale fra le componenti orizzontali e verticale di registrazioni di rumore sismico. In questo caso la registrazione, di circa 20 minuti, viene suddivisa in finestre di 20 s, che in parte si sovrappongono, e il rapporto di Nakamura è ottenuto come media dei singoli rapporti spettrali calcolati per ogni finestra. La caratteristica principale di questo rapporto spettrale è la rilevante stabilità rispetto alle modalità di acquisizione. In generale, se è presente, la frequenza corrispondente al picco del rapporto di Nakamura è ben correlata alla frequenza propria del deposito mentre l'ampiezza del picco non è sempre correlata all'amplificazione ricavata, ad esempio, con la tecnica dei rapporti spettrali. Inoltre le informazioni ricavabili con questa tecnica sono relative al solo picco fondamentale.

Normalmente si osserva una buona correlazione fra i risultati forniti da queste due ultime tecniche.

Nelle figure 30, 31 e 32 sono riportati i rapporti di Nakamura ricavati in alcuni siti addizionali per agevolare l'estrapolazione areale dei risultati ottenuti nei punti stazione oppure per approfondire situazioni specifiche.

7 Discussione dei risultati

Dai rapporti degli spettri di riposta (RSA) riportati nelle figure 25, 26 e 27, si osserva che le amplificazioni spettrali riguardano, nella maggior parte dei casi, periodi relativamente bassi, inferiori a circa 0.25 s, come era prevedibile considerando i non elevati spessori dei depositi. Basandosi su questi risultati si è operata una prima suddivisione dei siti stazione in quattro tipologie evidenziando anche le situazioni che hanno richiesto gli ulteriori approfondimenti che saranno descritti in seguito.

0. GLO e VIN. Stazioni poste sulla formazione Marnoso-Arenacea per le quali si osservano, come atteso, le amplificazioni minori e che non mostrano picchi significativi.
1. BIL, CAM, CUG, FAR, PER, RE2, USL. Stazioni installate sui depositi alluvionali generalmente più bassi e in vicinanza dell'attuale alveo fluviale, generalmente di spessore limitato (inferiore 6 metri). Il sondaggio eseguito presso il sito PEP (descritto in seguito) che è a circa 100 metri a est/nord-est di FAR, ha attraversato depositi alluvionali fino a -5.5 metri dal piano campagna incontrando poi il substrato. Per questo gruppo di stazioni RSA si mantiene mediamente attorno a 2 per periodi compresi fra 0.04 s e 0.14 s. Il valore medio dei SIR di questo gruppo di stazioni è 1.4.
2. BEK, BUS, CIC, CMN, DOS, MU2, PRO, SUO. Stazioni installate sui terrazzi alluvionali generalmente più alti e distanti dall'alveo del Rabbi rispetto a quelle del gruppo precedente, lungo i fianchi della valle a ridosso dei versanti. Gli spessori dei depositi detritici sono generalmente maggiori (superiori a 6 metri) rispetto a quelli del gruppo precedente, probabilmente anche per l'apporto di materiale detritico dai versanti. Per questo gruppo di stazioni RSA ha un valore di circa $2.5 \div 3$ per periodi compresi fra 0.04 s e 0.16 s. Il valore medio di SIR è 1.7.
3. CAN, GR2, PAL, SCA, SEL, SMO. È il gruppo di stazioni per il quale sono state registrate le amplificazioni spettrali maggiori. Anche per periodi relativamente alti, fino a 0.4 s si osservano amplificazioni rilevanti. Nell'intervallo 0.04 s $\div$ 0.35 s il valore di RSA è mediamente 3.7 mentre RSI è 3. A questo gruppo di stazioni si aggiunge SCM sulla base delle seguenti considerazioni:
 - Dalle figure 28 e 29 si può osservare che le funzioni ricevitore mostrano amplificazioni significative in intervalli di frequenza ben individuabili soprattutto per le stazioni che appartengono a quest'ultimo gruppo, ovvero per le stazioni dove si riscontrano le amplificazioni maggiori.

La funzione ricevitore di SCM e' caratteristiche molto simili a quelle descritte evidenziando un picco di amplificazione a circa 5 Hz con un'ampiezza fra le alte osservate nelle stazioni esaminate.

- Un sondaggio eseguito nell'angolo nord-est del giardino della Scuola Media (descritto in seguito) (a circa 20 metri a nord/nord-est da SCM e a circa 100 metri a nord-ovest di SUO) ha attraversato 9 metri di detriti di versante, poco piu' di 3 metri di deposito alluvionale e ha incontrato il substrato costituito da Marnoso-Arenacea a -12 metri dal piano campagna. Lo spessore dei depositi e' quindi fra i piu' alti riscontrabili nell'area esaminata.
- CAN, SEL, SCA e SCM sono installate su accumuli detritici (terrazzi alluvionali e detriti) di spessore talora anche superiore a 10 metri. Le stazioni SEL e SCA sono posizionate a ridosso dei meandri fluviali su terrazzi in prossimita' di scarpate. In particolare, SCA presenta a 0.13 s l'amplificazione maggiore ottenuta nella zona analizzata. Per valutare la possibile estensione areale di queste alte amplificazioni e' stata effettuata una campagna di microtrempi nell'area circostante, che verra' descritta in seguito.
- PAL e' stata installata su una probabile paleofrana e quindi in corrispondenza di consistenti spessori di depositi.
- GR2 e SMO sono state attivate in corrispondenza delle Argille e Marne di Riolo Terme (Pliocene-Pleistocene inf.) che si sviluppano ad Est del comune di Predappio Bassa e che, potenzialmente, dovrebbero avere buone caratteristiche meccaniche e quindi amplificazioni spettrali non elevate. Tuttavia questa zona sembra presentare, localmente, delle coltri di alterazione di vario spessore, probabilmente dovuti alla facilita' di degradazione di queste argille e a movimenti superficiali di grossi corpi di frana quiescenti (creep) o alla presenza di lembi di coltri alluvionali, relitte, difficilmente riconoscibili perche' mascherate dalla vegetazione.

Come gia' accennato, nelle prossime sezioni vengono descritte le indagini geofisiche e le campagne di registrazione di rumore ambiente effettuate per ottenere una migliore comprensione di alcuni aspetti evidenziati precedentemente. Nell'area del comune di Predappio sono state effettuate delle indagini geofisiche allo scopo di ottenere una ricostruzione stratigrafica dei siti indagati e la definizione della velocita' delle onde sismiche. L'ubicazione dei sondaggi geofisici e' riportata in fig. 3.

I rapporti di Nakamura possono fornire elementi utili per la valutazione degli effetti di sito indicando le frequenze proprie dei depositi. Per verificare la validita' di questa tecnica nel caso di Predappio, i rapporti di Nakamura sono stati valutati



Figura 3: Ubicazione delle prove geofisiche

in ogni sito stazione e possono essere confrontati con i rapporti spettrali e le funzioni ricevitore ottenute negli stessi siti. (figure 28 e 29). Tale confronto e' relativamente soddisfacente: si osserva in generale un buon accordo con le funzioni ricevitore e si verifica che per alcune stazioni il picco di amplificazione e' compatibile con quello evidenziato dai rapporti spettrali (ad esempio PAL, SCA, SEL, SMO) mentre per VIN, e GLL si ottiene un rapporto di Nakamura quasi piatto come atteso in tali situazioni. Si ricorda che il successo dei rapporti di Nakamura dipende da vari fattori, tra i quali, ad esempio, il contrasto di impedenza fra gli strati dei depositi superficiali e quelli sottostanti.

7.1 Sito PEP

In questo sito e' stata eseguita un'indagine sismica con metodologia down-hole (all'interno di due sondaggi meccanici appositamente realizzati ed attrezzati) che ha interessato i depositi alluvionali della zona orientale del comune fino alla profondita' di circa 11 metri. Il sondaggio ha evidenziato uno spessore dei depositi alluvionali di circa 5.5 m, dopo il quale si raggiunge il substrato di Marnoso-Arenacea. I risultati, relativi a due metodi di interpretazione, sono riportati nelle tabelle 2 e 3.

Basandosi sui risultati delle indagini sismiche sono state modellate le funzioni di trasferimento relative a un modello monodimensionale per onde S incidenti verticalmente. I risultati sono riportati in fig. 24 mentre in fig.30 e' rintracciabile il rapporto di Nakamura ottenuto dalla registrazione di rumore sismico effettuate nelle vicinanze del foro del sondaggio (PEP).

Le caratteristiche di questo sito, simile alla stazione vicina FAR, riguardano il non elevato spessore dei depositi alluvionali, che hanno una velocita' media di circa 350m/s , e la conseguente amplificazione sismica riscontrabile solo per frequenze superiori a 10Hz . Anche il rapporto di Nakamura non indica amplificazioni rilevanti per frequenze inferiori.

<i>prof(m)</i>	<i>v_p(m/s)</i>	<i>v_s(m/s)</i>	<i>dens.(kg/cm³)</i>
1.0	406	180	1.6
2.0	403	185	1.6
3.0	796	319	1.6
4.0	842	379	1.6
5.0	1187	594	1.7
6.0	1253	585	1.7
7.0	1891	1068	1.8
8.0	1975	1092	1.8
9.0	2095	1122	1.8
10.0	2119	1192	1.8
11.0	2046	1020	1.8
12.0	2103	1195	1.8

Tabella 2: Risultati dell'indagine sismica con metodologia down-hole ottenuti attraverso il metodo differenziale.

<i>prof(m)</i>	<i>v_p(m/s)</i>	<i>v_s(m/s)</i>	<i>dens.(kg/cm³)</i>
1.0	405	180	1.6
3.0	820	350	1.6
5.0	1200	580	1.7
9.0	2000	1140	1.8

Tabella 3: Risultati dell'indagine sismica con metodologia down-hole ottenuti attraverso il metodo delle dromocrone.

7.2 Il sito GR2

Il sito GR2, situato in localita' Grotta e monitorato da una stazione sismometrica per lungo tempo, ha fornito dei risultati inattesi in relazione alle caratteristiche meccaniche attese per la formazione delle Argille e Marne Plioceniche. L'elaborazione dei dati di GR2 ha mostrato infatti dei picchi di amplificazione di entita' rilevante che ha reso necessari ulteriori approfondimenti delle indagini.

Sono state eseguite delle misure della velocita' sismica in foro secondo la metodologia cross-hole che, per problemi logistici, sono localizzate in un sito relativamente distante dalla stazione GR2 (circa 100 m). Oltre a questo sondaggio e' stato possibile eseguire un profilo di sismica a rifrazione in un'area adiacente al punto stazione.

I risultati dell'indagine cross-hole sono riportati in tabella 4 e mostrano, dopo pochi metri dalla superficie, valori di velocita' delle onde sismiche elevati che indicano una buona caratteristica meccanica della formazione. Le osservazioni di GR2 non sono quindi compatibili con questi risultati.

<i>prof(m)</i>	<i>v_p(m/s)</i>	<i>v_s(m/s)</i>	<i>dens.(kN/m³)</i>
0.0	845	423	19
1.0	1388	732	20
2.0	1603	869	20
3.0	1722	969	20
4.0	1788	979	20
5.0	1824	1011	20
6.0	1979	1069	20

Tabella 4: Dati meccanici ottenuti in località Grotta dall'interpretazione del sondaggio cross-hole

L'esecuzione del profilo sismico a rifrazione ha permesso di chiarire il complesso comportamento di questa area. L'interpretazione riportata in fig.33 mette in evidenza la presenza di una zona superficiale, di circa 10 metri di spessore, contraddistinta da basse velocità sismiche ($V_P=600-1500$ m/s). E' quindi ipotizzabile che in corrispondenza del sito GR2 e nelle sue vicinanze, vi sia la presenza di un antico terrazzo fluviale poggiante sui litotipi pliocenici. Al di sotto di questa coltre a bassa velocità si osservano, infatti, terreni molto compatti con velocità sismica piuttosto elevata, coerentemente a quanto atteso in tutta l'area pliocenica.

La coltre piu' superficiale puo' quindi spiegare le amplificazioni riscontrate in questo sito.

Questa osservazione e il grado di amplificazione mostrato dalla stazione SMO hanno portato a verificare la presenza di zone particolarmente alterate e/o instabili in grado di amplificare in maniera anomalo il segnale sismico all'interno dei litotipi pliocenici.

E' stata quindi condotta una campagna di registrazione di microtrempi nei seguenti 4 punti mostrati anche in figura 4.

Ap1 localizzato sulla litotipo CEA (Marne di Cella) in corrispondenza di una probabile zona calanchiva di limitata estensione

Ap2 localizzato sulla litotipo CEA presumibilmente inalterato

Ap3 localizzato sul litotipo RIL (Marne di Riolo Terme), in prossimità del sito GR2

Ap4 localizzato su un corpo di frana che interessa il litotipo RIL e chiaramente cartografato sulla carta geologica.

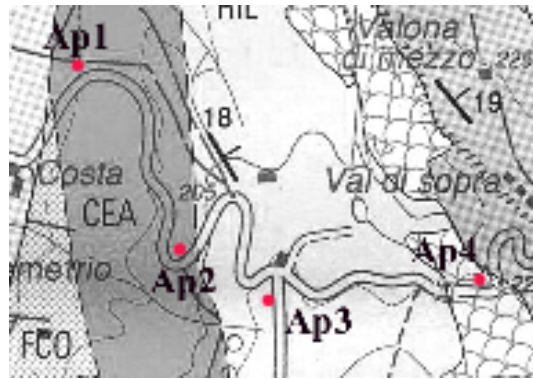


Figura 4: Localizzazione delle misure dei microtremori effettuate sulle Argille e Marne plioceniche.

I risultati che la campagna di microtremori ha prodotto sono mostrati in figura 32. I rapporti di Nakamura hanno confermato che alcune zone "immerse" in un litotipo a buone caratteristiche meccaniche possono produrre dei picchi di amplificazione significativi anche per frequenze di interesse ingegneristico. Ap1 e Ap4, ad esempio, campionano delle zone di limitata estensione caratterizzate da presenza di materiale alterato e/o interessato da movimenti gravitativi di entità variabile. In mancanza di dati precisi, si suppone che Ap1, che mostra un picco di amplificazione su frequenze alte (circa 15 Hz), sia caratterizzato da un'alterazione limitata e, probabilmente, alquanto localizzato. Al contrario Ap4, chiaramente localizzato in corrispondenza di una frana, mostra di poter produrre delle notevoli amplificazioni spettrali su frequenze basse (3-4 Hz). Al contrario gli altri due siti, Ap2 e Ap3, localizzati in zone apparentemente "indisturbate" mostrano dei rapporti di Nakamura grossomodo piatti, coerentemente con quanto i litotipi pliocenici dovrebbero mostrare.

7.3 Il sito SCM

Nell'angolo nord-est del giardino della Scuola Media (a circa 20 metri a nord/nord-est dal sito stazione SCM) sono state effettuate misure della velocità delle onde sismiche utilizzando la metodologia cross-hole. La stazione SCM era stata installata nel 1999 durante la pausa estiva del calendario scolastico e ha registrato 6 eventi sismici. Come già osservato la funzione ricevitore e i rapporti di Nakamura indicano una situazione di amplificazione sismica rilevante.

Il sondaggio ha attraversato 9 metri di detriti di versante, poco più di 3 metri di deposito alluvionale e ha incontrato il substrato costituito da Marnoso-Arenacea a -12 metri dal piano campagna.

I dati delle velocità di propagazione delle onde sismiche, riguardanti i carotaggi e l'indagine sismica, sono riportati rispettivamente nelle tabelle 5 e 6. Nella figura 34 vengono riportate sia le funzioni di trasferimento ottenute utilizzando i dati

dei sondaggi che i rapporti di Nakamura e la funzione ricevitore. Si osserva un buon accordo riguardo alla individuazione della frequenza fondamentale. Una ulteriore osservazione riguarda i dati relativi alla vicina (circa 100 metri) stazione SUO che presenta amplificazioni significativamente inferiori, la situazione del sito SCM appare piu' simile a quando osservato per la stazione PAL (vedi fig. 29).

$prof(m)$	$v_p(m/s)$	$v_s(m/s)$	$dens.(kg/cm^3)$
7.0	400	190	1.6
10.0	700	340	1.6
12.0	1150	580	1.7
17.0	1900	1020	1.7

Tabella 5: Dati meccanici ottenuti in località Scuola dall'interpretazione dei carotaggi

$prof(m)$	$v_p(m/s)$	$v_s(m/s)$	$dens.(kN/m^3)$
1.0	316	148	19
2.0	359	169	19
3.0	367	173	19
4.0	374	176	19
5.0	415	200	19
6.0	489	230	19
7.0	533	259	20
8.0	688	333	20
9.0	710	346	20
10.0	1100	553	20
11.0	1294	629	20
12.0	1760	967	20
13.0	1913	1035	20
14.0	1892	1023	20
15.0	1956	1060	20
17.0	1844	1041	20

Tabella 6: Dati meccanici ottenuti in località Scuola dall'interpretazione del sondaggio cross-hole

7.4 Il sito SCA

Nel sito SCA, monitorato da una stazione sismometrica localizzata nel giardino davanti all'entrata dell'Ospedale San Camillo in prossimità di una scarpata di

circa 20m sull'alveo del Rabbi, si é verificata un'ottima corrispondenza fra tutte le elaborazioni dei dati velocimetrici. Quest'ultime hanno evidenziato un alto picco di amplificazione per la frequenza di 7 Hz. Si é quindi ritenuto che la registrazione di rumore ambientale possano essere idonee per sondare sull'intera zona dell'Istituto San Camillo l'effettiva estensione areale delle alte amplificazioni osservate. I punti indagati sono riportati in figura 5.

Sc1 a circa 20 metri ad Ovest del bordo dell'edificio ospedaliero

Sc2 a circa 30 metri a Nord del bordo dell'edificio ospedaliero e a circa 15 metri dal sito SCA

Sc3 a circa 30 metri ad est del bordo dell'edificio ospedaliero

Sc5 a circa 200 metri a Est del bordo dell'edificio ospedaliero al di sopra di terrazzi fluviali di spessore limitato

Sc8 a circa 20 metri a Sud del bordo dell'edificio ospedaliero.



Figura 5: Localizzazione dei punti dell'Istituto San Camillo in cui sono state effettuate le registrazioni di microtremori.

I risultati, illustrati in figura 31, sembrano suggerire che i fenomeni di amplificazione riscontrati a SCA siano limitati in prossimitá del bordo del terrazzo. Tuttavia, le frequenze di risonanza evidenziate da Sc8 e Sc3, solo parzialmente da Sc1, sono prossime a quelle visibili in SCA e Sc2. Questo indica che nelle zone piú interne dei terrazzi alluvionali ci si puó attendere un'amplificazione sismica per periodi paragonabili a SCA, ma probabilmente di minore entitá.

8 Conclusioni

Le elaborazioni descritte nei capitoli precedenti hanno portato alla suddivisione dell'area di Predappio bassa in 4 zone caratterizzate da un comportamento sismico differente (fig.1

Per ogni zona viene proposta una specifica funzione di amplificazione dello spettro di risposta corrispondente alla pericolosità sismica a scala regionale calcolata per il Comune di Predappio (vedi fig. 2).

La suddivisione operata si è basata sui seguenti elementi:

- informazioni geologiche e geolitologiche disponibili per l'area.
- valutazione dell'amplificazione dello spettro di risposta (RSA) e dell'intensità spettrale (RSI) riferite allo scuotimento relativo alla pericolosità sismica a scala regionale calcolata per il Comune di Predappio.
- indagini geofisiche effettuate in alcune situazioni particolari.
- registrazioni di rumore sismico utilizzate per estrapolare le informazioni ottenute nei siti monitorati dalle stazioni sismiche.

Le zone individuate hanno le seguenti caratteristiche:

ZONA 0 Questa zona coincide con l'affioramento della Formazione Marnoso-Arenacea e dei litotipi argillosi e marnosi pliocenici, entrambi caratterizzati da proprietà meccaniche buone. I siti che hanno monitorato la FMA sono stati, infatti, associati ai valori di scuotimento del suolo forniti dalle analisi di pericolosità'.

Al contrario, le uniche due stazioni che hanno indagato la zona delle argille plioceniche, hanno prodotto dei risultati anomali: GR2 e SMO appartengono, infatti, alla zona 3. Le indagini geofisiche e le campagne di microtremori hanno mostrato che le aree attorno a queste stazioni sono delle *isole* ad alto grado di amplificazione immerse in un litotipo a caratteristiche meccaniche buone che, in situazioni superficiali non alterate, a pochi metri di profondità' presenta una velocità delle onde S superiore a 1000m/s . Per questo motivo, nonostante i dati forniti dalle stazioni in quest'area, le formazioni delle Argille e Marne di Riolo Terme sono state poste in zona 0.

ZONA 1 E' l'area che ospita i depositi alluvionali inferiori e prossimi all'alveo fluviale con limitati spessori di sedimento (≤ 6 metri). I terrazzi b1 (interessati dall'attuale sedimentazione del fiume Rabbi) ed i terrazzi b2 mostrano entrambi un valore medio di RSI di circa 1.4. Il sito PER, posizionato su un terrazzo di ordine 3, ha mostrato un comportamento sismico compatibile con quello delle altre stazioni appartenenti a questa zona. La spiegazione di tale anomalia potrebbe essere ricercata o nella relativa vicinanza del sito

alla Formazione Marnoso-Arenacea e, quindi, allo spessore particolarmente limitato del terrazzo b3 in quel punto.

ZONA 2 Le registrazioni acquisite hanno permesso di osservare un valore medio di RSI di circa 1.7 in corrispondenza dei terrazzi fluviali piu' antichi (b3 e b4), generalmente pi' alti e distanti dall'alveo del Rabbi, lungo i bordi della valle e con spessori dei depositi detritici maggiori rispetto a quelli zona precedente anche per l'apporto di detriti dai versanti. Non appartiene a questa zona il sito CUG che, seppure a confine tra un terrazzo b2 e b3, mostra un grado di amplificazione minore.

ZONA 3 Questa si e' rivelata la zona piu' pericolosa dell'area di Predappio Bassa, mostrando dei valori di RSA anche dell'ordine di 5 volte per alcuni periodi e valori di medi di RSI di circa 3. A differenza delle altre zone, questa e' rappresentata da isole, ad estensione spesso non definita, poggianti su configurazioni geologiche appartenenti alle tre zone descritte precedentemente. Questo comportamento puo', pertanto, essere ricondotto a caratteri geolitologici che ne rendono il comportamento particolarmente pericoloso. Rientrano in quest'area i casi di frane quiescenti riscontrati sul territorio comunale e di smottamenti, zone a caratteristiche meccaniche particolarmente scadenti ed aree che presentano spessori di sedimenti elevati rispetto alla media dei terrazzi fluviali.

Nella presentazione della carta di zonazione di Predappio Bassa, si cercato di operare un'estrapolazione dei risultati ottenuti anche alle aree comunali non direttamente interessate dal monitoraggio sismico. L'area ad alta amplificazione che stata denominata "Zona 3" non assume lo stesso significato delle altre; a differenza delle Zone 0, 1 e 2, quest'area e' composta unicamente dai siti monitorati ed, inoltre, i suoi limiti non sempre risultano ben definibili. Questo implica che nell'area di Predappio Bassa soprattutto in corrispondenza dei litotipi argilloso-marnosi di eta' pliocenica dove si incontrano situazioni geologiche particolarmente instabili o alterate (frane, zone calanchive, ecc...) si possono riscontrare amplificazioni analoghe. La "Zona 3" non e' quindi stata mappata completamente ma puo' essere estrapolata a tutte le zone in frana cartografate sulla carta geologica e a tutte le zone interessate da dissesto.

Bisogna sottolineare che le analisi e i risultati presentati sono basati su registrazioni di eventi di moto debole. Anche per l'evento piu' energetico registrato senza saturare le tracce l'accelerazione massima non supera 30 cm/s^2 . I risultati presentati si riferiscono percio' a un comportamento lineare dei vari litotipi. A causa delle caratteristiche dei depositi superficiali, non stato possibile prelevare campioni indisturbati per effettuare in laboratorio le prove dinamiche geotecniche finalizzate alla valutazione del comportamento non lineare dei litotipi indagati. L'influenza della non linearita' dei terreni sulle amplificazioni spettrali e' stata

valutata qualitativamente con simulazioni numeriche relative al sito SCM localizzato in Zona 3 per il quale si dispone del profilo stratigrafico delle velocità delle onde S.

Per la descrizione del comportamento non lineare dei terreni si sono curve di decadimento del modulo di taglio e di variazione dello smorzamento in funzione della deformazione trovate in letteratura e relative a situazioni analoghe non avendo potuto effettuare, come già accennato, prove specifiche per i litotipi presenti a Predappio.

Dai risultati, riportati in fig. 35, si osserva che in questo caso, la non linearità dei terreni può comportare una riduzione dei valori di amplificazione spettrale (RSA) di circa il 30 % per $T_0 < 0.2$ s e un corrispondente aumento per periodi superiori. Il periodo per il quale si osserva la massima amplificazione spettrale diminuisce di circa il 30 %. Si osserva anche che il valore di RSI, valutato per $0.1 \text{ s} \leq T_0 \leq 0.5 \text{ s}$, rimane pressoché inalterato (circa 2.4).

Questi ultimi risultati devono essere considerati con cautela anche per l'oggettiva difficoltà nel predire l'effettiva influenza della non linearità sul moto sismico.

Tuttavia si può concludere che gli effetti della non linearità dei terreni non influenzino la suddivisione in zone proposta per l'area investigata e che le corrispondenti amplificazioni dello spettro di risposta (RSA), valutate utilizzando il moto sismico effettivamente registrato, mantengano la loro validità.

Ringraziamenti

Si ringraziano l'amministrazione comunale e gli abitanti di Predappio per l'attenzione e la disponibilità dimostrata durante l'indagine.

9 Riferimenti

- Antoniazzi A., Antoniazzi A., 1999. Piano Regolatore Generale - Comune Di Predappio (Provincia di Forlì-Cesena) - Relazione Geologica.
- Marcellini A., R. Daminelli, L. Franceschina, M. Pagani, 2000. Valutazione della pericolosità sismica della Provincia di Forlì - Cesena. Rapporto CNR-IRRS, versione 27 gennaio 2000
- Regione Emilia-Romagna - Università di Bologna (edizione 1991). Carta Geologica dell'Appennino Emiliano-Romagnolo 1:10.000, sezioni 254080 Predappio nord e 254120 Predappio sud. Archivio Cartografico della Regione Emilia-Romagna, Bologna.
- Tento A., G.L. Franceschina, R. de Franco, 1998. Experimental site effect evaluation in Nocera Umbra (Italy), Proc., 2nd Int.Symp.on "The Effects of Surface Geology on Seismic Motion - Recent Progress and New Horizon on ESG Study - , Yokohama, Japan 1998, p. 559-566, A.A. Balkema, Rotterdam,Brookfield, 1998.
- Tento A., G.L. Franceschina, R. de Franco, M. Pagani, 2001. Site effect zonation of the Fabriano municipality. Italian Geotechnical Journal, vol. XXXV, n.2.
- Pergalani F., R. Romeo, L. Luzi, V. Petrini, A. Pugliese, T. Sano', 1999. Seismic microzoning of the area struck by Umbria-Marche (Central Italy) Ms 5.9 earthquake of 26 September 1997. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 18, n.4

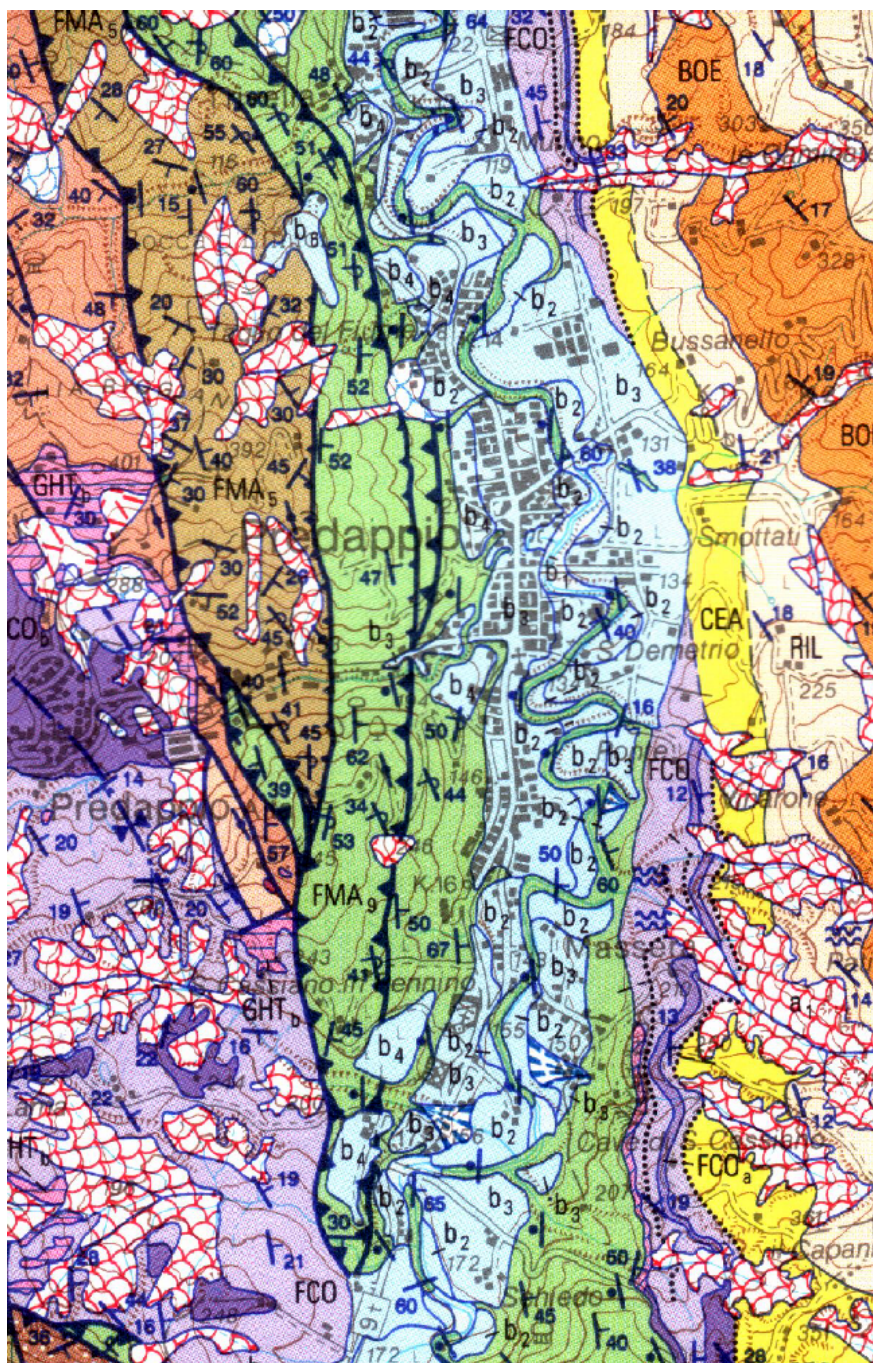


Figura 6: Carta Geologica dell'Appennino Emiliano-Romagnolo 1:10.000, sezioni 254080 Predappio nord e 254120 Predappio sud. Archivio Cartografico della Regione Emilia-Romagna. Regione Emilia-Romagna - Universita' di Bologna, Bologna 1991.

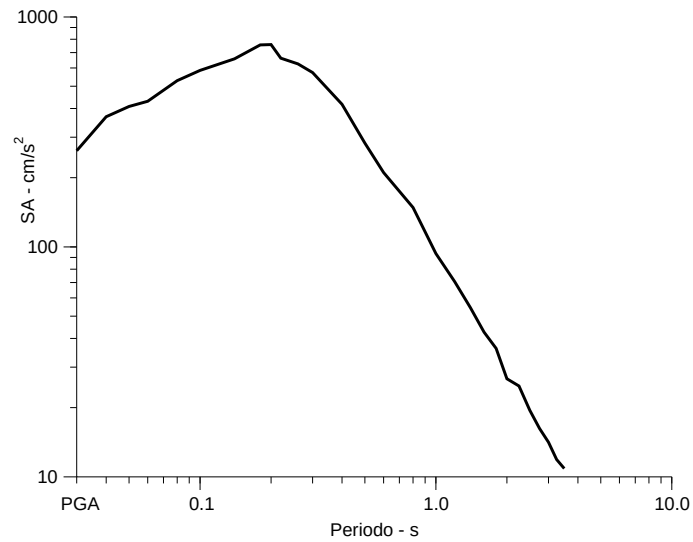


Figura 8: Spettro di risposta in accelerazione, $\zeta = 5\%$, con periodo di ritorno 475 anni valutato con le analisi di pericolosità sismica per la località di Predappio.



Figura 9: Stazione mobile digitale Lennartz Mars88-FD con sensore Mark L4c-3D installata all'interno della galleria

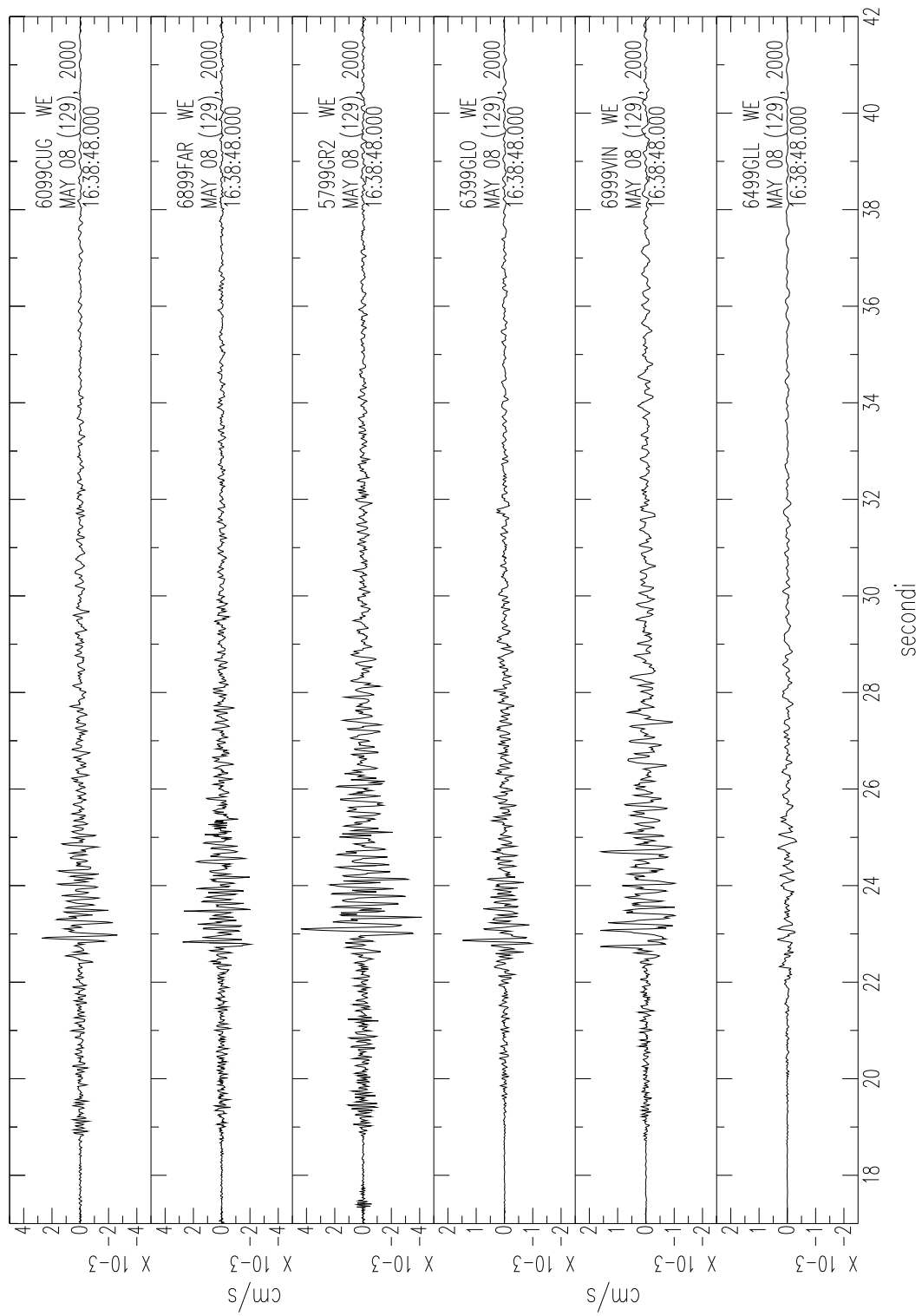


Figura 10: RegISTRAZIONI velocimetriche dell'evento del 8 maggio 2000 delle stazioni: CUG, FAR, GR2, e con scala differente GLO, VIN, GLL.

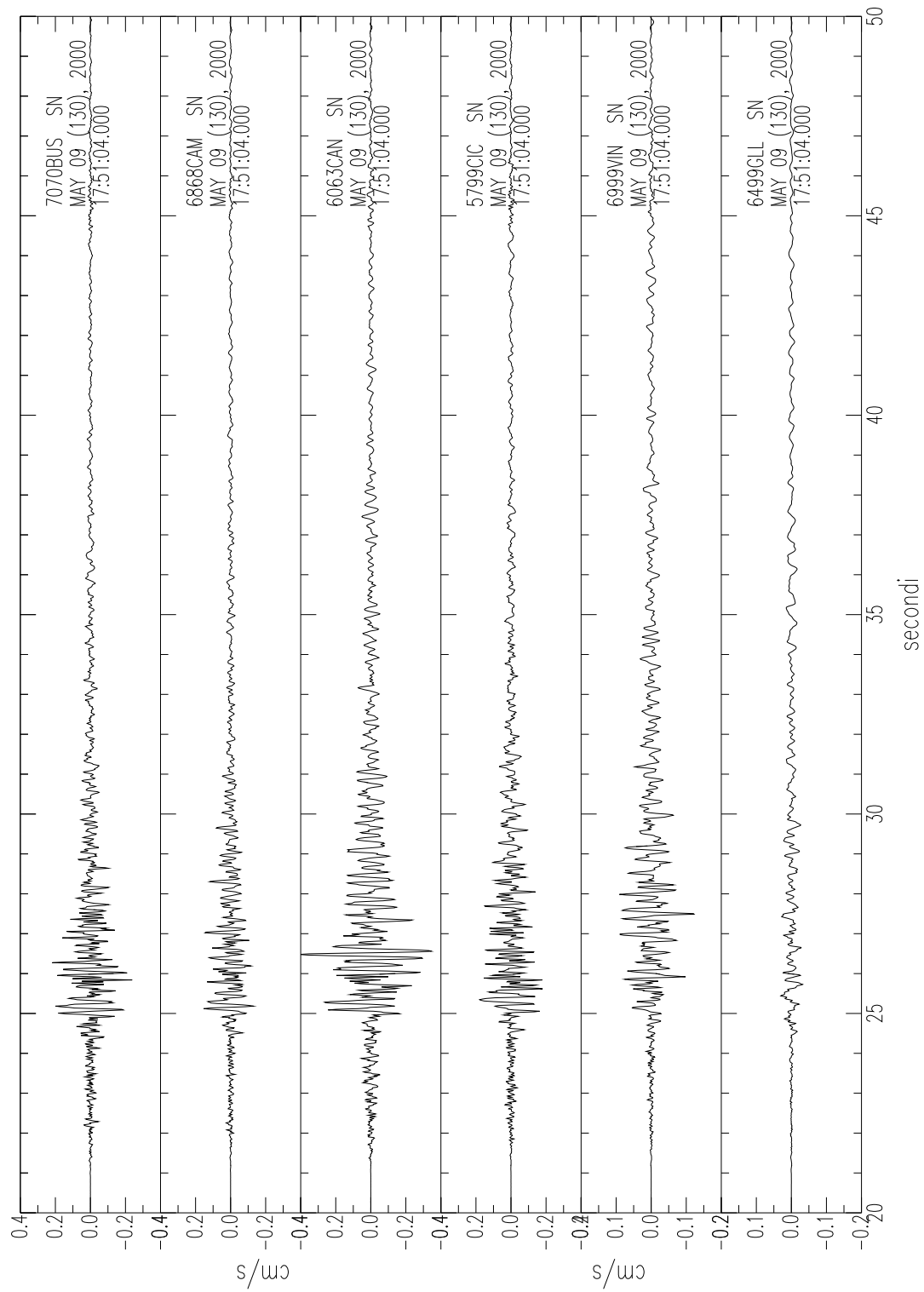


Figura 11: RegISTRAZIONI velocimetriche dell'evento del 9 maggio 2000 delle stazioni: BUS, CAM, CAN, CIC, e con scala differente VIN, GLL.

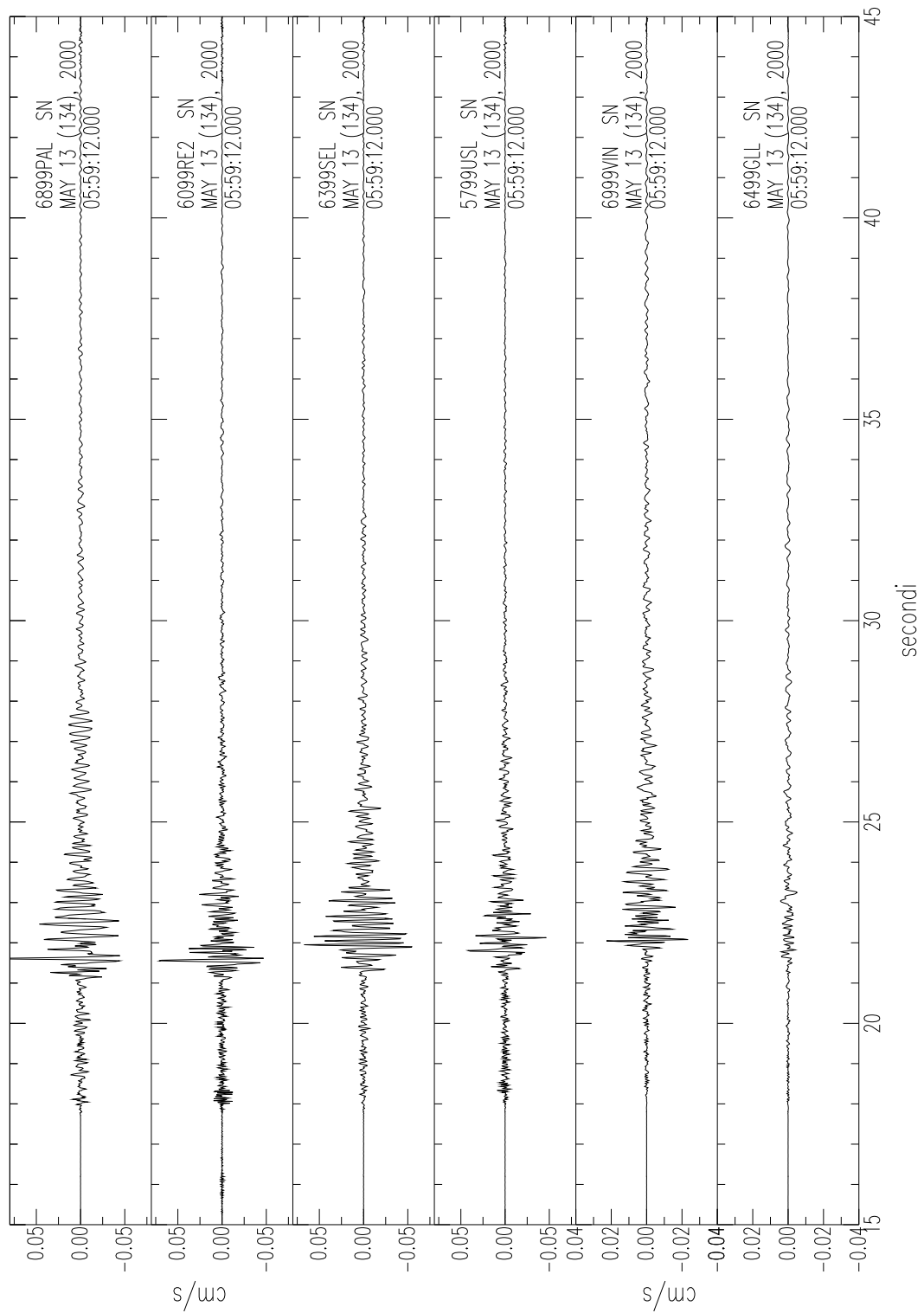


Figura 12: Registrazioni velocimetriche dell'evento del 13 maggio 2000 delle stazioni: PAL, RE2, SEL, USL e con scala differente VIN, GLL.

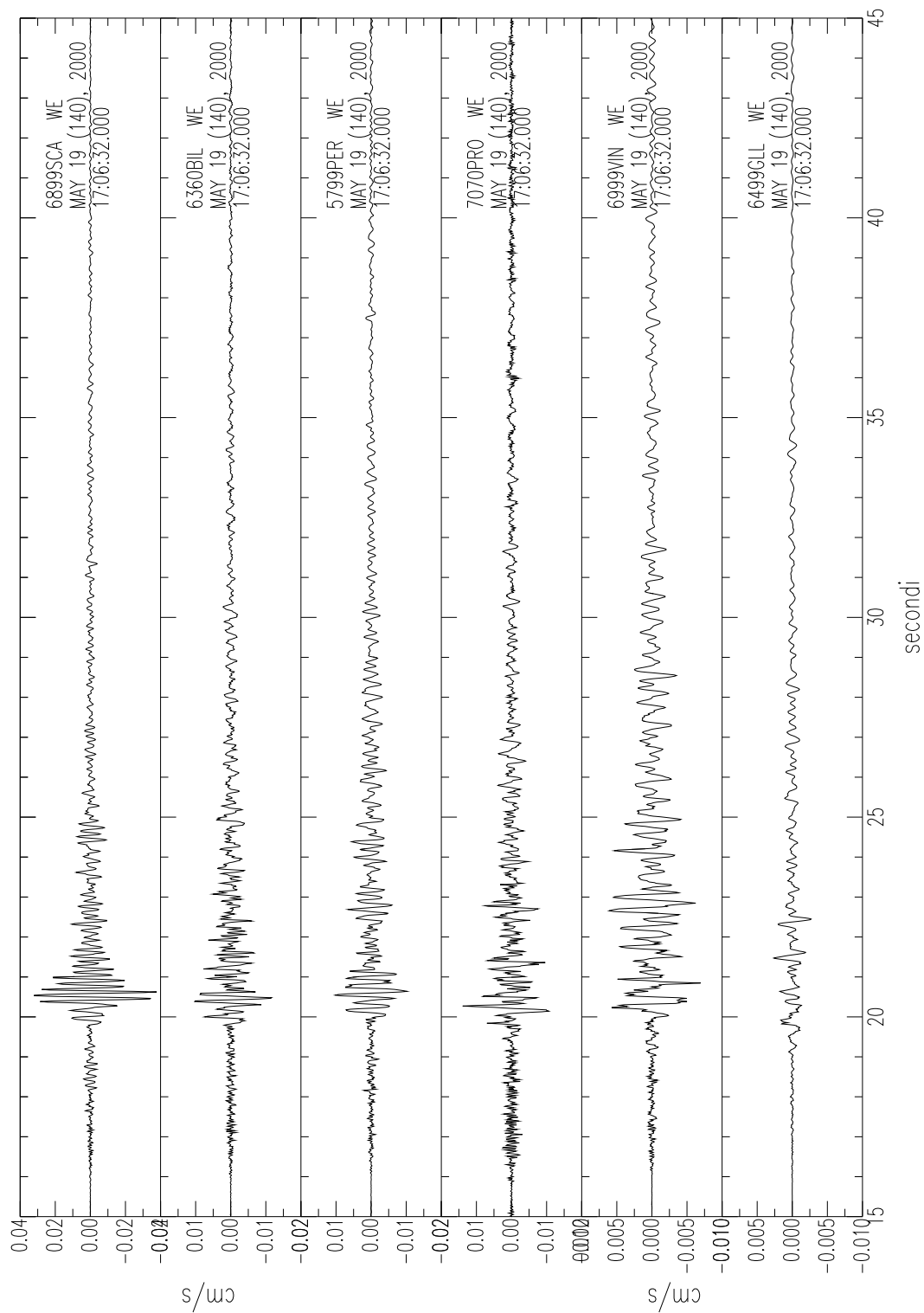


Figura 13: Regrazioni velocimetriche dell'evento del 19 maggio 2000 delle stazioni: SCA, con scala differente BIL, PER, PRO e con scala ancora differente VIN, GLL.

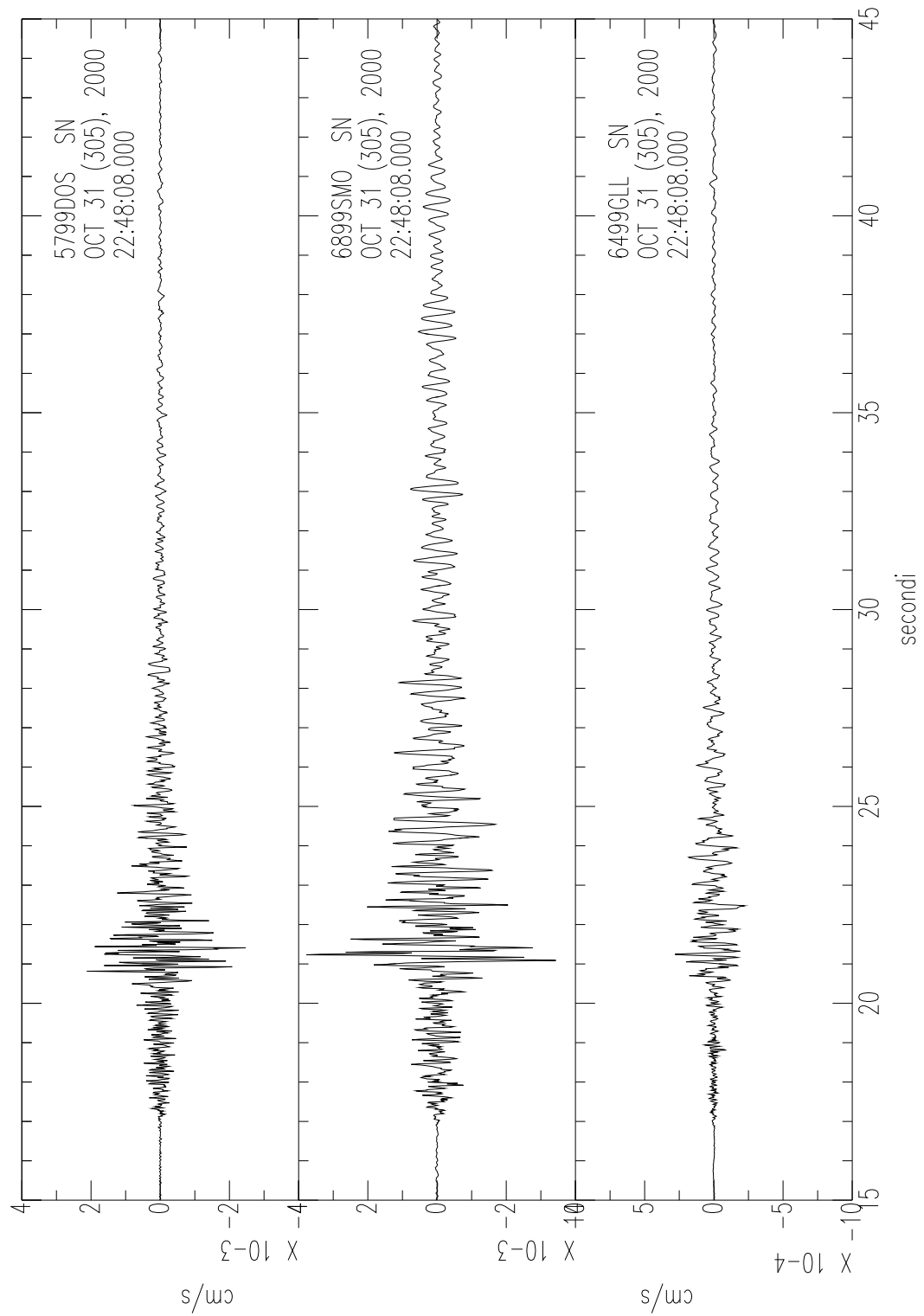


Figura 14: Registrazioni velocimetriche dell'evento del 31 ottobre 2000 delle stazioni: DOS e SMO e con scala differente GLL.

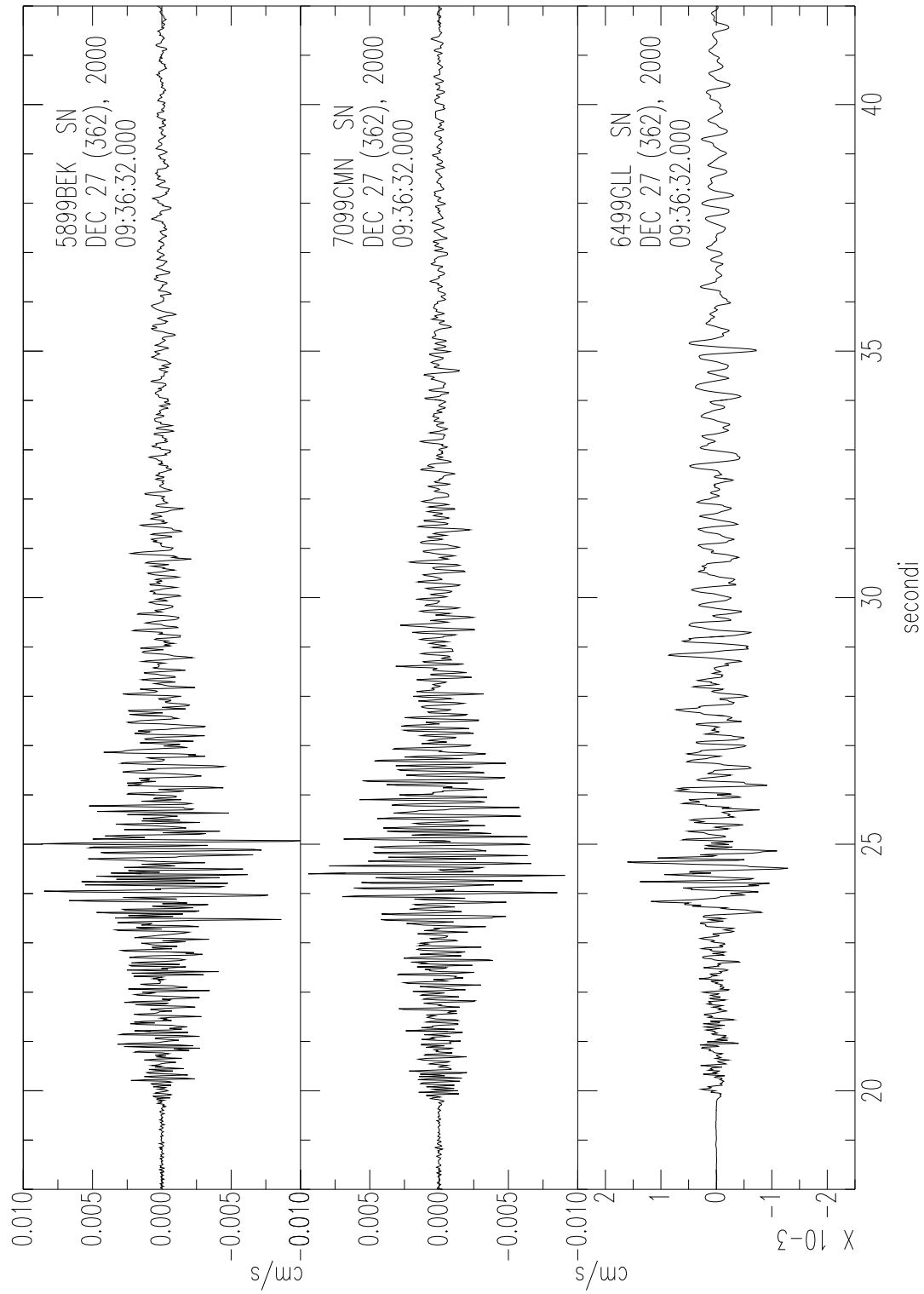


Figura 15: RegISTRAZIONI velocimetriche dell'evento del 27 dicembre 2000 delle stazioni: BEK, CMN e con scala differente GLL.

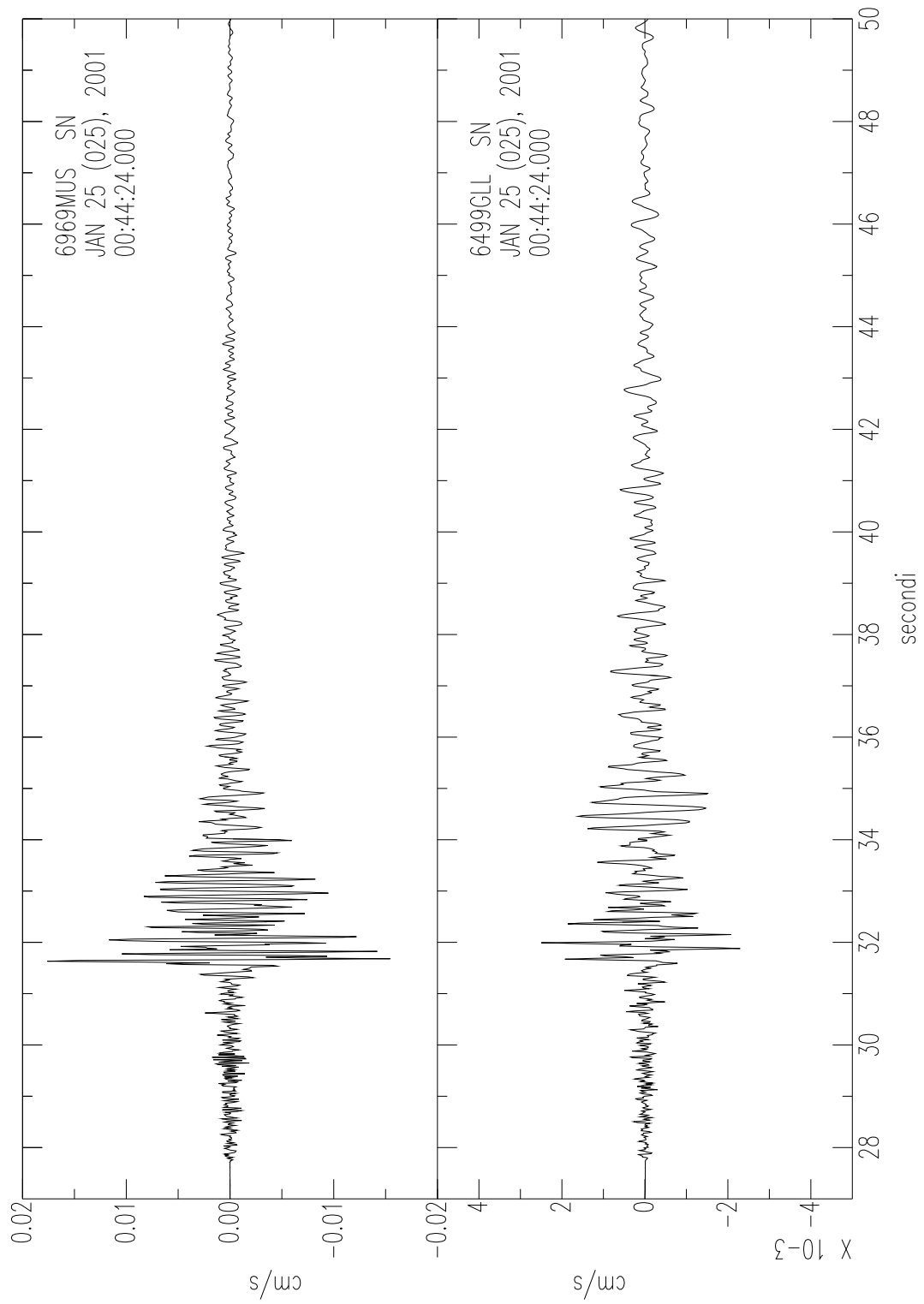


Figura 16: Registrazioni velocimetriche dell'evento del 25 gennaio 2001 delle stazioni: MUS e con scala differente GLL.

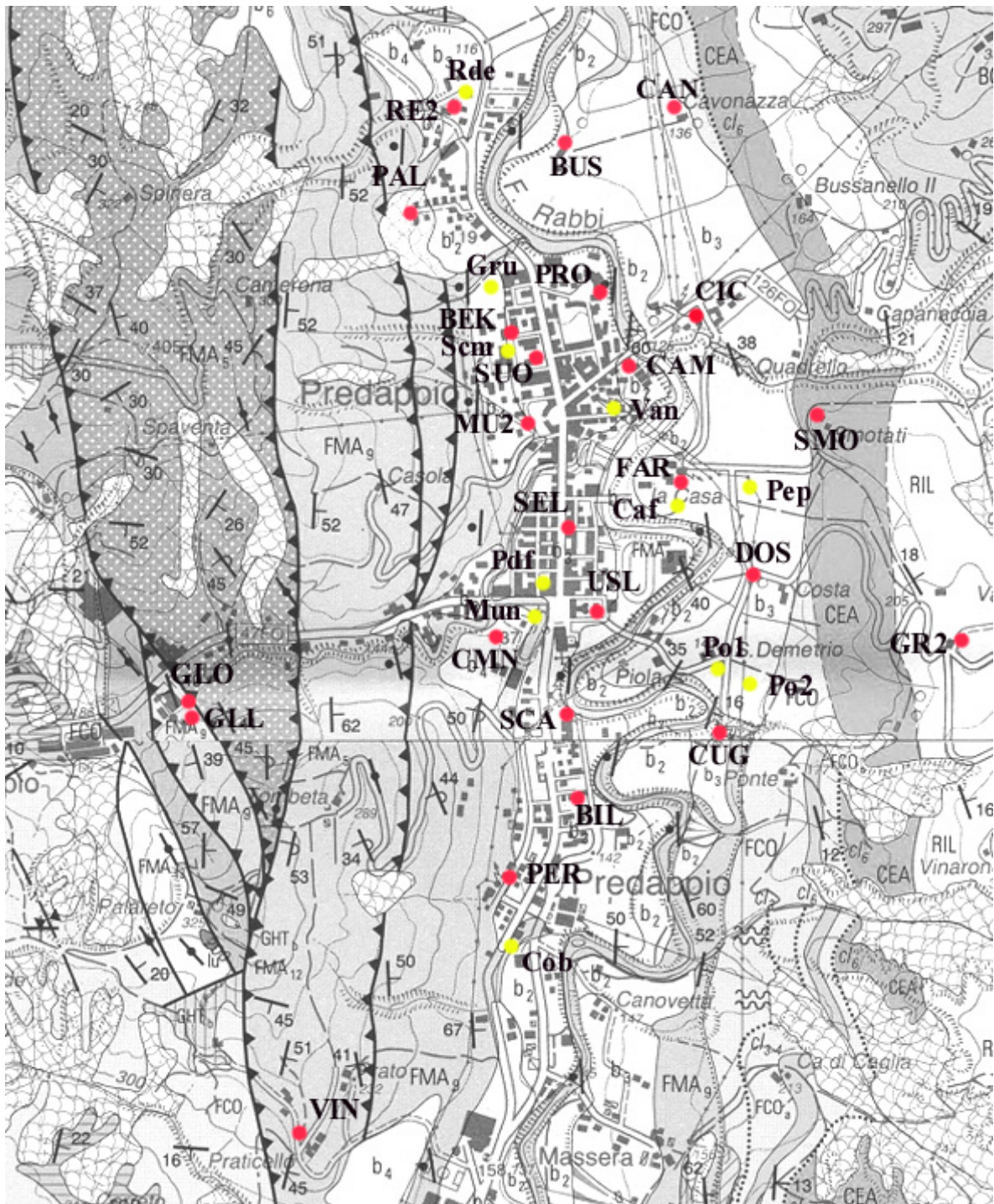


Figura 17: (Rosso) localizzazione delle stazioni velocimetriche. (Nero) Localizzazione dei siti aggiuntivi in cui é stato registrato solamente rumore sismico.

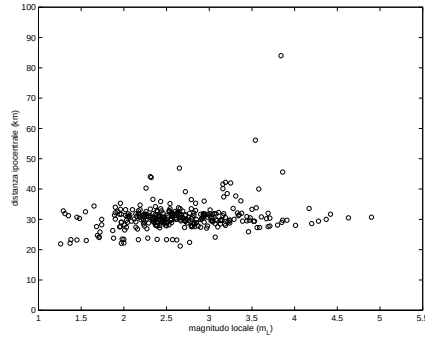


Figura 18: Distribuzione della magnitudo locale degli eventi in funzione della distanza ipocentrale dalla stazione GLL

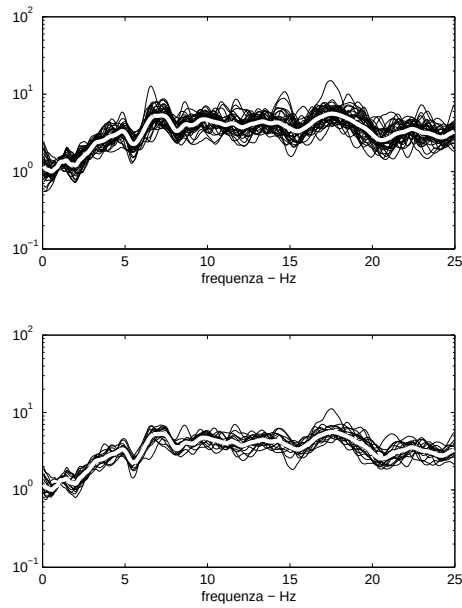


Figura 19: Stime del rapporto spettrale fra le componenti N-S delle stazioni VIN e GLL. Linea *bianca* spessa: stima utilizzando le 197 coppie di registrazioni disponibili. Linee continue nere: Pannello superiore: 39 stime utilizzando sottoinsiemi di 5 coppie di registrazioni; Pannello inferiore: 19 stime utilizzando sottoinsiemi di 10 coppie di registrazioni.

NUMERO DI REGISTRAZIONI

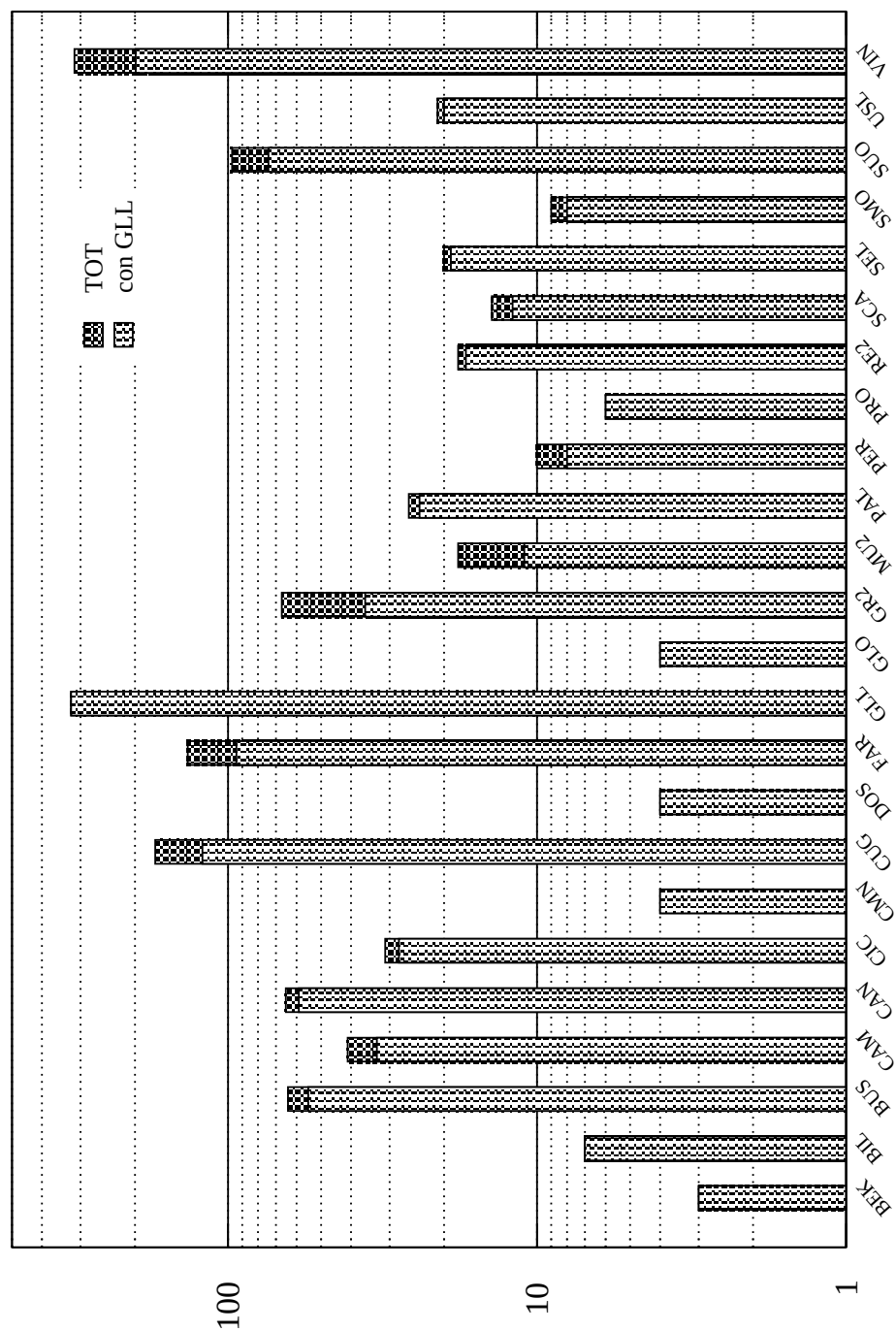


Figura 20: Numero di registrazioni disponibili per ogni stazione (totali e in coincidenza con GLL).

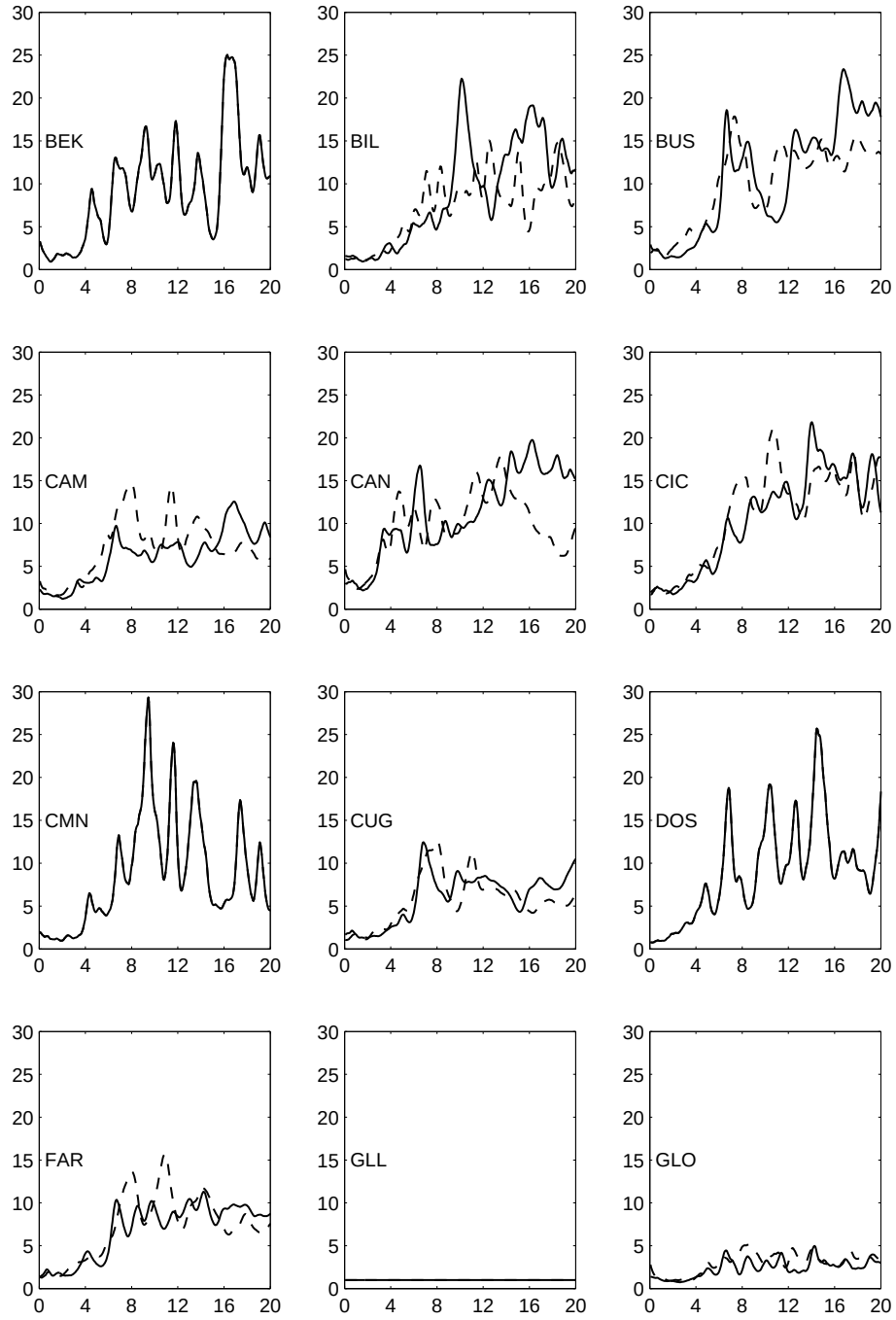


Figura 21: Rapporti spettrali rispetto alla stazione GLL. Linea continua: componente N-S. Linea trattteggiata: componente E-O. In alcuni casi si ha solo il rapporto spettrale relativo alla componente N-S.

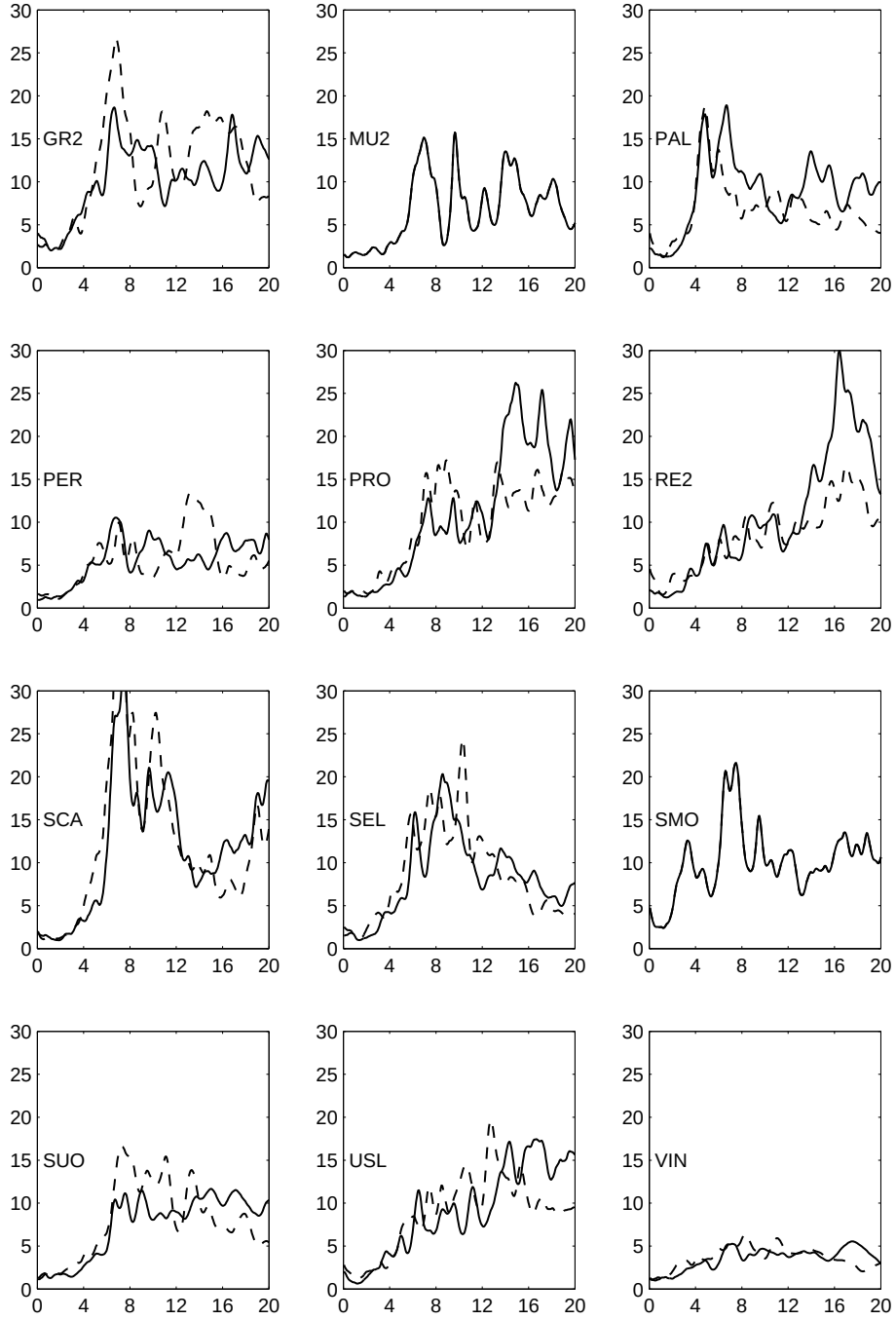


Figura 22: Come fig. 21.

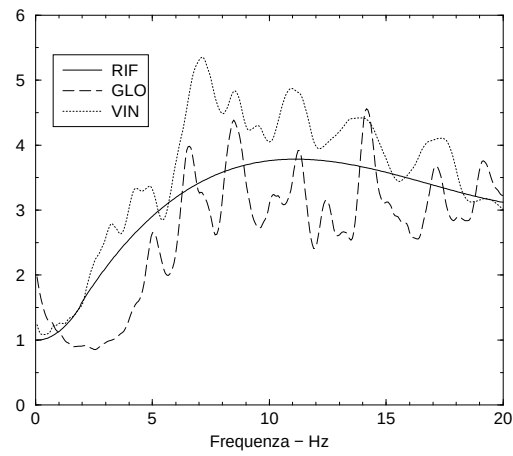


Figura 23: Rapporti spettrali di VIN e GLO rispetto a GLL e *rapporto spettrale* definito per un generico sito posto sulla Formazione Marnoso Arenacea,(RIF), ottenuto come media pesata fra i due precedenti.

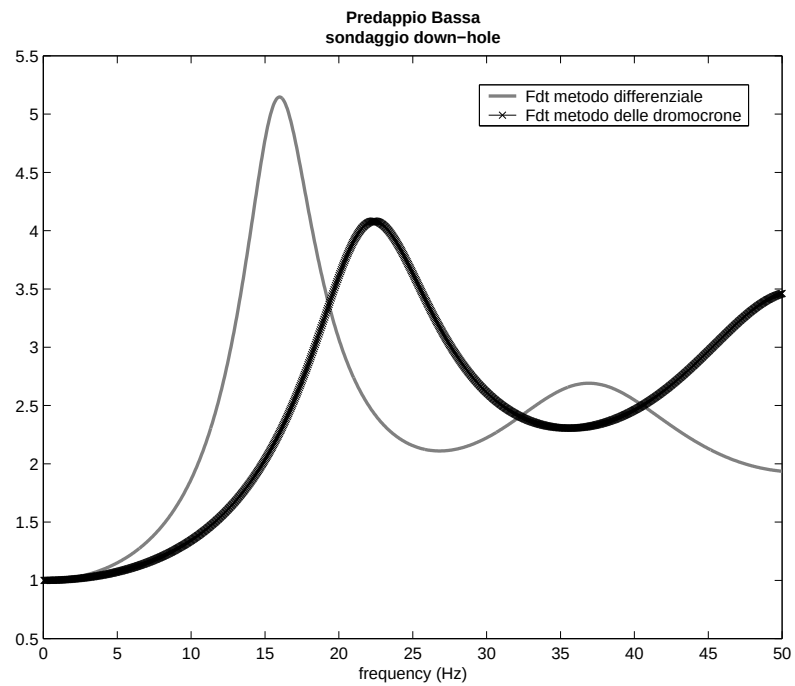


Figura 24: Funzioni di trasferimento per il sito PEP ottenute dai dati di down-hole.

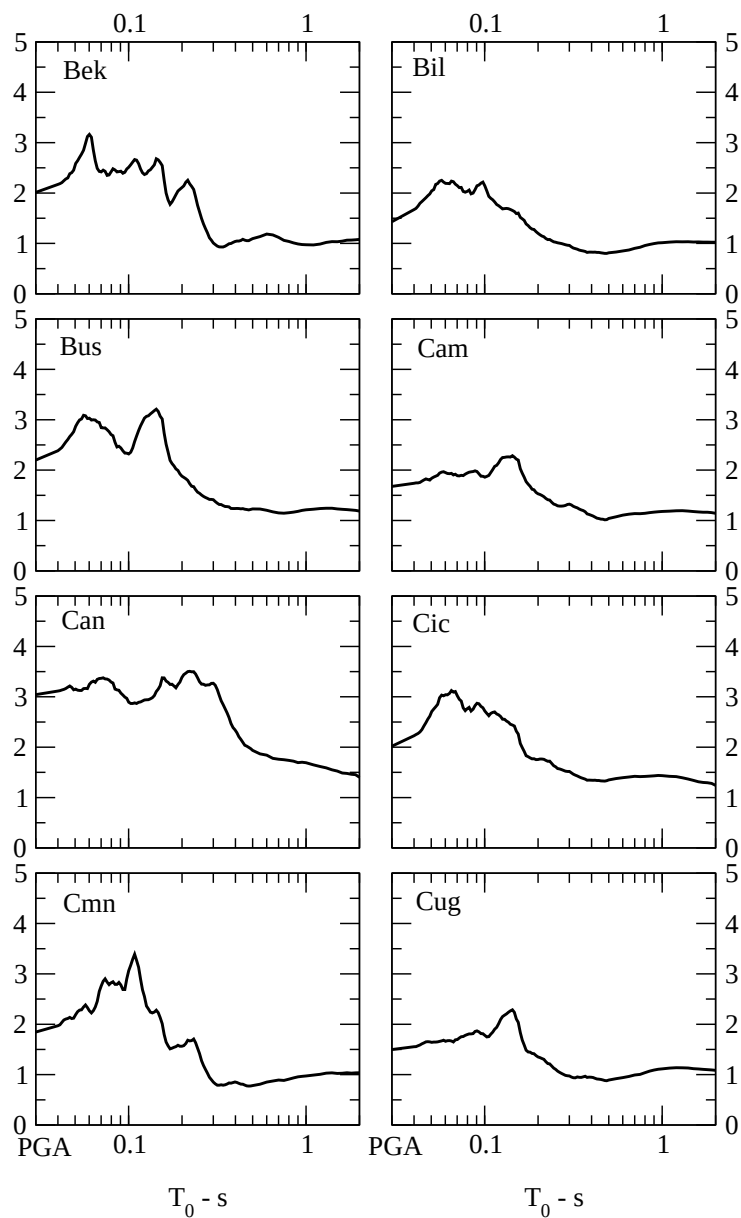


Figura 25: Rapporti degli spettri di risposta calcolati (RSA) nei vari siti indagati rispetto a quello ottenuto dall'analisi della pericolosità sismica che è stato associato a un generico sito posto sull'affioramento della Marnoso-Arenacea (RIF).

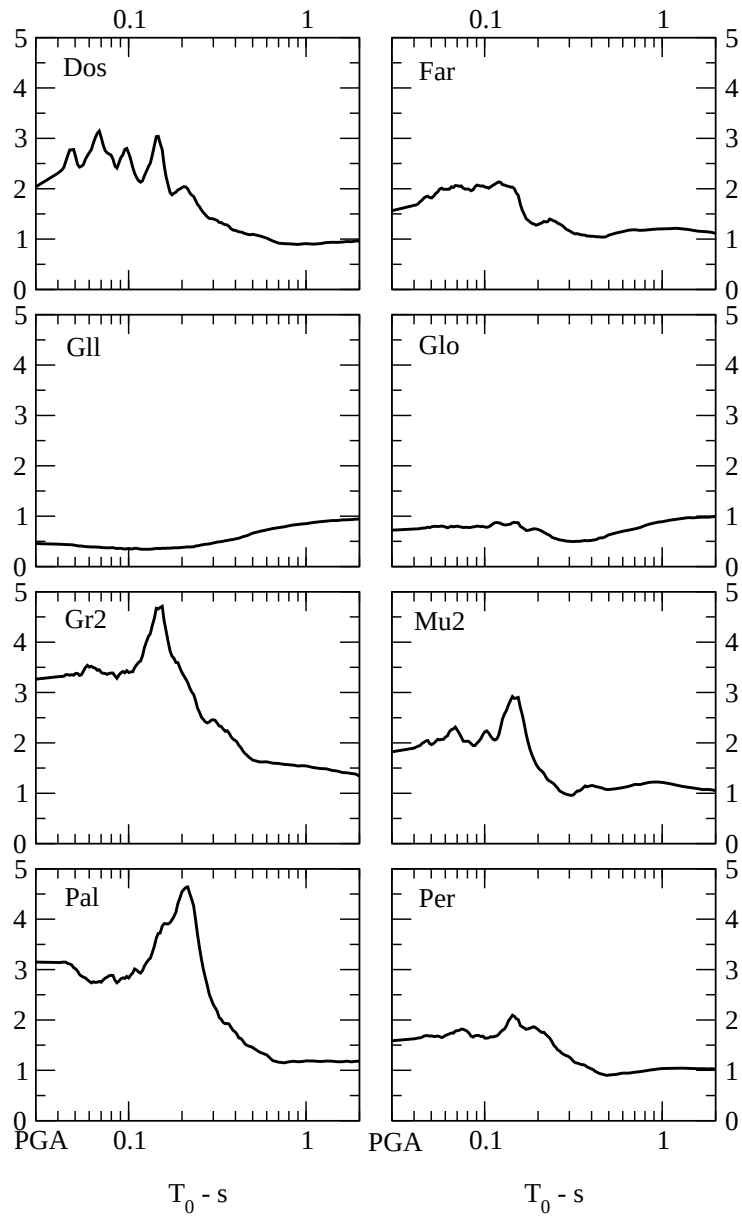


Figura 26: Come fig.25

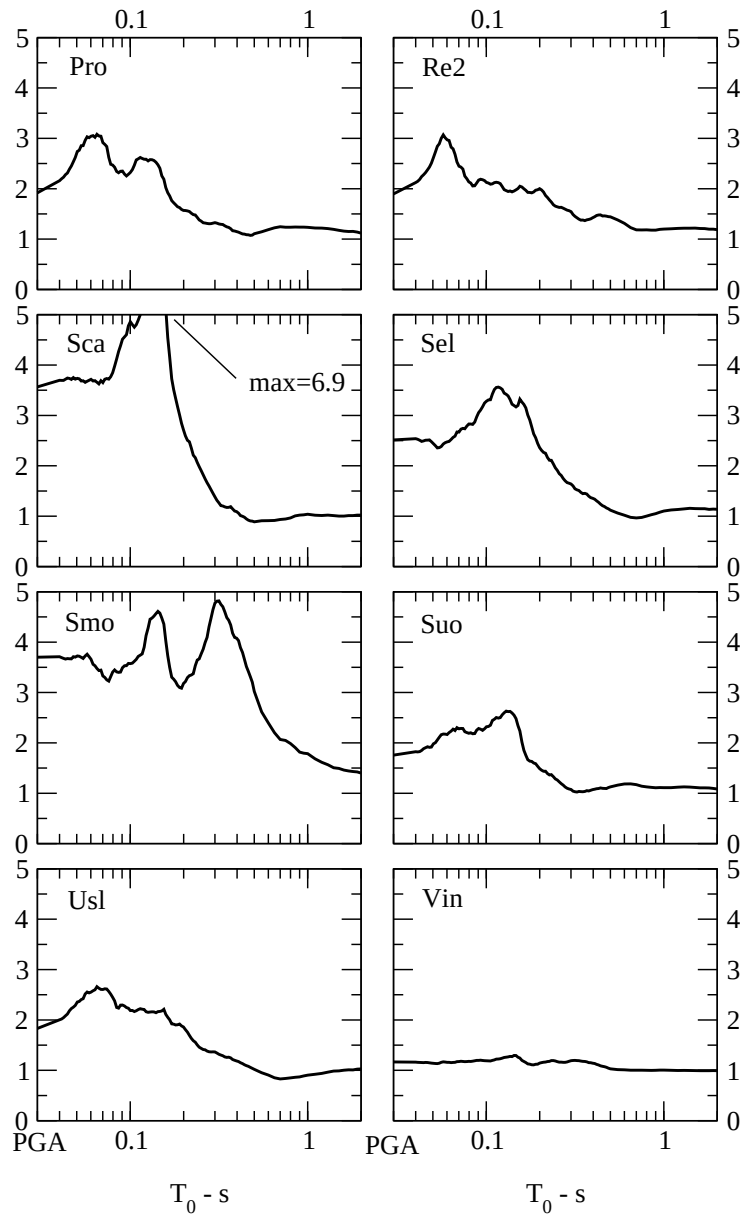


Figura 27: Come fig.25

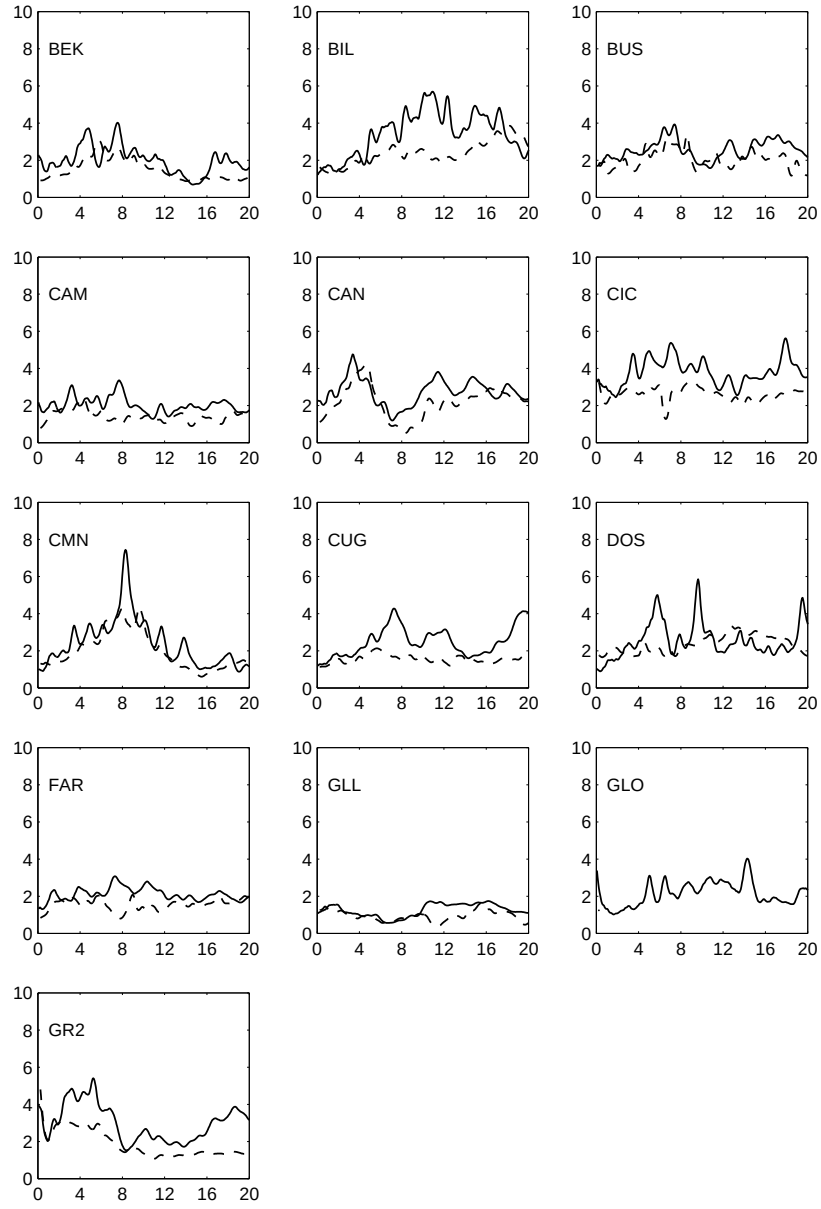


Figura 28: Funzioni ricevitore (linea continua) e rapporti di Nakamura (linea tratteggiata).

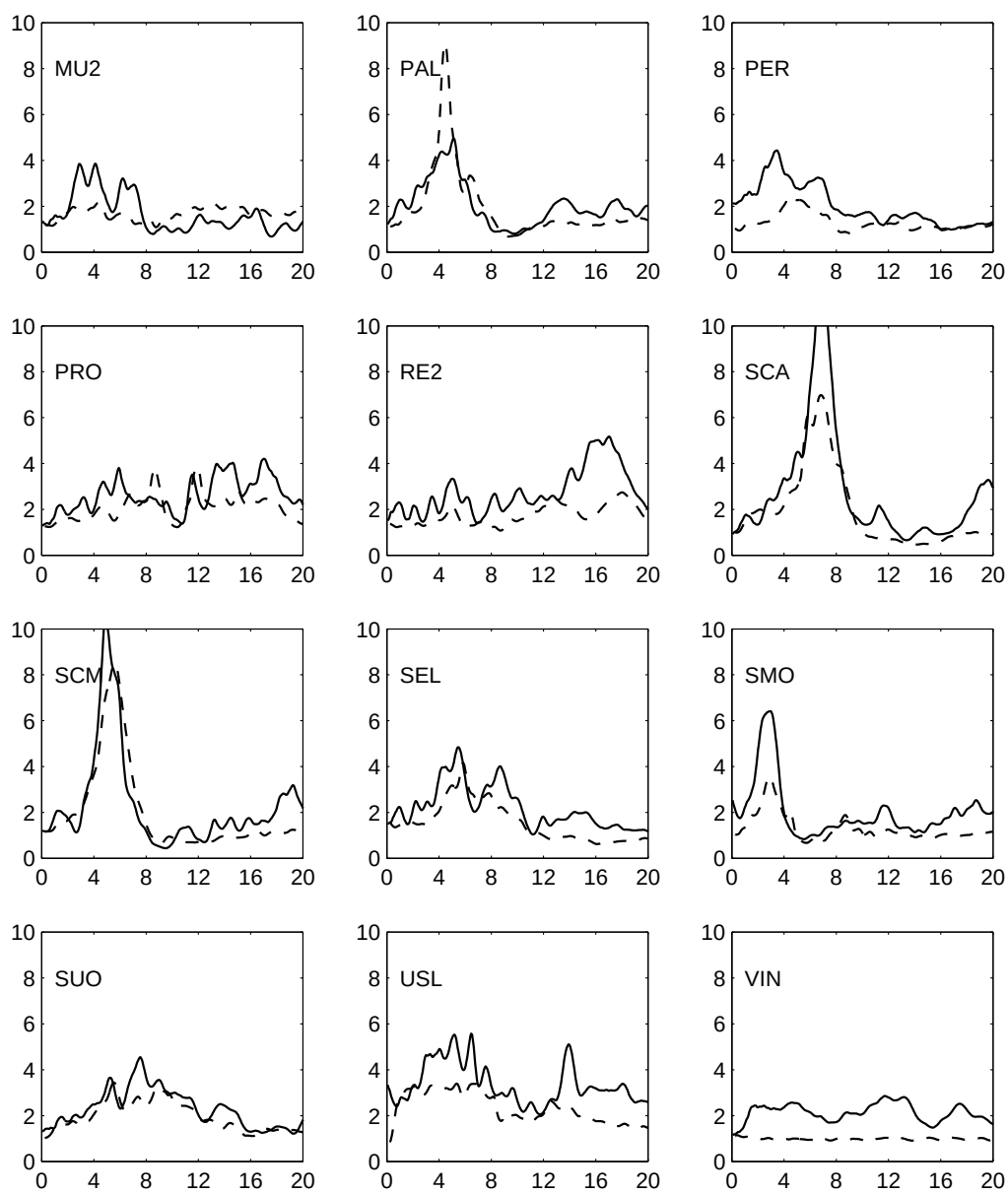


Figura 29: Come fig.28

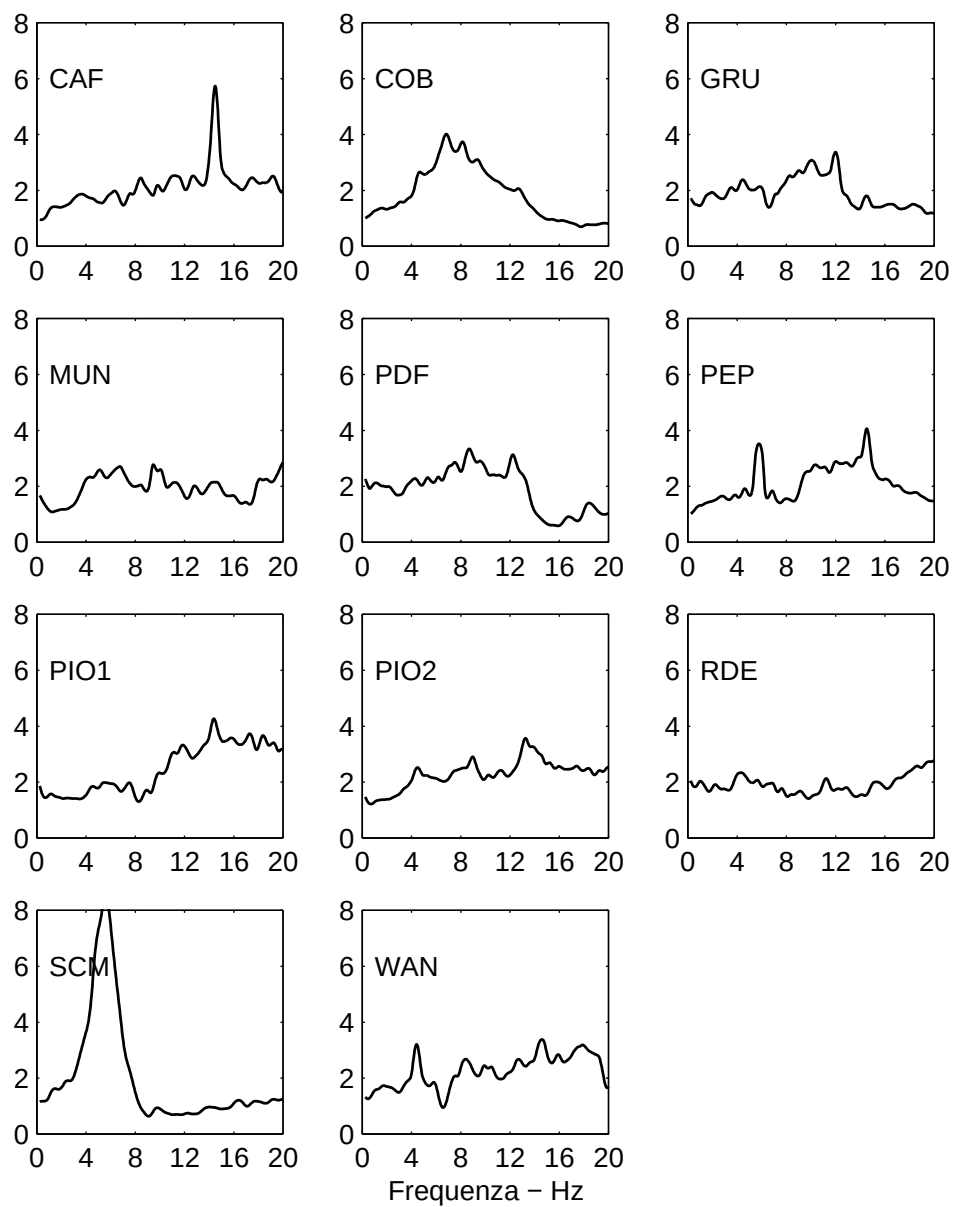


Figura 30: Rapporti di Nakamura in siti aggiuntivi.

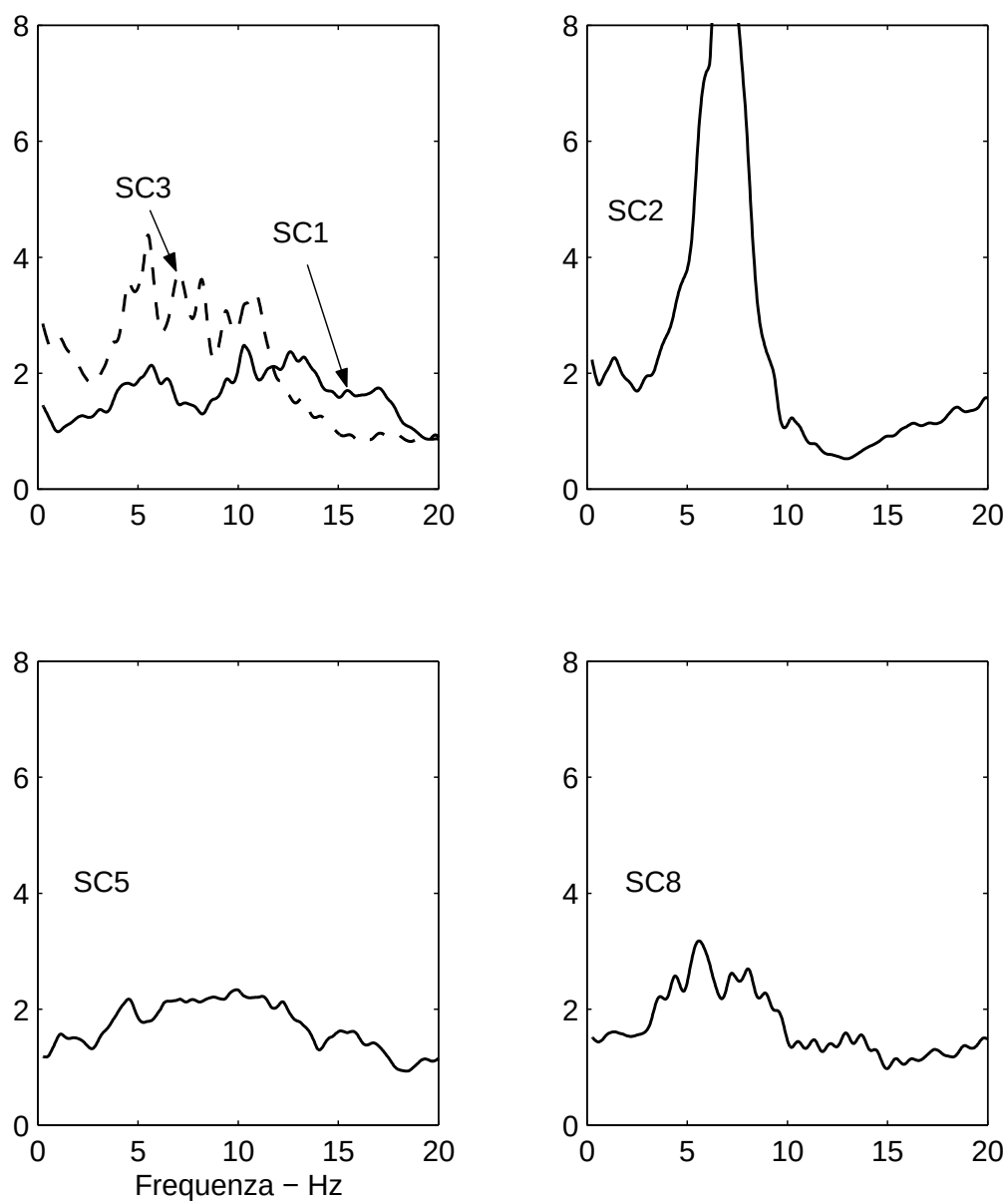


Figura 31: Rapporti di Nakamura nei pressi dell'Ospedale San Camillo.

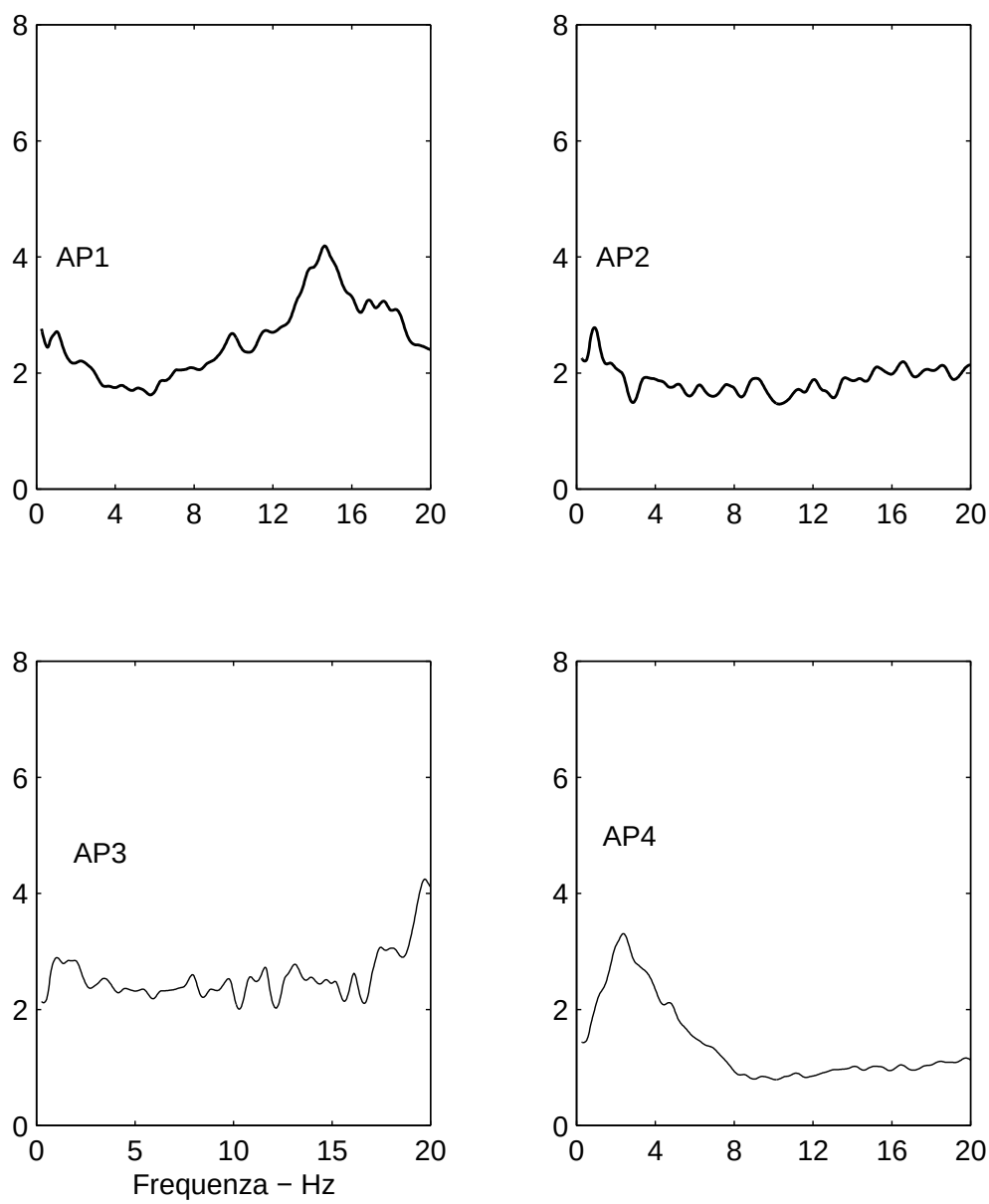


Figura 32: Rapporti di Nakamura sulle argille plioceniche.

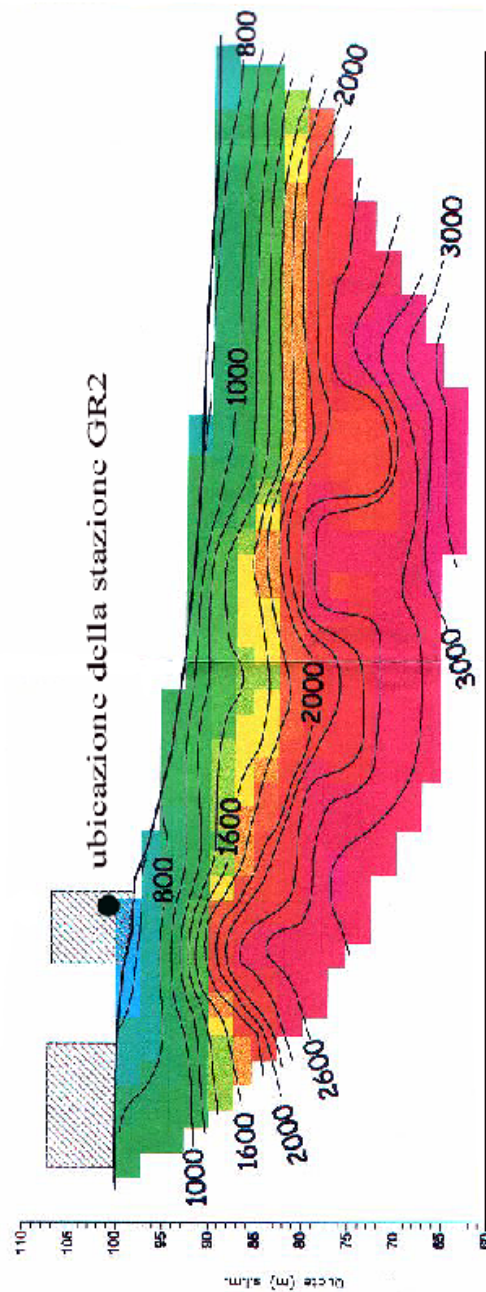


Figura 33: Profilo sismico tomografico eseguito nei pressi di "Grotta": i valori di velocità si riferiscono alle onde P.

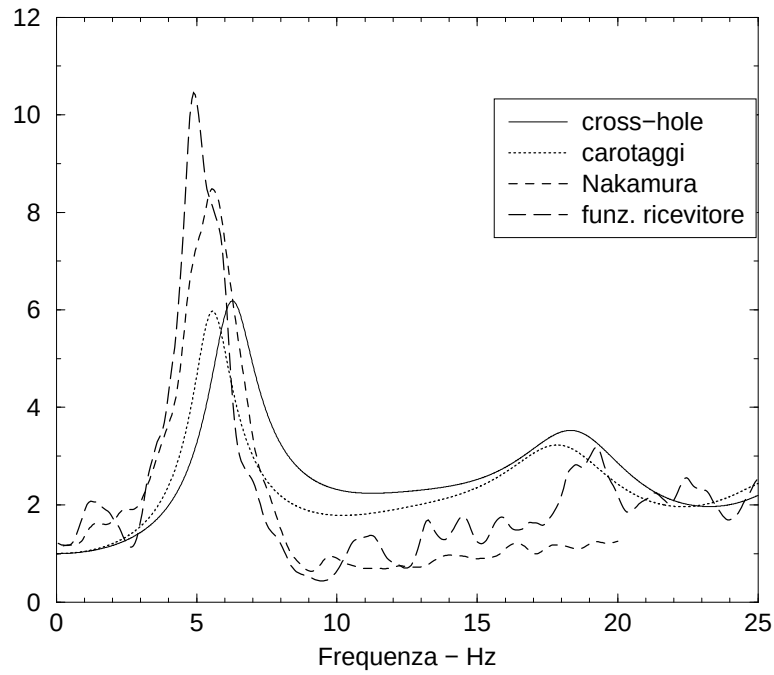


Figura 34: Funzioni di trasferimento per il sito SCM ottenute dai dati di cross-hole e carotaggi, rapporto di Nakamura e funzione ricevitore.

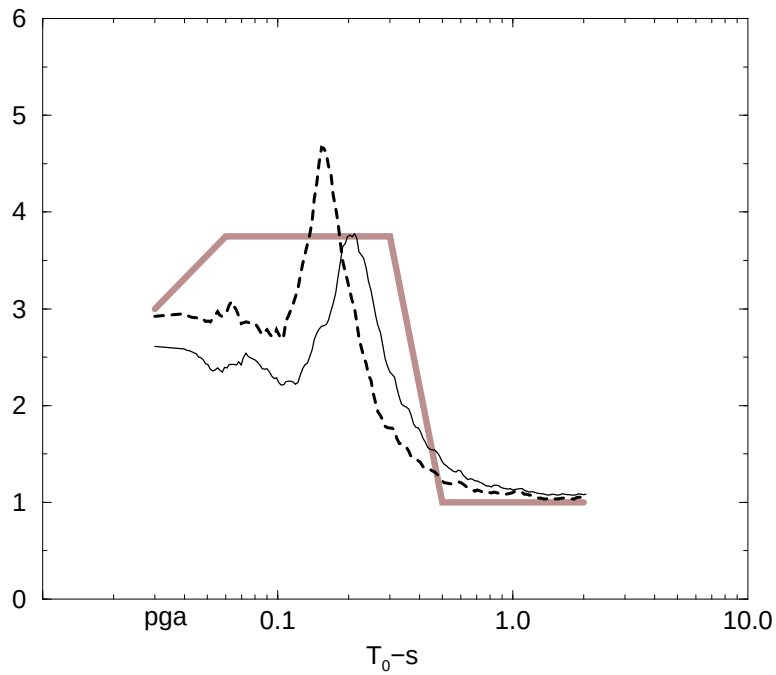


Figura 35: Amplificazioni spettrali simulate per il sito SCM. Linea tratteggiata : caso lineare, linea continua : caso non lineare. In neretto il fattore di amplificazione spettrale proposto per la zona 3.