



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



**Convenzione siglata tra il Dipartimento Scienze della Terra
dell'Università "Sapienza" di Roma ed il Comune di
Frosinone, d'intesa con la Regione Lazio.**

**"Studi inerenti il progetto pilota di Microzonazione
sismica del territorio comunale"**

Relazione conclusiva

Luglio 2018

Sommario

1. Premessa	1
2. Inquadramento geologico e geomorfologico dell'area oggetto di studio	2
3. Inquadramento delle conoscenze acquisite sulla unità litologica del Flysch marnoso arenaceo della "Formazione di Frosinone"	3
4. Misure di rumore sismico ambientale HVSR	6
5. Analisi di Livello 2 di Microzonazione sismica per la valutazione del fattore di amplificazione atteso per la formazione del "Flysch di Frosinone"	13
6. Analisi quantitativa della compatibilità fra i parametri di scuotimento registrati su affioramento di Flysch e il modello di scuotimento previsto per il bedrock sismico nel quadro della pericolosità sismica nazionale.	15
Descrizione del dataset utilizzato	17
Elaborazione dei dati	18
7. Conclusioni	31
8. Bibliografia	33
9. Allegati	34

1. Premessa

La presente relazione espone i risultati conclusivi delle attività svolte nell'ambito del Contratto di Ricerca siglato in data 15 luglio 2015 dal Dipartimento Scienze della Terra (DST) dell'Università "Sapienza" di Roma ed il Comune di Frosinone, d'intesa con la Regione Lazio, avente per oggetto **"Studi inerenti il progetto pilota di Microzonazione sismica del territorio comunale"**.

In linea con quanto previsto dall'Allegato Tecnico al sopra citato Contratto di Ricerca, sono riportati i risultati relativi alla seconda parte delle attività, inerenti allo "studio delle caratteristiche sismiche del Flysch della Formazione di Frosinone ed in particolare dell'eventuale suo comportamento quale *bedrock* sismico".

A tale riguardo, le attività di indagine sono riprese, dopo una interruzione causata dalla fase emergenziale seguita alla sequenza sismica 2016-2017 verificatasi in Italia centrale a far data dal 24 agosto 2016 e che ha richiesto il pieno impegno dei ricercatori del Gruppo di Lavoro DST Sapienza-ENEA, nel mese di Aprile 2018.

Le indagini sono state svolte attraverso:

- un sopralluogo preliminare effettuato da personale incaricato dal DST nei luoghi oggetto di studio per individuare siti adatti al posizionamento delle stazioni di misura. A tal fine, ci si è avvalsi della collaborazione dell'Ufficio Tecnico del Comune di Frosinone ed in particolare del Dott. Geologo Marco Spaziani;
- una campagna di misure di rumore sismico ambientale focalizzata sul centro storico di Frosinone;
- la caratterizzazione sismica del litotipo arenaceo-marnoso afferente al Flysch della Formazione di Frosinone attraverso analisi quantitativa della compatibilità fra i parametri di scuotimento registrati su affioramenti di Flysch e il modello di scuotimento previsto per *bedrock* sismico nel quadro della pericolosità sismica nazionale;
- le valutazioni conclusive dello studio oggetto del Contratto di Ricerca, basate anche sui risultati precedentemente acquisiti nella prima fase e già riportati nella relazione illustrativa del giugno 2016 (GdL DST Sapienza-ENEA).

Gli studi di Microzonazione sismica sono finalizzati alla suddivisione del territorio in "zone" alle quali è possibile attribuire per via quantitativa analoghi fattori di amplificazione sismica; essi consentono, inoltre, di individuare zone interessate da eventuali fenomeni di instabilità sismoindotta (tra i quali frane, liquefazioni e spostamenti lungo faglie). Gli studi di MS studi sono organizzati in tre livelli di approfondimento come previsto dal documento di indirizzo del DPC "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" (ICMS, 2008); dato il loro contenuto tecnico essi sono da ritenersi strumenti basilari per la pianificazione territoriale in condizioni pre- e post-sisma.

La Regione Lazio ha recepito la OPCM n. 3907/2010 ed ha emanato la D.G.R. Lazio n.545/10 "Linee guida per l'utilizzo degli Indirizzi e criteri per gli studi di microzonazione sismica nel Lazio"

(sito web http://www.regione.lazio.it/prl_ambiente/); la Regione Lazio ha individuato inoltre una serie di “Comuni pilota” sui quali approfondire gli studi di microzonazione sismica finanziando i progetti di studio. Il Comune di Frosinone è stato selezionato fra i Comuni pilota per approfondire la risposta dinamica del Flysch argilloso-arenaceo (“Formazione di Frosinone “auct.) e valutare la possibilità di assimilare il suo comportamento a quello di *bedrock* sismico, così come definito dalla Regione Lazio mediante la D.G.R. n. 490/2011, in deroga agli ICMS e in accordo con le NTC 2008, che autorizza a includere tra le Zone Stabili tutte le aree ove sia presente un substrato rigido affiorante entro i 3 m dal p.c., non degradato, con $V_s > 700$ m/s, senza fenomeni di instabilità presenti e acclività \leq di 30° .

2. Inquadramento geologico e geomorfologico dell'area oggetto di studio

L'assetto geologico e geomorfologico del Comune di Frosinone è stato ampiamente descritto nella “Relazione illustrativa del Giugno 2016” (Scarascia Mugnozza et al. 2016) a cui si rimanda per l'inquadramento geomorfologico dell'area.

La Fig.1 riporta la carta delle pendenze, estratta da tale relazione, che evidenzia:

- l'assenza di rilievi particolarmente acclivi nel territorio del comune di Frosinone (pendenze massime di 24°);
- la suddivisione del territorio comunale in due settori
 - settore orientale, caratterizzato dal Flysch argilloso-arenaceo della Formazione di Frosinone (Accordi, 1963)
 - settore occidentale, subpianeggiante, compreso tra le due aste fluviali del fiume Sacco a sud e fiume Cosa ad est, in cui sono presenti depositi alluvionali, travertini e piroclastiti del vulcanismo Pleistocenico.

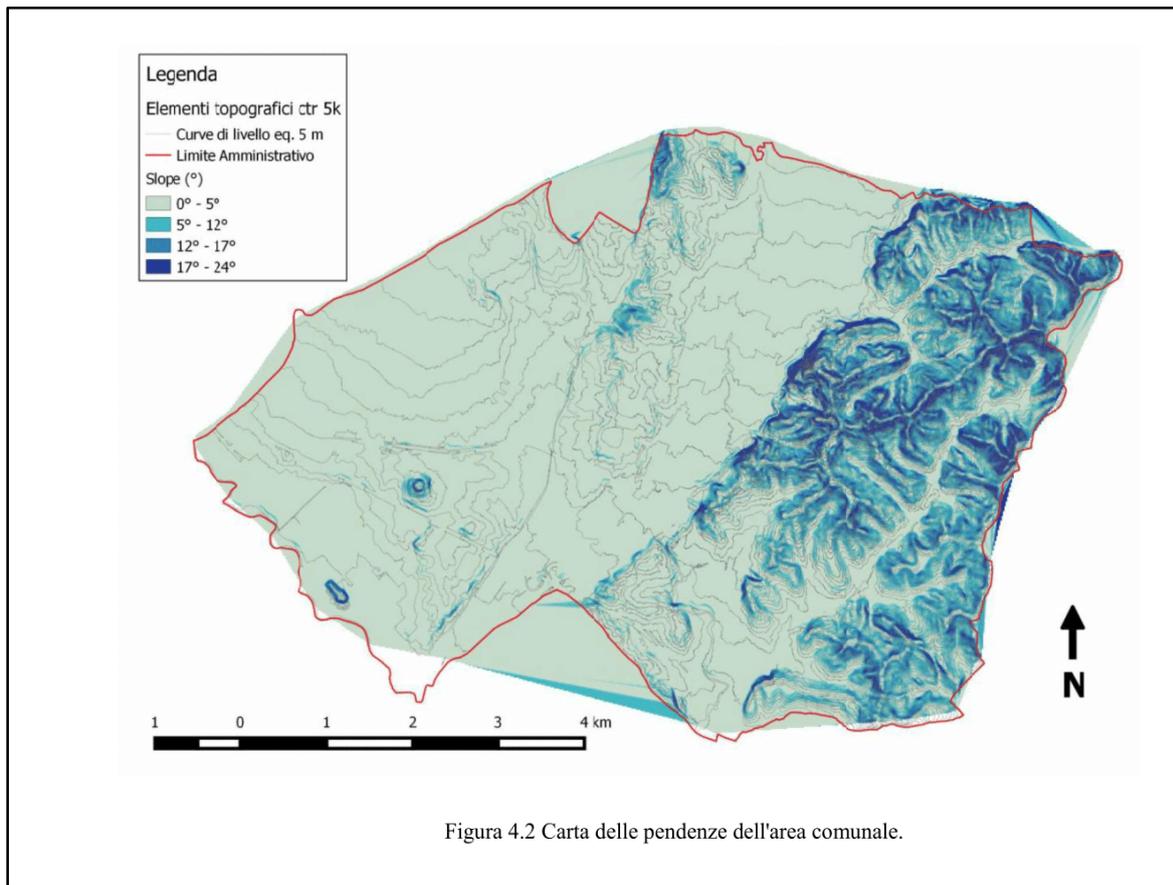


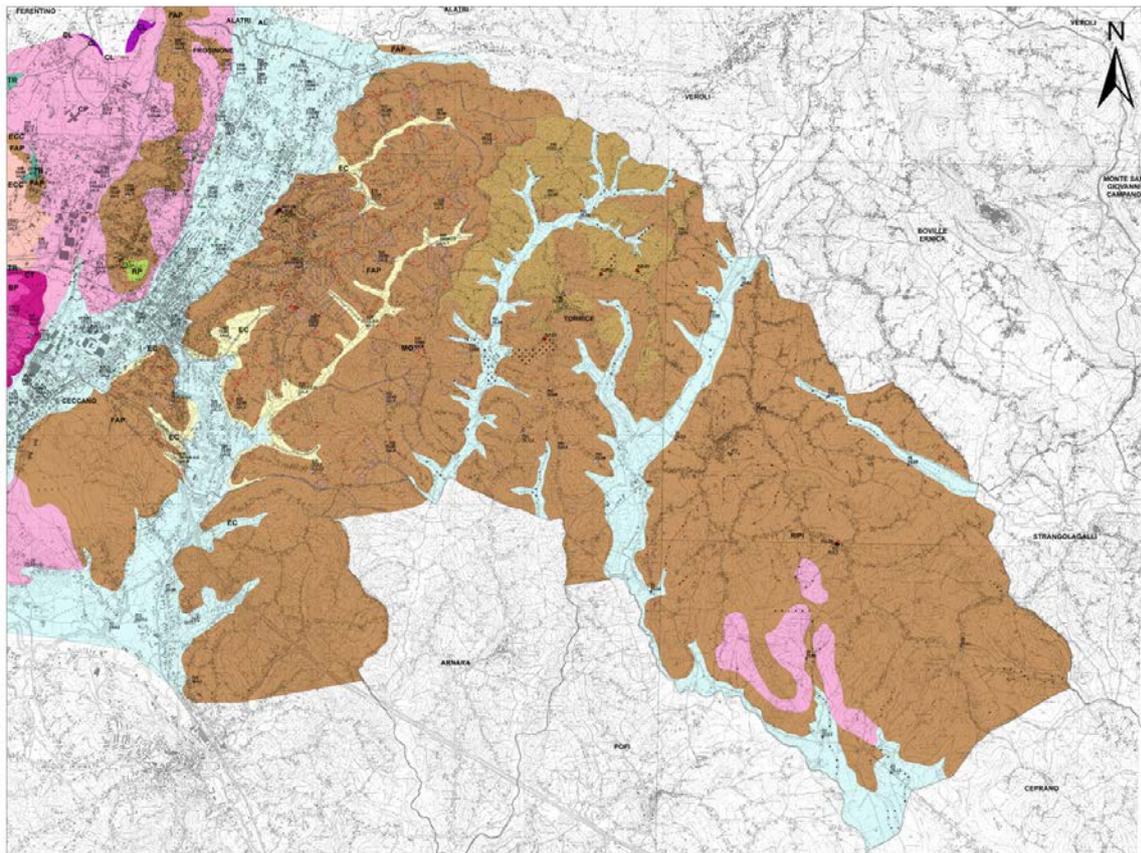
Figura 1: Dalla “Relazione Illustrativa del giugno 2016 - Microzonazione sismica livello 1”, Figura 4.2 Carta delle pendenze dell'area comunale di Frosinone.

E' stata posta particolare attenzione al settore orientale in cui affiora il Flysch della “Formazione di Frosinone” di seguito trattata in dettaglio.

3. Inquadramento delle conoscenze acquisite sulla unità litologica del Flysch marnoso arenaceo della “Formazione di Frosinone”

L'unità litologica del Flysch marnoso-arenaceo della “Formazione di Frosinone”, ampiamente descritta nella “Relazione descrittiva del giugno 2016”, è di età Tortoniana (11.6 ÷ 7.2 Ma) e costituita da alternanze di bancate di arenarie, intercalate da strati di argille di minore spessore. Lo spessore totale della formazione supera i 500 metri.

Sono stati analizzati i dati geologici e geofisici a disposizione dagli studi di MS 1° livello per i comuni di Frosinone, Ceccano, Torrice e Ripi (Fig. 2)



Terreni di copertura

- RP** Terreno di riporto
- EC** Depositi eluviali e colluviali a granulometria sabbioso-limoso prodotto dell'alterazione della Formazione Marnoso-Arenacea.
- AL** Depositi alluvionali costituiti principalmente da alternanze di livelli argilloso-limosi e livelli sabbiosi misti a cineriti eluviate (F. Sacco) e sabbioso-ghiaiosi (F. Cesa).
- ECC** Depositi eluviali e colluviali limoso-argillosi associati a cineriti sabbiose rimaneggiate con abbondanti lapilli e intercalazioni di travertini da detritici a compatti.
- TR** Travertini da compatti a sabbiosi, con resti di malacofauna dulcicola e di vegetali, a diversi livelli della successione Quaternaria.
- CP** Cineriti ocree e rosicce, interessate da avanzati processi di pedogenizzazione, associate talvolta a sedimenti palustri torbosi, livelli sabbiosi e ciottolame calcareo (Fluvio-lacustre antico). Presenza talvolta di tufi litoidi in banchi isolati. Si trovano sovrastanti o eteropiche alle unità vulcaniche.
- CS** Cineriti a granulometria prevalentemente siltitica in strati sottili (Apparato vulcanico di Selva dei Muli).
- BP** Cono di breccie piroclastiche (Apparato vulcanico di Selva dei Muli).
- CL** Colate leucitiche (Centro vulcanico di Tecciena).
- CT** Alternanza di cineriti a granulometria siltitica e piroclastiti lapilliche, tufi litoidi fratturati.
- FAP** Flysch, torbiditi arenaceo-pellicche in alternanze rismiche, in strati piano paralleli da metri a molto spessi.
- MO** Calcarei-marnosi e marne a fessurazione scagliosa con microfauna ad Orbulina.

Instabilità di versante

- 3011** Crollo o ribaltamento - attiva
- 3012** Scorrimento - attiva
- 3013** Colata - attiva
- 3014** Complessa - attiva
- 3015** Non definito - attiva

Elementi tettonico strutturali

- Faglia diretta non attiva (certa)
- Faglia diretta non attiva (incerta)
- Faglia inversa non attiva (certa)
- Faglia con cinematisimo non definito non attiva (incerta)

Elementi geologici e idrogeologici

- Giacitura degli strati
- Giacitura degli strati rovesciati
- Pozzo o sondaggio che ha raggiunto il substrato geologico (profondità in m)
- Pozzo o sondaggio che non ha raggiunto il substrato geologico (profondità in m)
- Traccia della sezione geologica rappresentativa del modello del sottosuolo

Figura 2: Stralcio della carta geologico-tecnica in cui si evidenziano le unità litologiche presenti nei comuni di Frosinone, Torrice e Ripi.

Sulla base dei risultati ottenuti nei succitati studi, sono stati distinti due litotipi, in relazione ai diversi valori di Vs misurati, come deducibile dalla tabella (Tab. 1) sotto riportata:

- formazione di Frosinone, costituita da Flysch marnoso-arenaceo nella parte orientale del comune di Frosinone, parte del comune di Ceccano, Torrice e Ripi
- formazione di Torrice costituita da Flysch arenaceo presente nella parte settentrionale del comune di Torrice.

Flysch di Frosinone	Arenaria di Torrice
0 – 5 m alterazione superficiale: Vs ≈ 150÷300 m/s	0 – 5 m alterazione superficiale: Vs ≈ 100÷200 m/s
5 – 30 m Flysch superficiale: Vs ≈ 500÷600 m/s	5 – 20 m Arenaria: Vs ≈ 300÷350 m/s
	20 – 30 m Flysch: Vs ≈ 400÷500 m/s
30 – 50 m Flysch profondo: Vs ≈ 1000÷1040 m/s	

Tabella 1: Caratterizzazione di due litotipi in base ai diversi valori di Vs.

Lo studio dei dati pregressi evidenzia, su queste formazioni, prove HVSr (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, Nakamura,1989) tendenzialmente non risonanti o con risonanze a frequenze compatibili con alterazione superficiale della formazione entro i primi 10 m.

Nel comune di Frosinone sono stati effettuati studi per l'intervento di messa in sicurezza e ripristino della viabilità sulla via E. Biondi; in particolare è stato eseguito un sondaggio in corrispondenza del quale è stata effettuata una prova Down-hole (DH), una prova HVSr e n. 6 prove MASW. I risultati del sondaggio e della prova DH sono sintetizzati nella seguente tabella (Tab. 2):

Sondaggio P144	DH
0-4.5m Riporti	0-6m Vs ≈ 304 m/s
4.5-50m Flysch	6-26m Vs ≈ 540 m/s
	26-50m Vs ≈ 1014 m/s

Tabella 2: Sintesi dei dati del sondaggio P144 e del DH effettuato nel foro del sondaggio. Dati tratti dalla relazione geologica relativa agli studi di messa in sicurezza della via E. Biondi (Geoplan Consulting, 2013).

Sempre nella stessa area, sono state eseguite n. 6 prove **MASW** (L19,20,21,22,23,24) i cui risultati possono essere così sintetizzati:

0 - 7÷8m **Vs 290÷360 m/s**

7÷8 - 16÷18m **Vs 550÷710 m/s**

> 16÷18m – **Vs 910÷950 m/s**

La prova **HVSR** – P145 è stata posizionata in prossimità del sondaggio P144 (eseguito nelle vicinanze dell'area in frana) e non mostra picchi di risonanza significativi.

Si osserva che i risultati appena descritti sembrano poco in accordo l'uno con l'altro: quelli delle MASW suggeriscono una variazione di velocità con la profondità meno netta rispetto ai dati del DH e soprattutto questi ultimi non sono in accordo con i risultati della prova HVSR: un contrasto di velocità da 550 a più di 1000 m/s ad una profondità di 26 m dovrebbe dare una risonanza piuttosto evidente intorno a 4-5 Hz, mentre la curva HVSR è chiaramente non risonante (NR).

4. Misure di rumore sismico ambientale HVSR

In questo paragrafo vengono presi in esame i risultati delle misure di rumore sismico ambientale eseguite sul Flysch del Comune di Frosinone, sia nella campagna di aprile 2018, sia nelle precedenti campagne di misura (Scarascia Mugnozza, G. et al., 2016). Le misure di rumore ambientale del 2018 sono state realizzate con un tromometro digitale "Tromino" e strumentazione velocimetrica della SARA Instruments. I dati acquisiti con strumentazione SARA sono stati processati con il codice Geopsy (www.geopsy.org) mentre quelli con "Tromino" sono stati processati con il codice "Grilla" fornito da MICROMED.

Di seguito, la Tab. 3 elenca sia le misure realizzate nella campagna di Aprile 2018, da FRO01 a FRO21, sia le misure precedenti effettuate su Flysch nel Comune di Frosinone:

cod_staz	Coord x	Coord y	Durata (min)	f0	affid	liv. f0	NOTE
fr03	360943	4613593	20	NR	B2		
fr17	363929	4612623	20	NR	A2		
fr18	364726	4612576	20	NR	A2		
fr20	364829	4611473	20	NR	B2		

fr21	362824	4610447	20	4.0	B1	5	Prossimità area in frana
fr22	363888	4610503	20	NR	A2		
fr23	362947	4609558	20	NR	B2		Prossimità area in frana
fr27	361835	4608359	20	NR	B2		
fr30	364401	4609247	20	NR	B2		
fr31	364003	4608451	20	NR	B2		
fr32	364158	4607775	20	NR	A2		
fr33	362927	4607461	20	8	B1	4,5	
fr34	360895	4608451	20	>10.0	B1	3	
fr40	365548	4612261	20	NR	B2		
FR60	360257	4611472	60	NR	A2		
FR61	359981	4611454	60	NR	A2		
FRO01	362643	4611204	60	NR	B2		
FRO02	362818	4611085	60		C		
FRO03	362847	4610639	60	NR	B2		
FRO04	362940	4610590	60	NR	A2		
FRO05	363033	4611077	60		C		
FRO06	363482	4611396	60	NR	B2		
FRO07	363380	4611702	60		C		

FRO08	362867	4611709	60	8	B1	3	Su frana
FRO09	363043	4611614	60	NR	B2		
FRO10	362412	4611172	60		C		
FRO11	362854	4611059	60	2	B1	2,5	
FRO12	362588	4611189	60	NR	B2		
FRO13	363145	4610634	60	NR	A2		
FRO14	363229	4610686	60	NR	B2		
FRO15T	363235	4610765	60	12	A1	4	
FRO16	363314	4610841	60		C		
FRO17T	363305	4610799	35	9	B1	2,5	
FRO18T	363351	4610893	60	NR	A2		
FRO19	362932	4611679	60	NR	A2		imbocco tunnel, su frana
FRO20	362620	4610945	60	NR	B2		
FRO21	362912	4611694	60		C		Su frana
P145-DH	362512	4611280		NR	A2		Su frana

Tabella 3: Sintesi delle misure realizzate nella campagna di Aprile 2018 e delle misure della fase precedente nello stesso progetto. (Gruppo di Lavoro Enea e DST "Sapienza", 2016-2018)

Nella stessa Tab. 3 sono riportate, per ciascuna misura (colonna "cod_staz"), le coordinate x e y nel sistema di riferimento UTM-WGS84, la durata della misura, i valori di f0 e i relativi livelli (oppure il codice NR per le misure non risonanti); nella colonna "affidabilità" per ciascuna misura è stata assegnata una classe di affidabilità A1, A2, B1, B2, C, come proposto da Albarello e Castellaro (2011).

Il grafico di Fig.3 fa riferimento alla totalità delle misure effettuate nel Comune di Frosinone a fini di MS insieme a quelle relative alla campagna del 2018 ed esprime in percentuale la loro distribuzione in funzione della classe di affidabilità: si fa notare in particolare che le misure in classe C sono il 5% di tutte quelle effettuate nel territorio comunale.

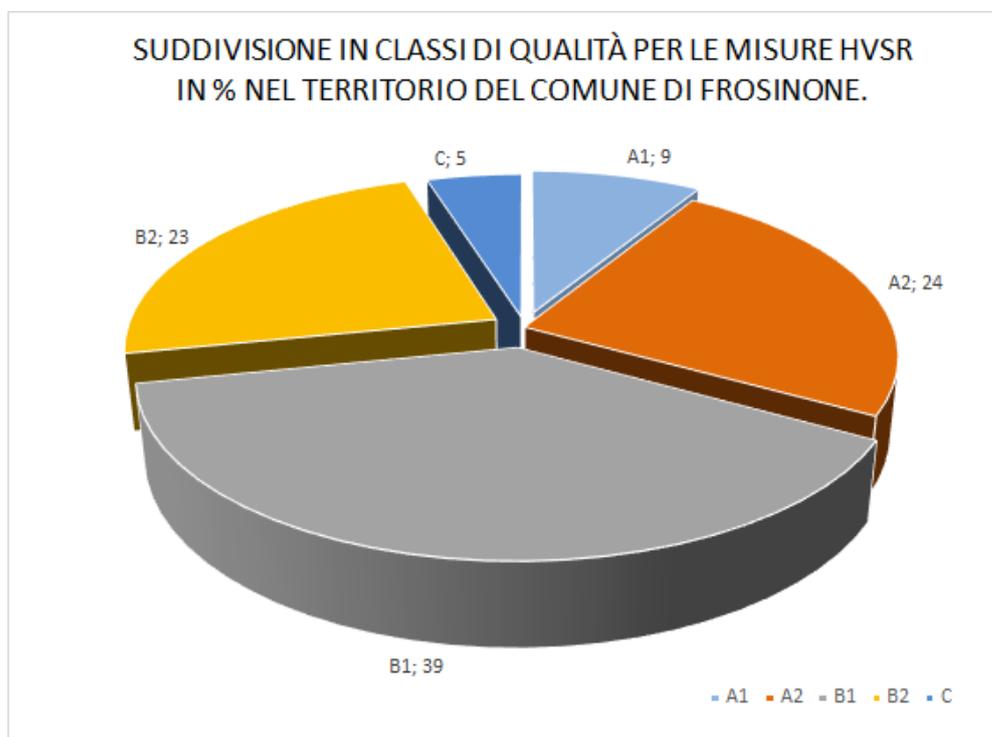


Figura 3: Distribuzione in classi di affidabilità (Albarelo e Castellaro, 2011) di tutte le misure di *noise* effettuate nel territorio comunale di Frosinone tra il 2013 e il 2018.

Nelle successive Fig.4 e Fig.5 è descritto il limite del comune di Frosinone entro il quale in blu sono localizzate le misure di *noise* precedentemente effettuate a fini di MS, mentre in giallo sono descritte le misure di *noise* effettuate nella campagna di Aprile 2018:

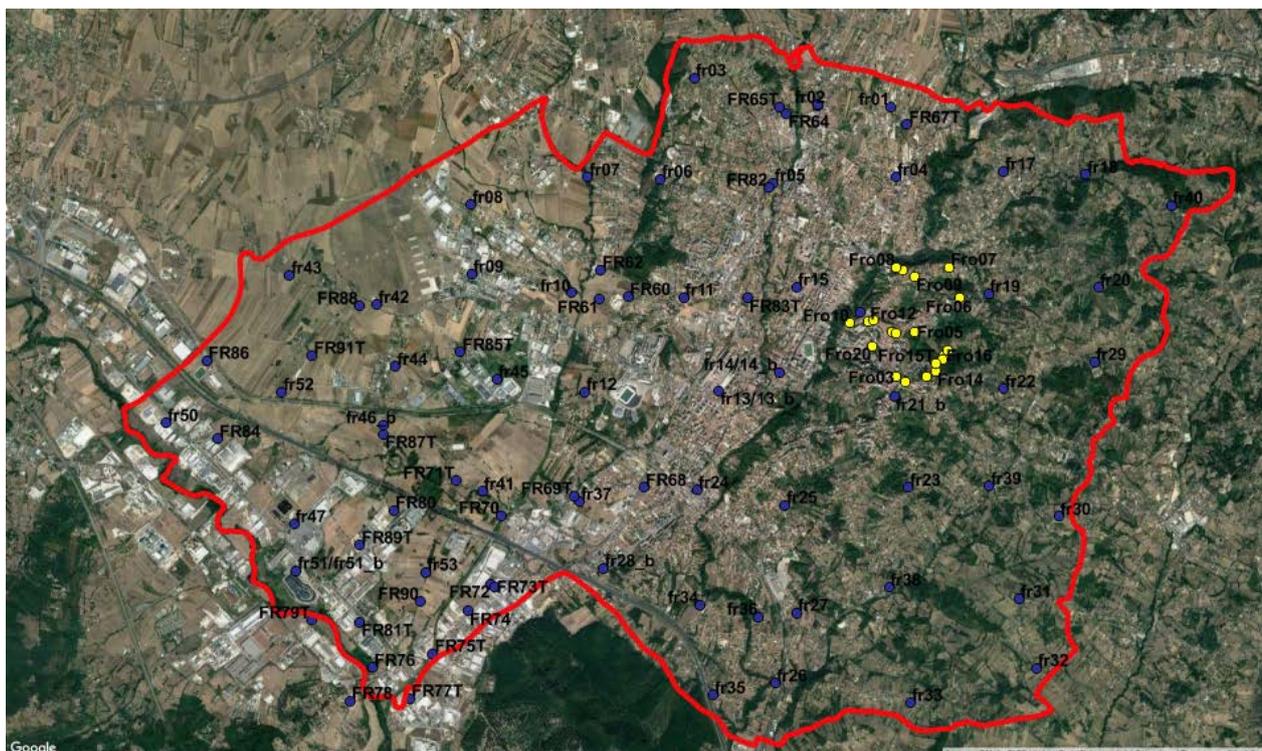


Figura 4: Localizzazione delle misure di *noise* (in giallo) realizzate nella campagna di aprile 2018 e delle misure pregresse (in blu) nel comune di Frosinone. La linea in rosso indica il limite del Comune di Frosinone.

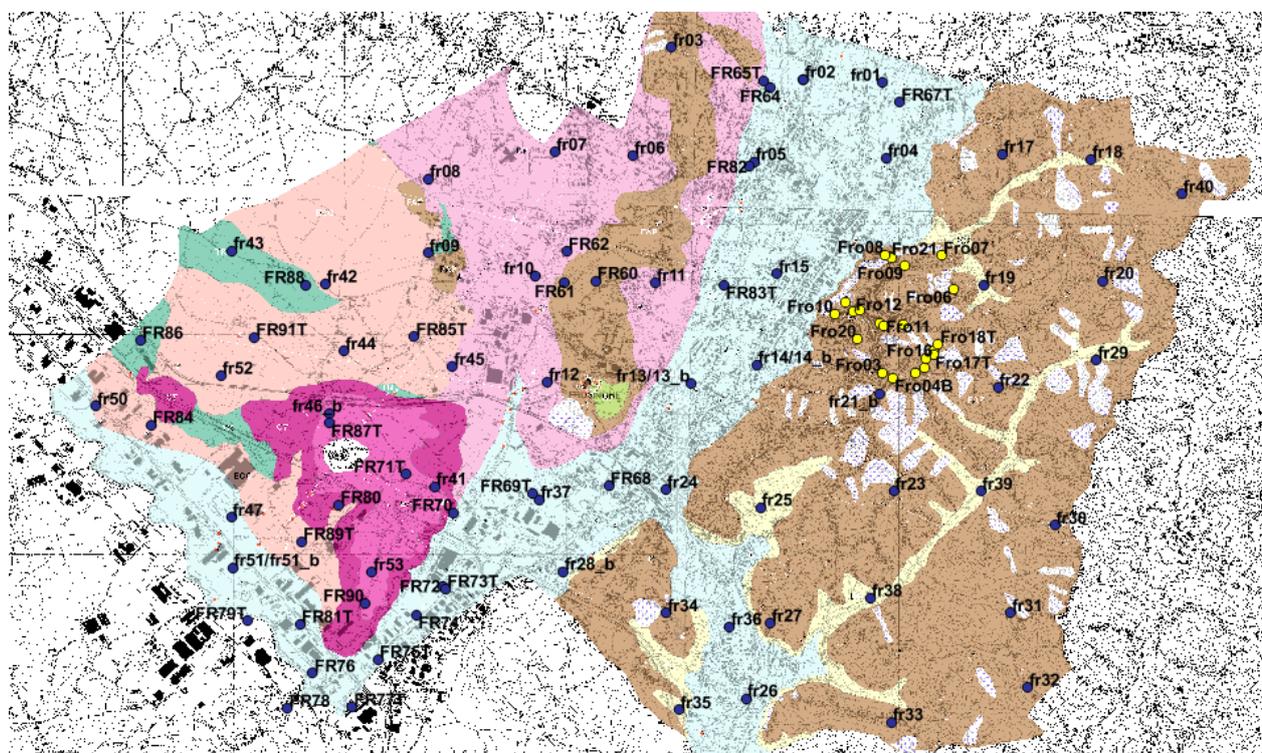


Figura 5: Localizzazione delle misure di *noise* (in giallo) realizzate nella campagna di aprile 2018 e delle misure pregresse (in blu) nel comune di Frosinone. Le misure sono state proiettate sulla carta geologico tecnica del Comune di Frosinone, la cui legenda è riportata in Fig. 2.

Considerando, invece, solo le misure HVSR complessivamente effettuate su Flysch nel territorio comunale di Frosinone, analogamente a quanto descritto nel grafico di Fig.3, vengono riportate le classi di qualità nel grafico di Fig.6.

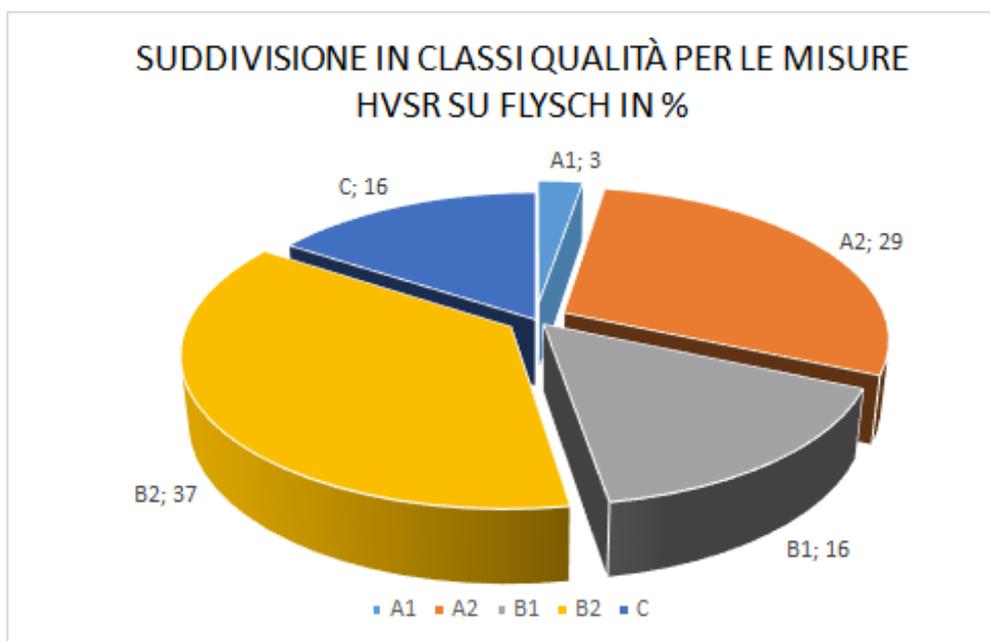


Figura 6: Distribuzione in classi dell'affidabilità (Albarelo e Castellaro, 2011) delle misure di *noise* su Flysch complessivamente effettuate nel Comune di Frosinone.

Dal confronto tra la Fig.3 e la Fig.6 si nota che, considerando solo le misure effettuate su Flysch, aumenta considerevolmente (da 5 a 16%) la percentuale di misure classificate C (non interpretabili/di difficile interpretazione): ciò è indicativo generalmente di situazioni con risonanze dubbie o probabilmente assenti.

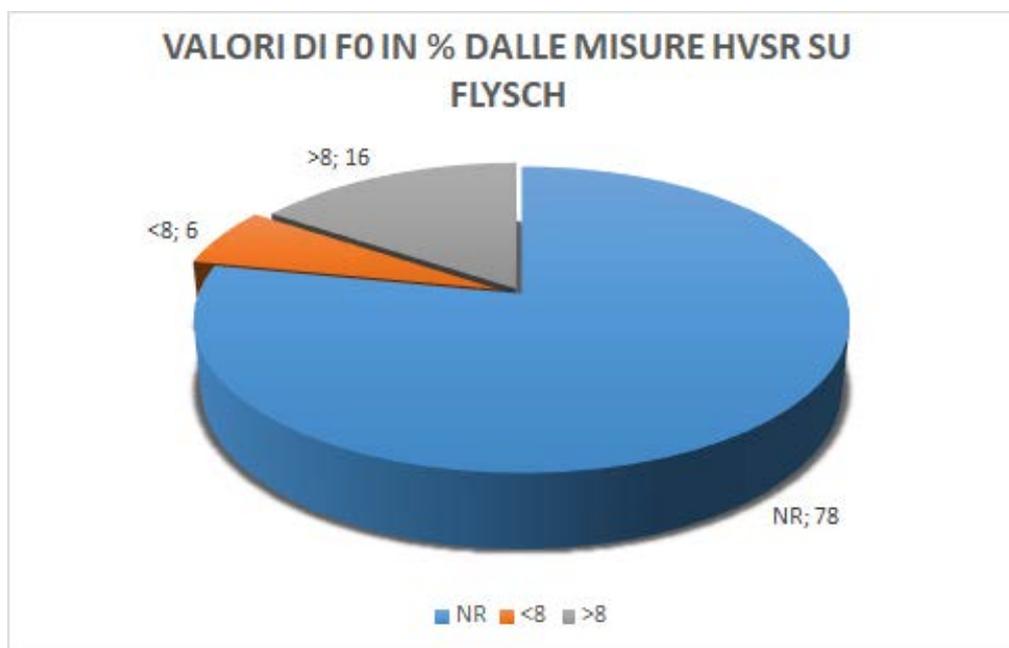


Figura 7: Distribuzione in classi % dei valori di f0 ottenuti dalle misure di *noise* su Flysch complessivamente effettuate nel Comune di Frosinone

Il grafico della Fig.7, ottenuto dai dati della Tab. 3, rappresenta i valori di f_0 ottenuti dalle misure di *noise* complessivamente effettuate su Flysch nel territorio comunale di Frosinone: si osserva che il 78% delle misure è classificato non risonante (NR) , il 6% delle misure ha $f_0 < 8$ Hz e il 16% ha $f_0 \geq 8$ Hz. Quest'ultima categoria può essere legata alla presenza di strati più superficiali alterati del Flysch della "Formazione di Frosinone" con uno spessore massimo di una decina di metri (in particolare, assumendo una velocità delle onde di taglio di 300 m/s nello strato alterato, $f_0 \geq 8$ corrisponderebbe ad uno spessore dello strato ≤ 9 m).

5. Analisi di Livello 2 di Microzonazione sismica per la valutazione del fattore di amplificazione atteso per la formazione del “Flysch di Frosinone”

Per valutare il livello del fattore di amplificazione atteso secondo il modello sismostratigrafico deducibile in base ai dati disponibili per il centro storico di Frosinone, sono stati utilizzati gli Abachi Regionali per gli studi di Livello 2 di Microzonazione Sismica, predisposti per la Regione Lazio ed approvati con DGR 490 del 21/10/2011.

Nella seguente tabella (Tab. 4) è riportata la successione stratigrafica media sintetizzata sulla base delle indicazioni fornite dal “Vademecum operativo per l’uso degli abachi regionali” (Tabella 4), in particolare: i) ogni unità deve avere uno spessore $h \geq 3$ m; ii) la differenza di V_s con l’unità contigua deve essere maggiore di 50 m/s; iii) l’andamento delle velocità V_s è calcolata come media equivalente per ogni unità geologico-geofisica individuata.

	Litologia	V_s media (m/s)
0-5 m	Coltre di alterazione superficiale costituita prevalentemente da ghiaie e sabbie	circa 300
5-30 m	Flysch alterato o fratturato nella predominante componente arenacea e marne da tenere a localmente compatte	circa 600
30-50 m	Arenarie prevalentemente litoidi e subordinate marne compatte	> 900

Tabella 4: Successione stratigrafica media sintetizzata sulla base degli abachi regionali.

Per la valutazione del fattore di amplificazione atteso (FH), viene preso l’abaco regionale predisposto per litologie assimilabili a sabbie di alterazione da arenarie (Fig. 8)

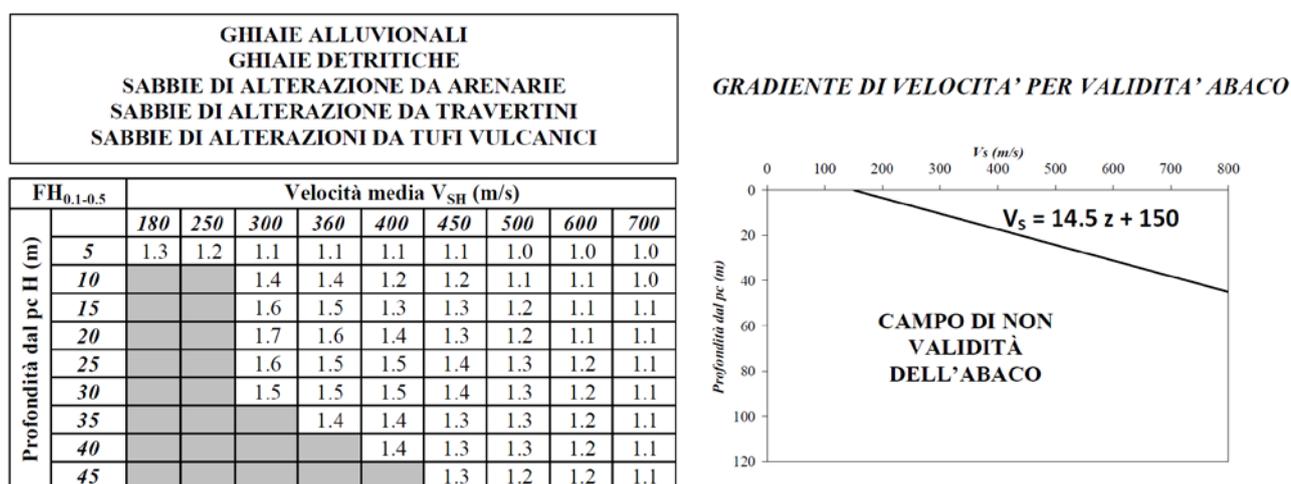


Figura 8: Abaco Regionale per le ghiaie alluvionali, detritiche e sabbie di alterazione.

La litologia prevalentemente in affioramento nel centro storico di Frosinone è rappresentata dal Flysch arenaceo-marnoso alterato, con uno spessore massimo di 30 m ed una velocità media delle Vs di circa 600 m/s.

Tali parametri di ingresso dell'abaco forniscono un valore di $FH(0.1-0.5 \text{ s}) = 1.2$ per l'intervallo di frequenza 2-10 Hz.

Nel 2014 lo stesso gruppo di lavoro del Politecnico di Milano, che ha realizzato gli abachi della Regione Lazio, ha predisposto un aggiornamento, peraltro ancora non recepito dalla Regione, con l'estensione del calcolo delle FH all'intervallo 0.5-1.0 s (Fig. 9; Pergalani F. e Compagnoni M., comunicazione personale), corrispondente ad un intervallo di frequenza di 1-2 Hz.

GHIAIE ALLUVIONALI GHIAIE DETRITICHE SABBIE DI ALTERAZIONE DA ARENARIE SABBIE DI ALTERAZIONE DA TRAVERTINI ROCCE ALTERATE E FRATTURATE										
$FH_{0.1-0.5}$		Velocità media V_{SH} (m/s)								
Profondità dal pc H (m)		180	250	300	360	400	450	500	600	700
	5	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0
	10			1.4	1.4	1.2	1.2	1.1	1.1	1.0
	15			1.6	1.5	1.3	1.3	1.2	1.1	1.1
	20			1.7	1.6	1.4	1.3	1.2	1.1	1.1
	25			1.6	1.5	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1
	30			1.5	1.5	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1
	35				1.4	1.4	1.3	1.3	1.2	1.1
	40					1.4	1.3	1.3	1.2	1.1
	45						1.3	1.2	1.2	1.1

$FH_{0.5-1.0}$		Velocità media V_{SH} (m/s)								
Profondità dal pc H (m)		180	250	300	360	400	450	500	600	700
	5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	10			1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	15			1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0
	20			1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0
	25			1.4	1.3	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0
	30			1.5	1.4	1.3	1.2	1.2	1.1	1.0
	35				1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.1
	40					1.5	1.4	1.3	1.1	1.1
	45						1.5	1.4	1.1	1.1

GRADIENTE DI VELOCITA' PER VALIDITA' ABACO

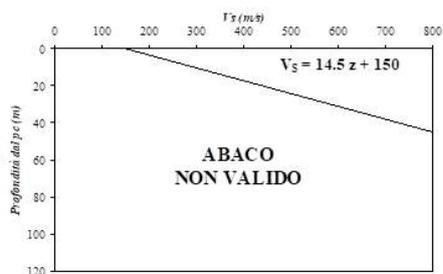


Figura 9 : Proposta di aggiornamento degli Abachi della Regione Lazio (Pergalani, F., Compagnoni, M.)

Come è lecito attendersi per questo intervallo di frequenze, il Fattore di Amplificazione decresce assumendo un valore $FH(0.5-1.0 \text{ s})$ di 1.1.

6. Analisi quantitativa della compatibilità fra i parametri di scuotimento registrati su affioramento di Flysch e il modello di scuotimento previsto per il bedrock sismico nel quadro della pericolosità sismica nazionale.

La presente attività di studio inizialmente prevedeva l'installazione di una rete velocimetrica temporanea sul Flysch di Frosinone per registrare eventi sismici e analizzare i relativi rapporti spettrali (SSR) rispetto ad una "stazione di riferimento" posizionata su un *bedrock* affiorante e caratterizzato da assenza di effetti amplificativi (Borcherdt, 1994). Purtroppo la crisi sismica iniziata il 24 agosto 2016 in Italia Centrale ha impedito la realizzazione di tale attività.

Tuttavia, poiché il Flysch affiorante nell'area di Frosinone può essere assimilato, per le sue caratteristiche di facies deposizionale, di rapporto quantitativo tra componente arenacea e pelitica e per range di variabilità dei parametri fisico-meccanici, al Flysch affiorante ad Amatrice (RI) che appartiene all'associazione pelitico-arenacea del membro pre-evaporitico della Formazione della Laga (Cacciuni et al., 2000), è stata valutata l'ipotesi di utilizzare per il presente studio i dati sismologici registrati durante la sequenza sismica dell'Italia Centrale. Infatti, durante tale sequenza sono state distribuite diverse stazioni di misura per il monitoraggio sismico del territorio, sia ai fini della migliore stima dei parametri di sorgente dei terremoti (rete temporanea gestita da INGV-Centro Nazionale Terremoti dati disponibili presso il portale <http://eida.ingv.it>), sia per la Microzonazione Sismica dell'Italia Centrale (rete 3A, dati disponibili presso il portale <http://eida.ingv.it>). Per questa seconda finalità nell'area epicentrale dell'evento del 24 agosto 2016, compresa nei comuni di Amatrice e Accumoli, sono state distribuite oltre 40 stazioni sismiche che hanno registrato sia gli eventi locali, sia alcuni eventi con epicentro in Grecia.

L'analisi delle condizioni di sito delle stazioni sismiche ha evidenziato che:

- per la rete 3 A, in relazione alle finalità della stessa, la maggior parte delle stazioni presenta chiare indicazioni di amplificazione del moto del suolo; in particolare, le stazioni ubicate in corrispondenza del substrato geologico, le stazioni di S. Angelo (MZ011) e Capricchia (MZ014), rispettivamente su Flysch e carbonato, disposte lungo il versante SW dei Monti della Laga, non sono utilizzabili quale riferimento per analisi di tipo SSR, così come la stazione MZ031, anch'essa su Flysch, ai piedi del versante SW di Amatrice, in quanto i relativi rapporti spettrali HVSR calcolati su dati di rumore sismico presentano picchi in frequenza caratteristici.
- la stazione utilizzata come riferimento per la stima delle funzioni di amplificazione SSR dal gruppo di lavoro INGV-CNR-IGAG che ha operato nell'area di Amatrice (RI) stazione INGV T1299 (INGV-CNT), è posta su Flysch (indicato in CGT con la sigla SFGRS), qualche centinaio di metri a WNW del centro storico di Amatrice e presenta andamento della funzione HVSR calcolata su dati di rumore sismico analogo a quello osservato per le misure svolte in corrispondenza del Flysch di Frosinone e presentate in questa relazione;

- la stazione su substrato rigido prossima alla rete di Amatrice, T1214 Forca Canapine (INGV-CNT), si trova ad una distanza superiore ai 10 km, quindi nell'ordine di grandezza della distanza epicentrale per la maggior parte dei terremoti locali registrati.

Tenuto conto del fatto che la maggior parte delle misure effettuate su Flysch, sia nel Comune di Frosinone, sia nei comuni vicini, mostra rapporti spettrali HVSR di *noise* NR, si potrebbero calcolare i rapporti SSR tra la stazione T1299 (su Flysch e anch'essa con rapporti HVSR non risonanti) e T1214, utilizzando quest'ultima quale riferimento. Tuttavia, la notevole distanza tra le stazioni risulta critica per l'identificazione dei segnali utilizzabili. In alternativa, si potrebbero considerare i segnali della sequenza dell'Italia centrale provenienti da nord e da sud (Montereale), alla maggiore distanza epicentrale possibile, in maniera tale da mediare per due *backazimuth* in cui da nord sarebbe più prossima all'area sorgente la stazione T1214 e da sud la stazione T1299, e correggere per il *geometrical spreading*, ma pur con questi accorgimenti, il segnale potrebbe facilmente risultare instabile e contaminato dagli effetti di sorgente.

Durante la sequenza, sono stati registrati segnali originati da eventi sismici di rilevante magnitudo occorsi in Grecia. L'utilizzo di tali segnali, originati a distanza di oltre 700 km, avrebbe il vantaggio di rendere trascurabile la distanza tra le stazioni utilizzate per il calcolo dei rapporti SSR e quindi corrisponderebbe ai requisiti richiesti dal metodo proposto da Borchardt, ma, oltre alla scarsa numerosità del dato, peraltro non proprio rappresentativo della sismicità italiana, limiterebbe la larghezza di banda del segnale che sarebbe decisamente sbilanciato verso le basse frequenze.

Si è quindi deciso di calcolare lo scarto dei valori di PGA registrati alla stazione T1299, posta su Flysch in condizioni di topografia pianeggiante e con rapporto HVSR piatto e pertanto rappresentativa delle condizioni riferibili al Flysch della formazione di Frosinone (per le informazioni riguardanti la stazione si rimanda al sito <http://eida.ingv.it>), rispetto alla equazione predittiva del moto del suolo (GMPE) calcolata da Bindi et al. (2011) per la categoria A di sottosuolo.

In tal modo, è possibile valutare un eventuale comportamento di sovrastima, sottostima o accordo, comprensivo dell'incertezza, della stazione su Flysch rispetto a quanto predetto secondo il modello di Bindi et al. (2011) per le condizioni teoriche non soggette ad amplificazioni di sito. E' importante sottolineare come tale modello sia molto robusto, in quanto calcolato sulla base di un dataset composto da oltre 1200 segnali sismici di oltre 200 terremoti, che stima i seguenti parametri di scuotimento; PGA orizzontale; PGA verticale; PGV orizzontale, PGV verticale e ordinate spettrali (SA) in accelerazione nell'intervallo 0.04-2 s. L'analisi descritta nel seguito si concentra sullo scarto fra i dati osservati e il modello teorico per i seguenti parametri: PGA orizzontale, PGV orizzontale ed SA orizzontale per i seguenti valori di periodo: 1.0 s, 0.5 s, 0.2 s e 0.1 s, rispettivamente corrispondenti alle frequenze di 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz e 10 Hz.

Descrizione del dataset utilizzato

I dati registrati dalla stazione temporanea T 1299 sono liberamente disponibili nel portale on-line <http://eida.ingv.it>. La stazione, ubicata in località Amatrice-Casale Bucchi (Lat. 42.634223, Long. 13.2882205), è stata equipaggiata con un velocimetro corto periodo ed un accelerometro, entrambi a 3 componenti; l'operatività della stazione è a partire dal 1 settembre 2016. Per l'analisi, sono stati considerati gli eventi registrati tra il 1 ottobre 2016 e il 30 dicembre 2016. Nel periodo considerato sono state archiviate sul portale di cui sopra le forme d'onda di oltre 40 eventi, per i quali risultano disponibili i parametri di sorgente. Dal dataset iniziale, in seguito ad un esame preliminare volto alla verifica delle forme d'onda e del rapporto segnale-rumore, sono stati selezionati i segnali accelerometrici relativi a 27 eventi, i cui parametri di sorgente sono riportati in Tab. 5. L'intervallo di magnitudo considerato va da 4, valore minimo utilizzato per il modello GMPE di Bindi et al. (2011), a 6.5, relativo all'evento del 30 ottobre 2016; l'intervallo di profondità va da 7.5 km ad oltre 11 km, mentre le distanze epicentrali sono comprese nell'intervallo 11-48 km. La distribuzione degli eventi si concentra in direzione NNW rispetto alla stazione, ciò limita di molto l'intervallo di backazimuth investigato (Fig. 10).

Evento ID	Lat	Long	Prof. [km]	Magnitudo [Mw/ml]	Orario UTC
1	42.75	13.18	9.2	4.0	GMT 2016 290 09 32 35 00
2	42.87	13.12	8.1	5.4	GMT 2016 300 17 10 36 00
3	42.91	13.13	7.5	5.9	GMT 2016 300 19 18 05 00
4	42.86	13.12	9.9	4.5	GMT 2016 300 21 42 01 00
5	42.84	13.14	9.2	4.0	GMT 2016 301 03 19 27 00
6	42.98	13.12	8.7	4.1	GMT 2016 301 03 50 24 00
7	42.87	13.10	9.4	4.3	GMT 2016 301 08 21 45 00
8	42.84	13.10	9.1	4.2	GMT 2016 301 17 22 22 00
9	42.81	13.09	10.9	4.1	GMT 2016 303 16 24 33 00
10	42.83	13.11	10.0	6.5	GMT 2016 304 06 40 17 00
11	42.75	13.23	10.9	4.1	GMT 2016 304 06 55 54 00
12	42.80	13.11	10.5	4.2	GMT 2016 304 06 56 05 00
13	42.72	13.19	10.2	4.1	GMT 2016 304 07 07 53 00
14	42.71	13.14	9.9	4.2	GMT 2016 304 07 08 35 00
15	42.68	13.16	10.7	4.0	GMT 2016 304 07 38 59 00
16	42.84	13.06	9.8	4.0	GMT 2016 304 11 58 17 00
17	42.84	13.08	9.7	4.5	GMT 2016 304 12 07 00 00

18	42.81	13.17	9.6	4.1	GMT 2016 304 13 34 54 00
19	42.76	13.09	10.6	4.0	GMT 2016 305 03 27 40 00
20	42.84	13.13	9.5	4.0	GMT 2016 305 07 05 44 00
21	42.99	13.13	8.3	4.8	GMT 2016 306 07 56 40 00
22	42.80	13.16	9.4	4.0	GMT 2016 306 18 03 07 00
23	43.03	13.05	8.1	4.7	GMT 2016 308 00 35 01 00
24	42.72	13.21	9.8	4.1	GMT 2016 317 14 43 33 00
25	42.86	13.16	10.9	4.1	GMT 2016 319 01 33 43 00
26	42.53	13.28	11.1	4.4	GMT 2016 334 16 14 02 00
27	42.90	13.12	8.5	4.3	GMT 2016 346 12 54 52 00

Tabella 5: Parametri di sorgente dei terremoti analizzati

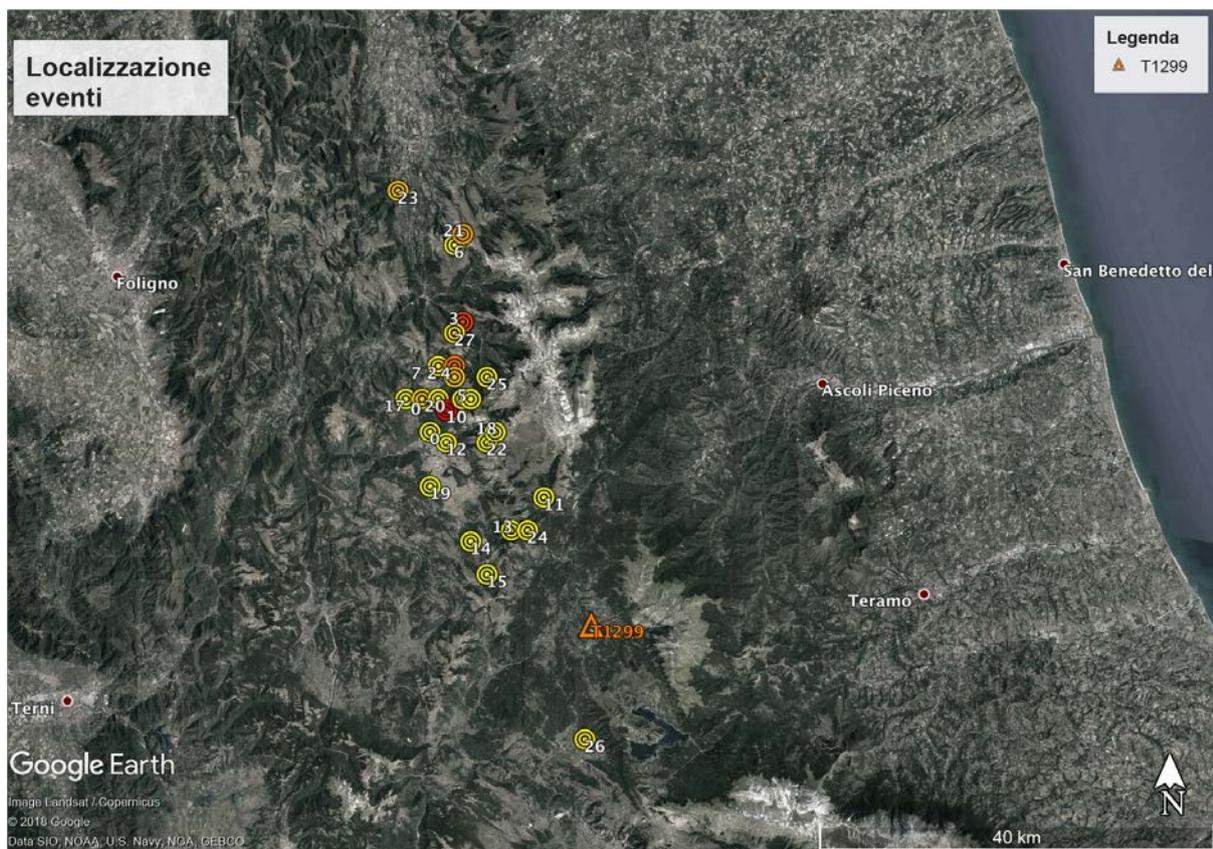


Figura 10: Immagine satellitare che descrive la distribuzione spaziale degli epicentri dei terremoti analizzati e la posizione della stazione di misura T1299.

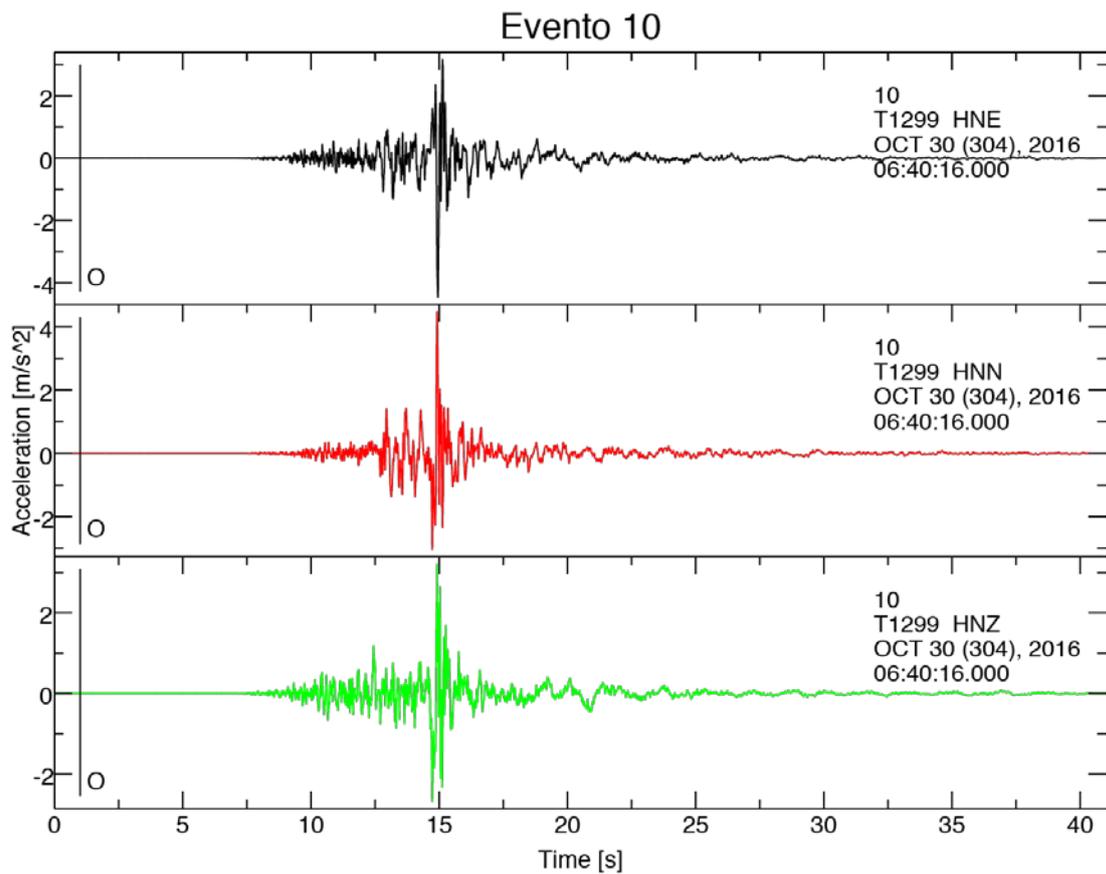
Elaborazione dei dati

L'elaborazione preliminare dei segnali ha previsto i seguenti passi:

- taglio della finestra di segnale utile, a partire dal tempo origine del terremoto (Tab. 5);

- rimozione della media e del trend lineare;
- correzione della risposta strumentale;
- estrazione dei segnali in accelerazione [m/s²], velocità [m/s] e calcolo dello spettro di Fourier in accelerazione e dello Spettro di Risposta lineare elastico al 5 % dello smorzamento critico in accelerazione (SRA), velocità e spostamento.

In Fig. 11 si riportano, a titolo esemplificativo, i grafici dei segnali (accelerazione e relativo spettro di Fourier) ricavati per il terremoto del 30 ottobre 2016 Mw 6.5.



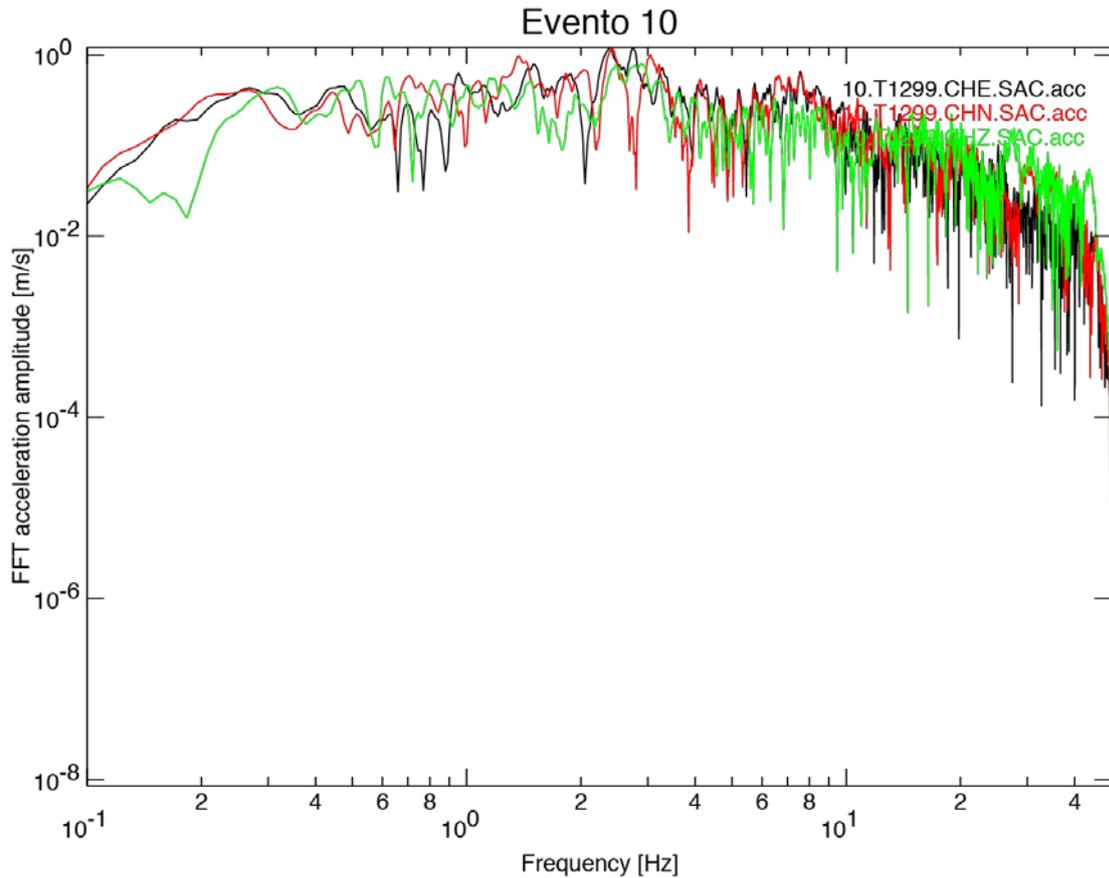


Figura 11: Grafici dei segnali (accelerazione e relativo spettro di Fourier) ricavati per il terremoto del 30 ottobre 2016 Mw 6.5.

Dai segnali di accelerazione e velocità sono stati estratti i valori massimi (PGA e PGV orizzontali e verticali) per il confronto con il modello GMPE e i valori di SRA orizzontali per i periodi considerati. I valori di PGA e PGV per i singoli terremoti sono riportati in Tab. 6 e Tab. 7. Sono stati scartati i valori relativi alla componente verticale dell'evento ID17 a causa della presenza di un glitch.

Evento ID	Distanza [km]	Backazimuth [gradi]	min. cmp E	max. cmp. E	min. cmp N	max. cmp. N	min. cmp Z	max. cmp. Z
01	15.3479	326.962	-0.0334486	0.0436147	-0.0678732	0.0535912	-0.0272631	0.0245178
02	29.3659	333.169	-0.317319	0.291934	-0.529622	0.322163	-0.228028	0.195693
03	33.0713	337.924	-0.334391	0.216796	-0.549995	0.310963	-0.25514	0.233138
04	28.3802	332.153	-0.0397898	0.0368174	-0.0578404	0.0670723	-0.0512827	0.0440454
05	25.6544	333.053	-0.0266526	0.0187632	-0.0277604	0.0317181	-0.0169549	0.0152376
06	40.6388	341	-0.00879766	0.00870837	-0.0093306	0.0135035	-0.00759076	0.00581978
07	30.1417	330.399	-0.0438665	0.0279764	-0.0484891	0.0370554	-0.0209539	0.0278123
08	27.2977	326.929	-0.0839695	0.0637814	-0.0870747	0.0619195	-0.0550285	0.0429188
09	25.0826	321.188	-0.0239748	0.0370361	-0.0370322	0.0435333	-0.0240112	0.019024
10	25.9207	327.097	-4.46326	3.17807	-3.03663	4.48208	-2.67844	3.21511

11	13.5541	341.619	-0.0474154	0.0398501	-0.0514	0.0520934	-2.305074e-02	2.564200e-02
12	23.1973	322.606	-0.0327035	0.0306053	-0.0393235	0.0406928	-0.0311155	0.0279573
13	12.1621	321.611	-0.0536361	0.0394912	-0.084791	0.0743062	-0.0419972	0.0376512
14	14.3785	305.881	-0.0314763	0.0336978	-0.0268073	0.0367851	-0.0251958	0.0304215
15	11.2365	296.949	-0.0298878	0.0369453	-0.0423726	0.0516197	-0.0248638	0.0327839
16	29.217	321.555	-0.0283572	0.0304305	-0.0456151	0.0384708	-0.0217668	0.0245885
17	28.2262	324.15	-0.0437748	0.0380451	-0.0751268	0.0590358	-0.342803	5.63747
18	21.5814	334.833	-0.0632771	0.0540479	-0.0722116	0.0636258	-0.0491263	0.0426691
19	21.0537	311.642	-0.0695943	0.0919039	-0.0921085	0.112471	-0.0459827	0.0373802
20	26.0363	331.45	-0.0302249	0.0296257	-0.0436934	0.0323403	-0.022055	0.0194335
21	41.4373	342.568	-0.0373873	0.0378228	-0.0574495	0.0645405	-0.0350821	0.05147
22	20.9604	331.514	-0.0289446	0.023286	-0.0192591	0.0284302	-0.0128004	0.0120293
23	47.8906	336.723	-0.0478773	0.0592136	-0.0690172	0.0363207	-0.0318974	0.0283375
24	11.2171	328.179	-0.0659746	0.0670533	-0.12603	0.0879459	-0.0894237	0.0629757
25	27.0032	338.293	-0.0281581	0.0194633	-0.0220905	0.0238813	-0.0242052	0.0131944
26	11.5793	180.896	-0.102685	0.0856342	-0.103465	0.104183	-0.0873849	0.0643554
27	32.3724	335.843	-0.00918328	0.00995588	-0.0146485	0.0146813	-0.00687671	0.00773435

Tabella 6: valori estremi in accelerazione [m/s²]

Evento ID	Distanza [km]	Backazimuth [gradi]	min. cmp E	max. cmp. E	min. cmp N	max. cmp. N	min. cmp Z	max. cmp. Z
01	15.3479	326.962	-0.00146307	0.00113524	-0.00388169	0.00323577	-0.00119709	0.00142435
02	29.3659	333.169	-0.0118234	0.0156028	-0.0192929	0.0202043	-0.00999049	0.0118426
03	33.0713	337.924	-0.0205218	0.0239456	-0.0225027	0.0321633	-0.0251141	0.0189021
04	28.3802	332.153	-0.00157845	0.00184517	-0.00232878	0.0025226	-0.00136939	0.00140774
05	25.6544	333.053	-0.000823423	0.000662628	-0.000916306	0.000786957	-0.000717382	0.000477412
06	40.6388	341	-0.000434898	0.000450486	-0.000459876	0.000504282	-0.000292069	0.00036741
07	30.1417	330.399	-0.00111168	0.00107103	-0.00114845	0.0010169	-0.0010102	0.000986169
08	27.2977	326.929	-0.00368447	0.00353603	-0.00339622	0.00365371	-0.00156937	0.00193381
09	25.0826	321.188	-0.000691367	0.000718645	-0.000837739	0.000854644	-0.000381944	0.000403273
10	25.9207	327.097	-0.136994	0.187662	-0.325582	0.148804	-0.217573	0.0929711
11	13.5541	341.619	-6.909202e-04	8.568077e-04	-7.146795e-04	9.444315e-04	-4.072264e-04	4.303925e-04
12	23.1973	322.606	-0.0010916	0.000854138	-0.000848623	0.000934792	-0.000739957	0.000605222
13	12.1621	321.611	-0.00109312	0.0019328	-0.0036414	0.00261321	-0.00148896	0.00114313
14	14.3785	305.881	-0.000975193	0.000855419	-0.000765005	0.000833817	-0.000672156	0.000457407
15	11.2365	296.949	-0.000630577	0.000749774	-0.000822254	0.000622784	-0.000345987	0.000365619
16	29.217	321.555	-0.000724259	0.000932032	-0.00102675	0.00116623	-0.000742041	0.000637642
17	28.2262	324.15	-0.00125033	0.00145984	-0.00182202	0.00218772	null	null
18	21.5814	334.833	-0.00227716	0.00346945	-0.00286027	0.00322374	-0.00170399	0.00222635
19	21.0537	311.642	-0.00309427	0.0021693	-0.0023519	0.00314134	-0.00127885	0.00162226

20	26.0363	331.45	-0.00118054	0.00118977	-0.00112979	0.00162299	-0.000979672	0.000880771
21	41.4373	342.568	-0.00229093	0.00239187	-0.00245448	0.00229811	-0.00198924	0.00203642
22	20.9604	331.514	-0.000698626	0.000523389	-0.000518415	0.000667301	-0.00034406	0.000352894
23	47.8906	336.723	-0.0014426	0.00163908	-0.00197068	0.00176633	-0.00132417	0.00180337
24	11.2171	328.179	-0.00201152	0.00183639	-0.00244743	0.0033055	-0.00190044	0.00182959
25	27.0032	338.293	-0.000654134	0.000521027	-0.00089616	0.000710327	-0.000446434	0.000448987
26	11.5793	180.896	-0.00225209	0.00308499	-0.00182723	0.00289714	-0.00149636	0.00131498
27	32.3724	335.843	-0.000828514	0.00124854	-0.000985566	0.000877484	-0.000865993	0.000914464

Tabella 7: valori estremi in velocità [m/s]

Ai fini del confronto, si è provveduto al calcolo della media geometrica dei parametri d'interesse, PGA orizzontali, PGV orizzontali e SRA orizzontali, relativi alle due componenti orizzontali del moto. Per ogni evento, è stata calcolata la curva teorica (funzione di magnitudo, distanza, stile di fagliazione, componente ed eventualmente valore di periodo) per la categoria di sottosuolo A, così come identificata dalla normativa sismica vigente (CS.LL.PP., 2018). I modelli teorici (valore atteso e incertezza) sono rappresentati in scala di colori in funzione della magnitudo dell'evento insieme con i dati sperimentali nelle Figure da 12 a 17.

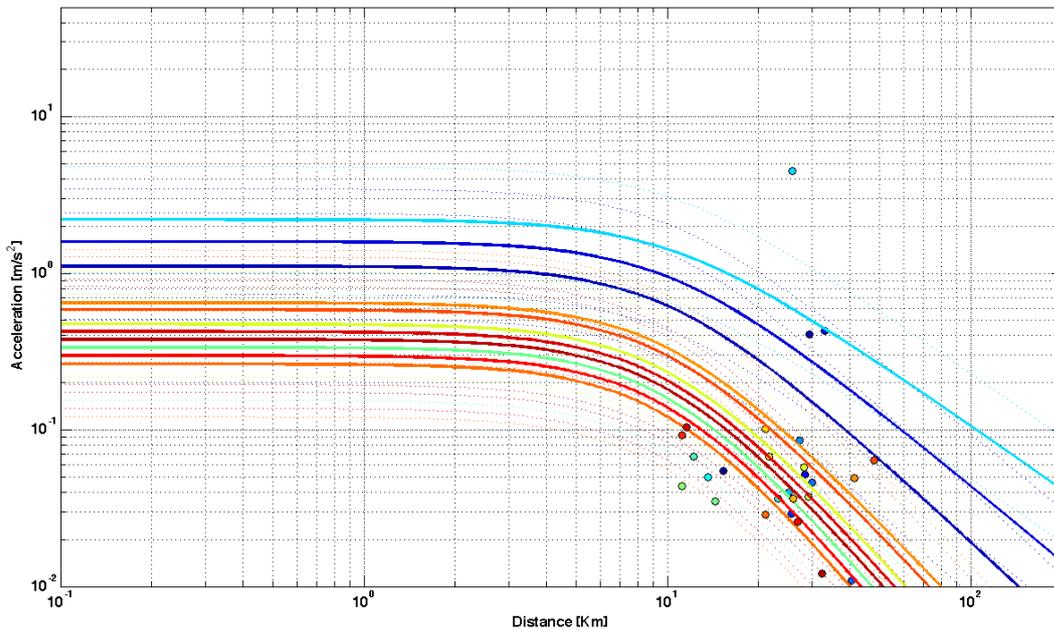


Figura 12: Modello teorico GMPE per la PGA calcolato per categoria di sottosuolo A secondo Bindi et al. (2011) (curve e curve tratteggiate rappresentano il valore atteso e l'incertezza della stima) e dati sperimentali calcolati per la stazione T1299 (punti). La scala di colori rappresenta il codice ID dell'evento.

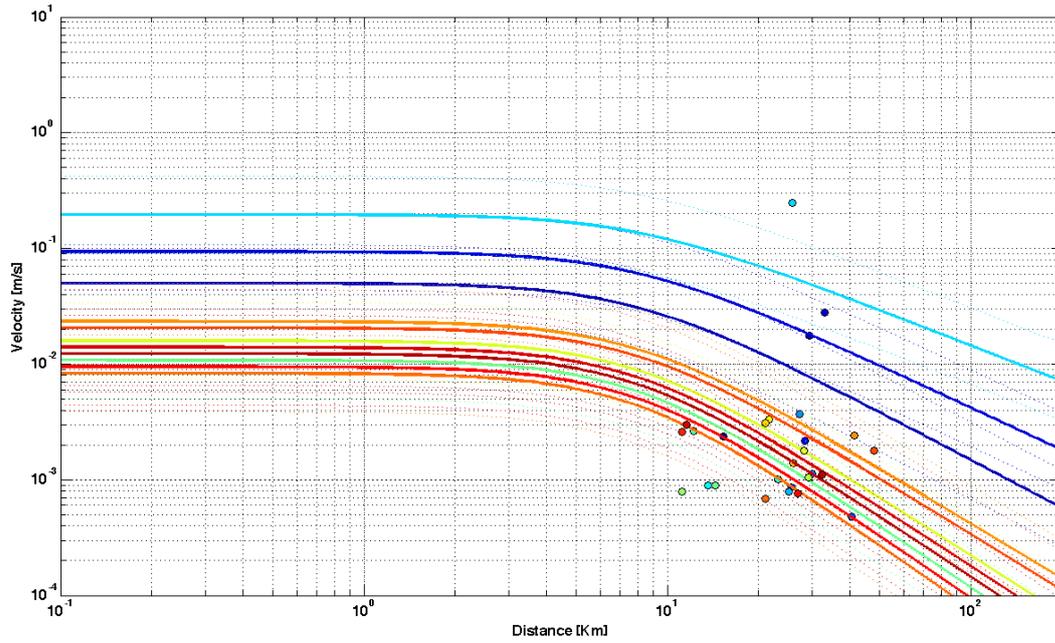


Figura 13: Modello teorico GMPE per la PGV calcolato per categoria di sottosuolo A secondo Bindi et al. (2011) (curve e curve tratteggiate rappresentano il valore atteso e l'incertezza della stima) e dati sperimentali calcolati per la stazione T1299 (punti). La scala di colori rappresenta il codice ID dell'evento.

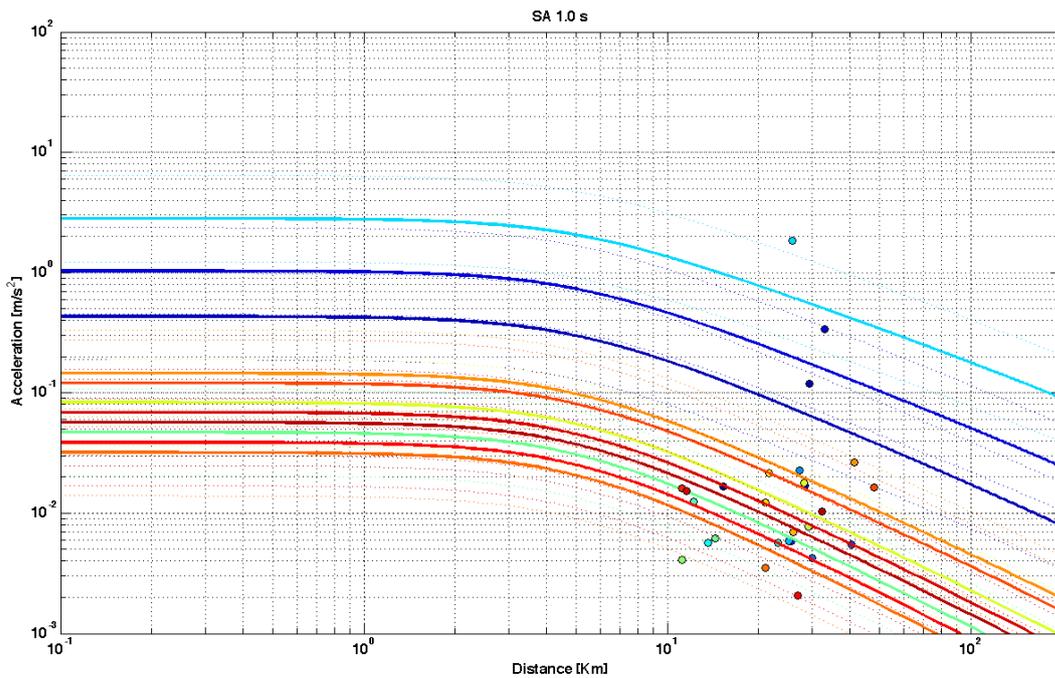


Figura 14: Modello teorico GMPE per la SRA a 1.0 s calcolato per categoria di sottosuolo A secondo Bindi et al. (2011) (curve e curve tratteggiate rappresentano il valore atteso e l'incertezza della stima) e dati sperimentali calcolati per la stazione T1299 (punti). La scala di colori rappresenta il codice ID dell'evento.

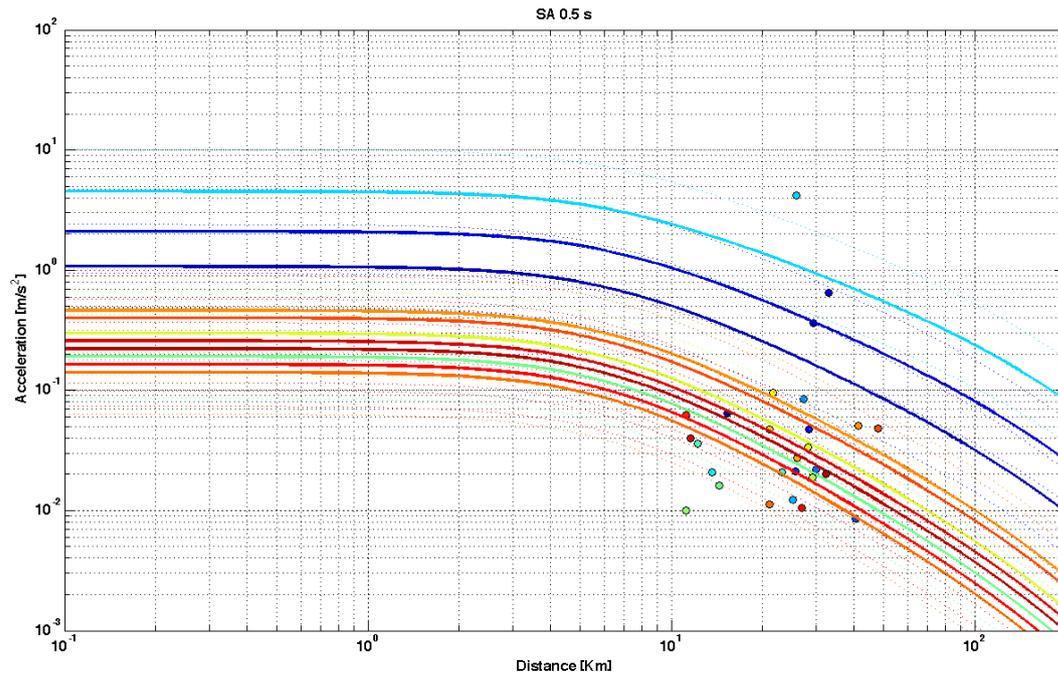


Figura 15: Modello teorico GMPE per la SRA a 0.5 s calcolato per categoria di sottosuolo A secondo Bindi et al. (2011) (curve e curve tratteggiate rappresentano il valore atteso e l'incertezza della stima) e dati sperimentali calcolati per la stazione T1299 (punti). La scala di colori rappresenta il codice ID dell'evento.

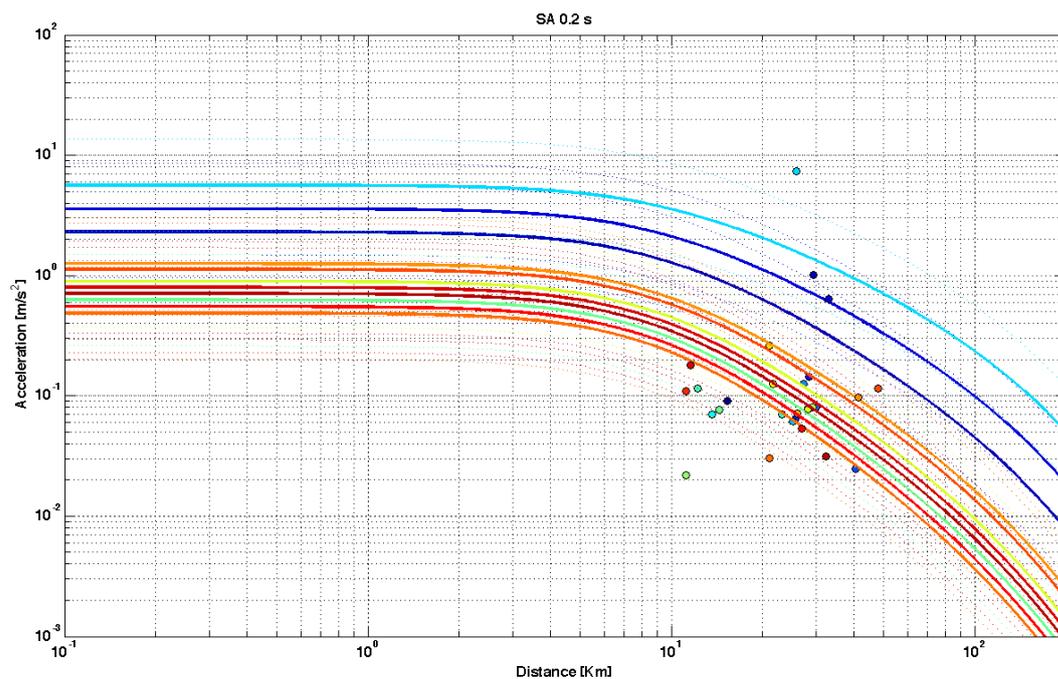


Figura 16: Modello teorico GMPE per la SRA a 0.2 s calcolato per categoria di sottosuolo A secondo Bindi et al. (2011) (curve e curve tratteggiate rappresentano il valore atteso e l'incertezza della stima) e dati sperimentali calcolati per la stazione T1299 (punti). La scala di colori rappresenta il codice ID dell'evento.

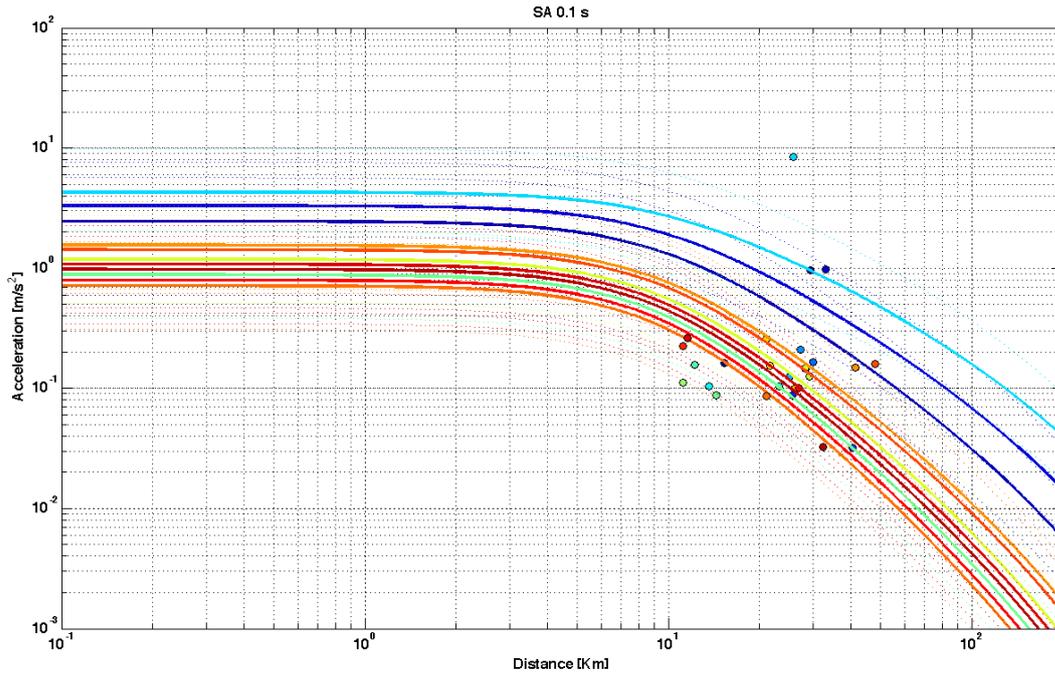


Figura 17: Modello teorico GMPE per la SRA a 0.1 s calcolato per categoria di sottosuolo A secondo Bindi et al. (2011) (curve e curve tratteggiate rappresentano il valore atteso e l'incertezza della stima) e dati sperimentali calcolati per la stazione T1299 (punti). La scala di colori rappresenta il codice ID dell'evento.

Per meglio esaminare l'eventuale livello di accordo (o disaccordo) fra il modello teorico, elaborato per le condizioni non soggette ad amplificazione del moto del suolo, e i dati sperimentali, si è proceduto al calcolo dei seguenti parametri di confronto:

$$\alpha = \text{valore sperimentale} / \text{valore teorico GMPE}$$

$$\text{residuo norm} = (\log_{10}(\text{valore sperimentale}) - \log_{10}(\text{valore teorico GMPE})) / \log_{10}(\text{dev. st. GMPE})$$

Dove il valore teorico rappresenta il valore del parametro di scuotimento calcolato dalla GMPE per magnitudo e distanza epicentrale pari a quella relativa al parametro sperimentale. In caso di perfetto accordo tra dati sperimentali e modello elaborato per categoria di sottosuolo A, il parametro α avrebbe valore unitario ed il residuo valore nullo.

Nelle Figure seguenti, da 18 a 23, sono rappresentate le distribuzioni dei valori di α e dei residui in funzione della magnitudo dell'evento e della distanza epicentrale. Si ricorda che i parametri di scuotimento presi in esame sono: PGA orizzontale, PGV orizzontale, ordinata spettrale dello spettro di risposta elastico in accelerazione per i periodi 1.0 s, 0.5 s, 0.2 s, 0.1 s (1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz). In ogni grafico, ad ogni punto (blu) corrisponde un valore dei due parametri sopra descritti;

inoltre, sono riportati i valori medi di tali parametri (linee rosse, in tratteggio l'incertezza associata alla stima).

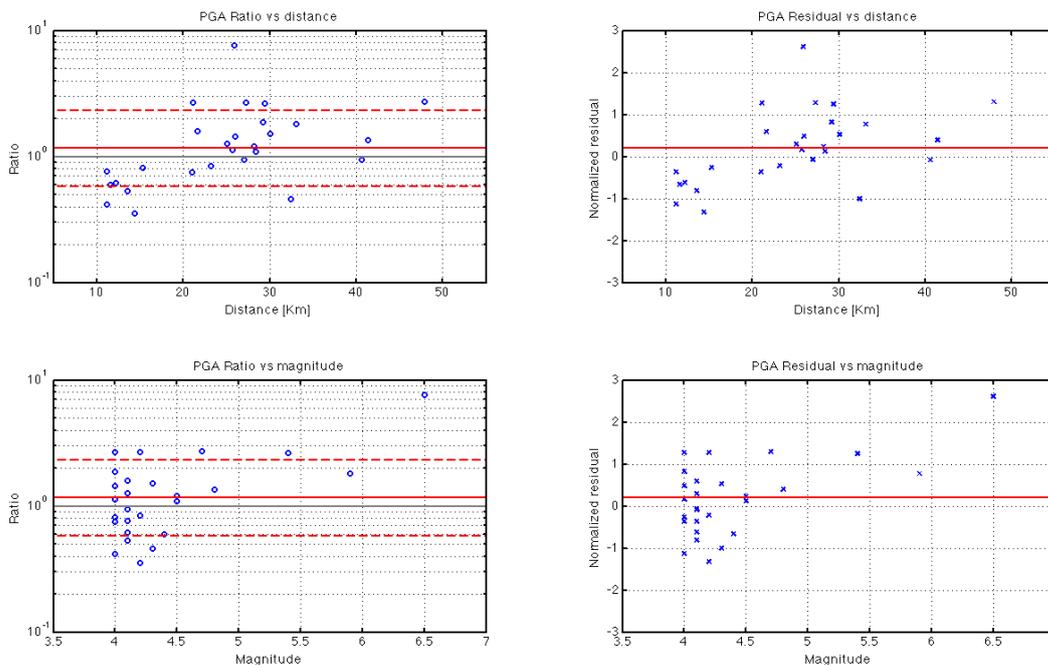


Figura 18: Calcolo del rapporto tra PGA sperimentale e teorica (sinistra) e del residuo normalizzato tra teorico e sperimentale (destra), in funzione di magnitudo (in alto) e distanza (in basso). Il valore medio è rappresentato dalla linea continua rossa, l'incertezza in tratteggio.

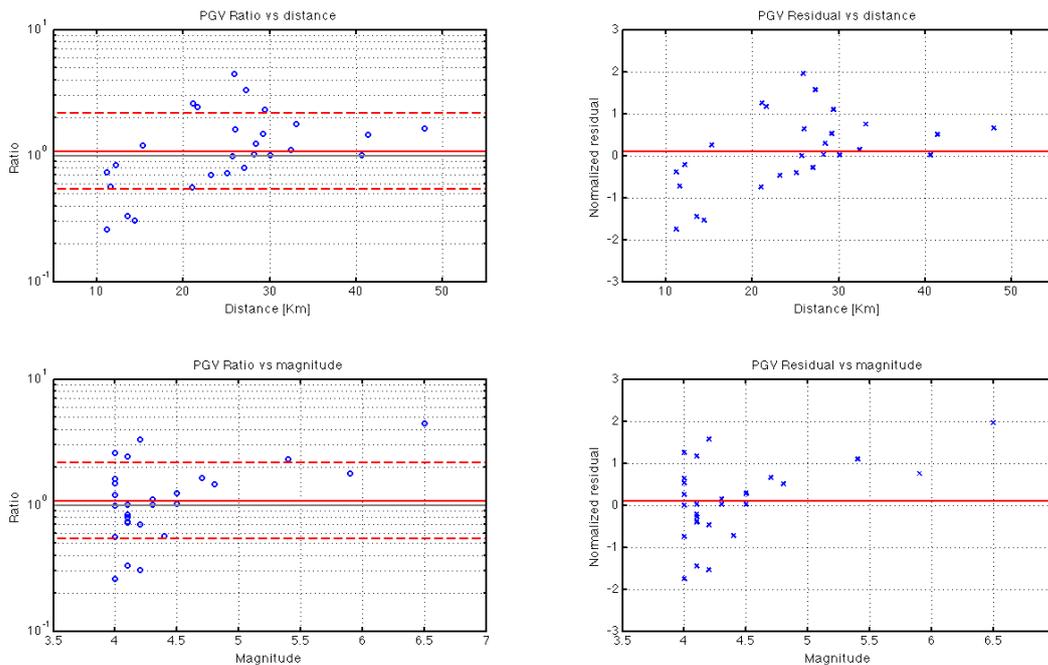


Figura 19: Calcolo del rapporto tra PGV sperimentale e teorica (sinistra) e del residuo normalizzato tra teorico e sperimentale (destra), in funzione di magnitudo (in alto) e distanza (in basso). Il valore medio è rappresentato dalla linea continua rossa, l'incertezza in tratteggio.

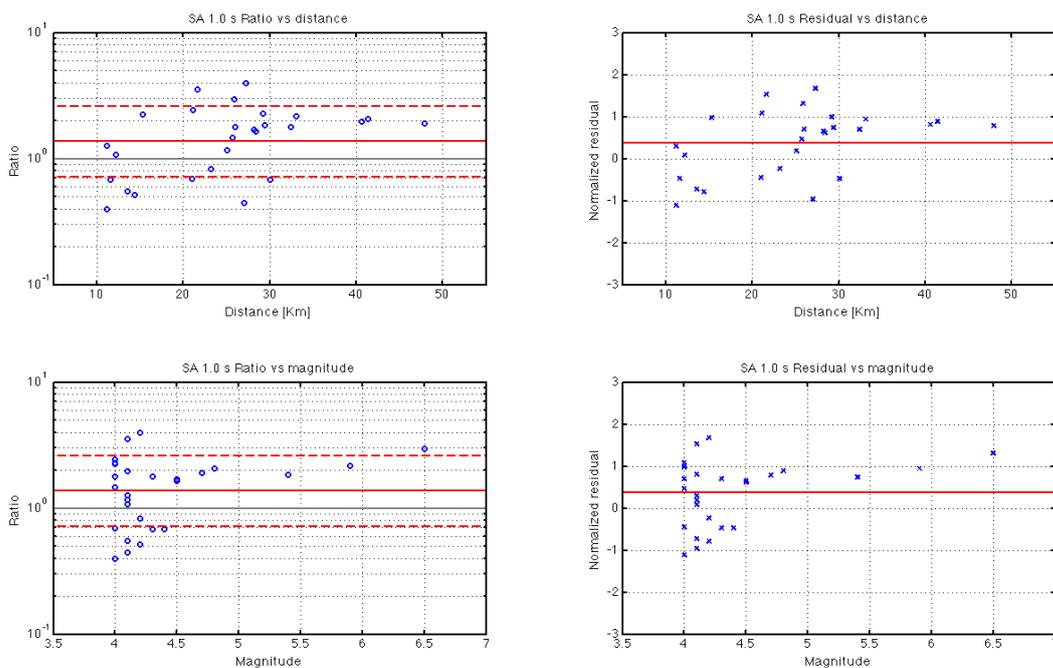


Figura 20: Calcolo del rapporto tra SRA 1.0 s sperimentale e teorica (sinistra) e del residuo normalizzato tra teorico e sperimentale (destra), in funzione di magnitudo (in alto) e distanza (in basso). Il valore medio è rappresentato dalla linea continua rossa, l'incertezza in tratteggio.

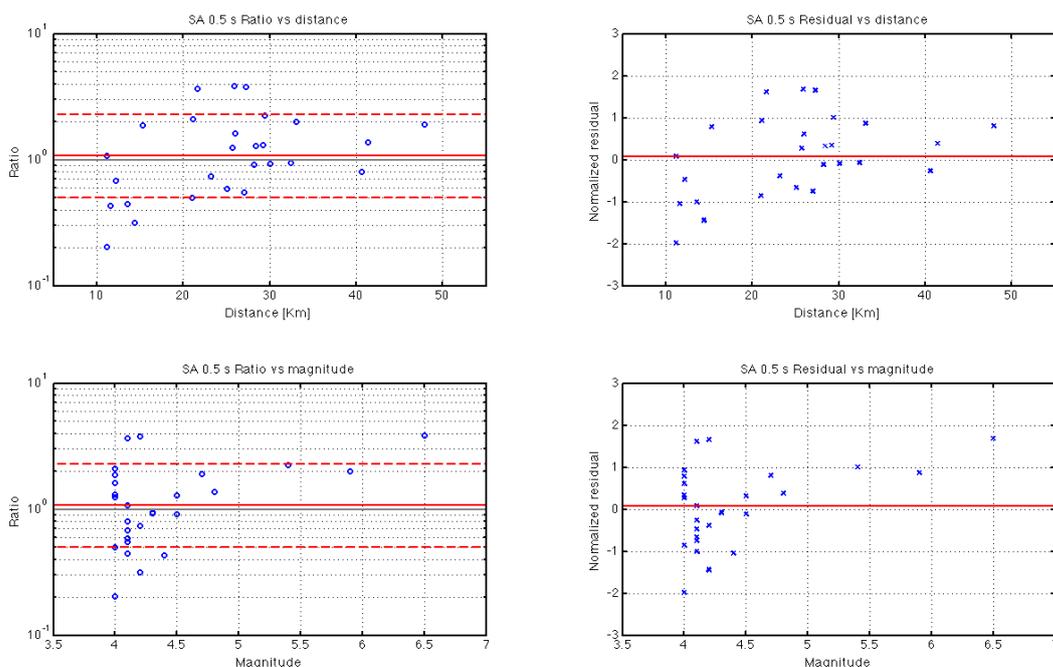


Figura 21: Calcolo del rapporto tra SRA 0.5 s sperimentale e teorica (sinistra) e del residuo normalizzato tra teorico e sperimentale (destra), in funzione di magnitudo (in alto) e distanza (in basso). Il valore medio è rappresentato dalla linea continua rossa, l'incertezza in tratteggio.

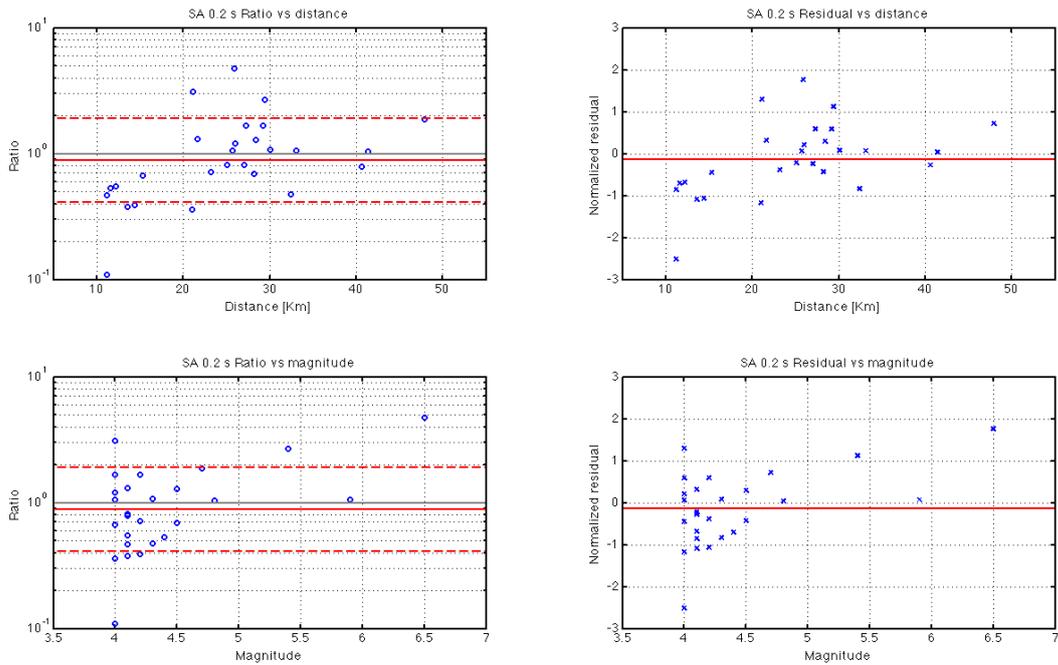


Figura 22: Calcolo del rapporto tra SRA 0.2 s sperimentale e teorica (sinistra) e del residuo normalizzato tra teorico e sperimentale (destra), in funzione di magnitudo (in alto) e distanza (in basso). Il valore medio è rappresentato dalla linea continua rossa, l'incertezza in tratteggio.

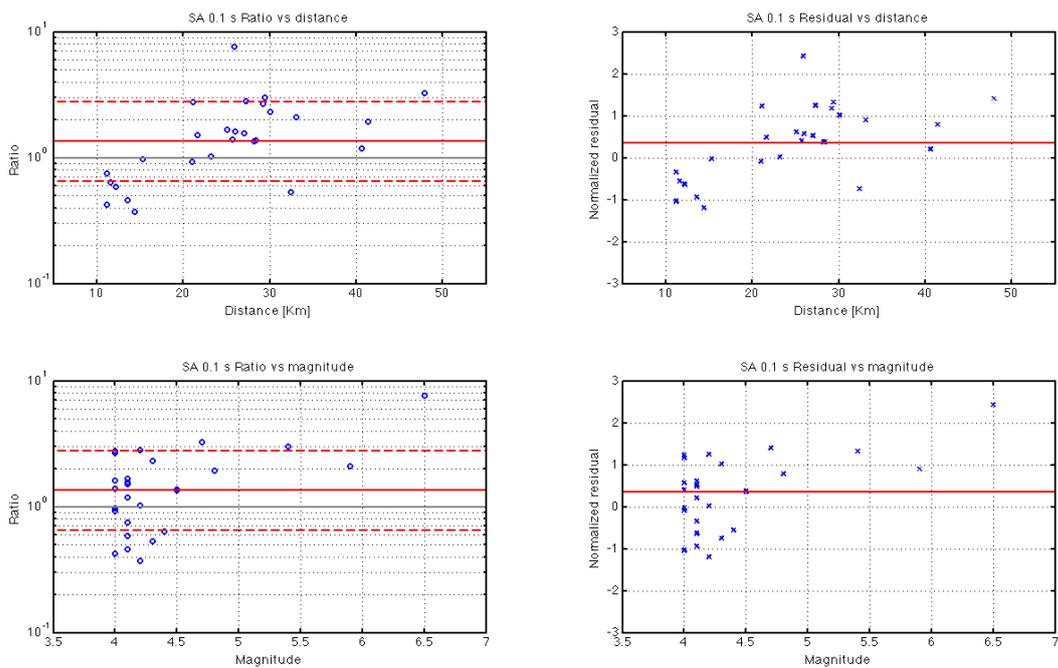


Figura 23: Calcolo del rapporto tra SRA 0.1 s sperimentale e teorica (sinistra) e del residuo normalizzato tra teorico e sperimentale (destra), in funzione di magnitudo (in alto) e distanza (in basso). Il valore medio è rappresentato dalla linea continua rossa, l'incertezza in tratteggio.

Dall'esame dei grafici sopra riportati è possibile verificare come esista un sostanziale accordo tra i valori sperimentali ed il modello predittivo di Bindi et al. (2011), in particolare è possibile osservare una debole sottostima del modello rispetto ai valori sperimentali, che al massimo risultano maggiori di circa il 37 % rispetto a quanto atteso per categoria A di sottosuolo (SRA 1.0 s). Allo stesso tempo però, per l'ordinata spettrale di 0.2 s, il modello sovrastima il dato sperimentale di circa il 10 %, evidenziando in questo caso un parametro di scuotimento inferiore al valore atteso per le condizioni riferibili al substrato sismico affiorante in condizioni di topografia piana. La Tab. 8 sintetizza i valori medi dei parametri di confronto ricavati, mentre le Figure 24, 25 e 26 rappresentano le distribuzioni di frequenza dei valori relativi ai parametri di confronto ed il valore medio (linea rossa verticale). Per quanto riguarda il residuo normalizzato tra dato sperimentale e modello teorico, sono rappresentate anche le curve di verifica della distribuzione empirica rispetto alla distribuzione normale (*normal probability plot*, Chambers 1983): mentre per alcuni parametri di scuotimento, come ad esempio i valori di picco, le distribuzioni empiriche approssimano la normale, per altri parametri di scuotimento, come SRA 1.0 s, la distribuzione empirica si scosta notevolmente dal modello gaussiano.

ratio PGA	ratio PGV	ratio SRA 1.0 s	ratio SRA 0.5 s	ratio SRA 0.2 s	ratio SRA 0.1 s	res. norm. PGA	res. norm. PGV	res. norm. SRA 1	res. norm. SRA 0.5 s	res. norm. SRA 0.2 s	res. norm. SRA 0.1 s
1.16	1.08	1.37	1.07	0.88	1.35	0.19	0.10	0.38	0.08	-0.14	0.35

Tabella 8: valori medi dei parametri di confronto

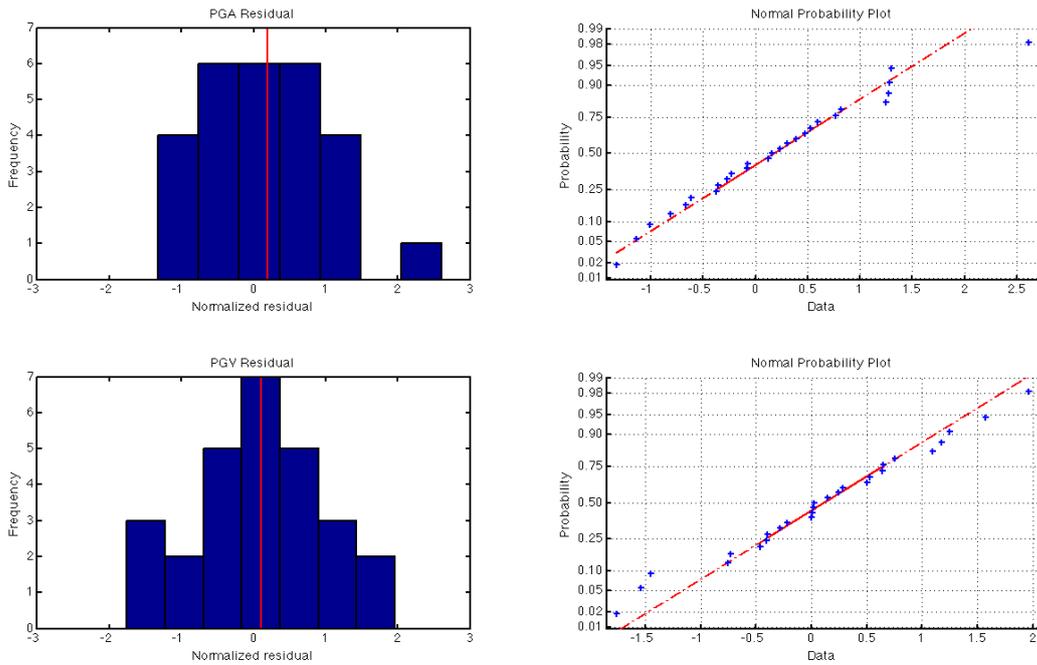


Figura 24: Istogrammi di frequenza per i valori dei residui rispetto a PGA (in alto a sinistra) e PGV (in basso a sinistra); la linea rossa rappresenta il valor medio del residuo. Grafico per la verifica della distribuzione normale dei dati (normal probability plot): PGA in alto a destra e PGV in basso a destra.

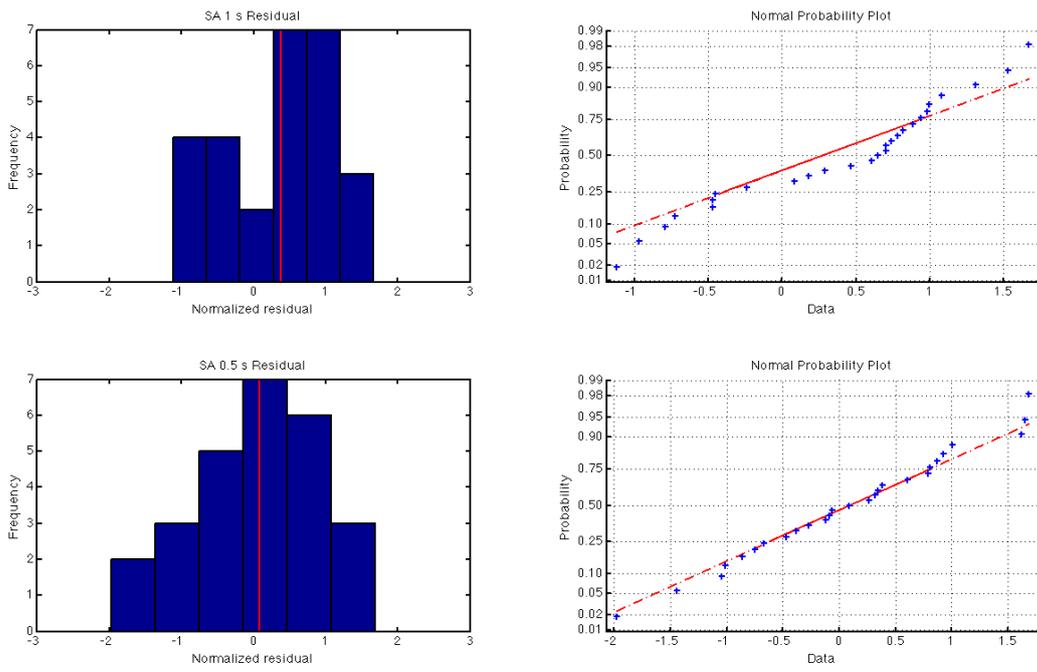


Fig. 25 Istogrammi di frequenza per i valori dei residui rispetto a SRA 1.0 s (in alto a sinistra) e SRA 0.5 s (in basso a sinistra); la linea rossa rappresenta il valor medio del residuo. Grafico per la verifica della distribuzione normale dei dati (normal probability plot): SRA 1.0 s in alto a destra e SRA 0.5 s in basso a destra.

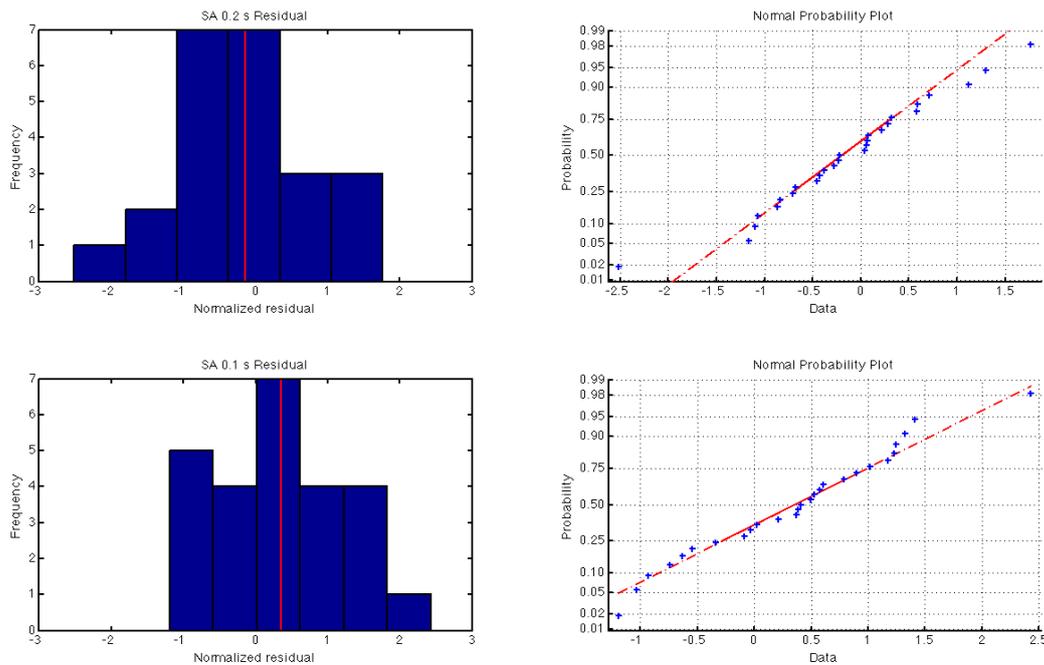


Figura 26: Istogrammi di frequenza per i valori dei residui rispetto a SRA 0.2 s (in alto a sinistra) e SRA 0.1 s (in basso a sinistra); la linea rossa rappresenta il valor medio del residuo. Grafico per la verifica della distribuzione normale dei dati (normal probability plot): SRA 0.2 s in alto a destra e SRA 0.1 s in basso a destra.

7. Conclusioni

Le attività di indagine ed analisi svolte nell'ambito della presente convenzione hanno consentito di pervenire ai due principali obiettivi prefissati in sede di stipula tra il DST Sapienza e il Comune di Frosinone, ovvero:

1. la realizzazione delle indagini di Livello 1 di Microzonazione Sismica con produzione della relativa cartografia e delle relazioni illustrative;
2. lo studio delle caratteristiche sismiche del Flysch della "Formazione di Frosinone", in particolare dell'eventuale suo comportamento quale *bedrock* sismico.

Il Gruppo di Lavoro, costituito da ricercatori del DST Sapienza e dell'ENEA, ha svolto le proprie attività in due fasi successive e distinte, intervallate da un lungo periodo di sospensione causato dal coinvolgimento nelle indagini post- sequenza sismica del 2016 -'17 in Italia centrale.

La prima parte delle attività si è conclusa con la consegna della relazione illustrativa delle indagini di Microzonazione Sismica di Livello 1 (Scarascia Mugnozza et al., 2016) nella quale, riguardo ai depositi ascrivibili al flysch arenaceo-pelitico (denominata Formazione di Frosinone) affioranti nel territorio comunale di Frosinone, si afferma che *"sia i risultati delle misure di noise effettuate che il modello geologico-tecnico ricostruito suggeriscono assenza di condizioni predisponenti a fenomeni di amplificazione sismica nelle frequenze di interesse per l'edilizia convenzionale; tuttavia i risultati delle prove MASW disponibili indicano valori di velocità delle onde di taglio inferiori a 700 m/s e*

quindi, seguendo la normativa regionale vigente, queste aree sono state classificate come potenzialmente suscettibili ad amplificazione stratigrafica" (zona SA10).

In relazione al secondo obiettivo della convenzione, i risultati delle indagini ed analisi effettuate dal Gruppo di Lavoro nel 2018 per caratterizzare il comportamento del Flysch affiorante nel territorio comunale di Frosinone dal punto di vista sismico possono essere così riassunti:

- il 78% delle misure di *noise*, su un totale di quasi 40 misure, non evidenzia risonanze significative;
- l'analisi di Microzonazione Sismica di Livello 2, effettuata utilizzando gli Abachi Regionali, restituisce fattori di amplificazione FH di 1,1 - 1,2 rispettivamente negli intervalli di frequenza 1 - 2 Hz e 2 - 10 Hz;
- l'analisi di alcuni parametri di scuotimento (PGA, PGV, ordinate spettrali a 1 s, 0,5 s, 0,2 s e 0,1s) relativi a registrazioni ottenute su un litotipo arenaceo-pelitico, assimilabile per le sue caratteristiche deposizionali e geologico-tecniche a quello affiorante nell'area di Frosinone, evidenzia un comportamento analogo a quello di un sottosuolo di categoria A.

Si fa inoltre notare che la stazione accelerometrica utilizzata per le analisi dei parametri di scuotimento (T1299) è stata considerata dai tecnici dell'INGV come "stazione di riferimento" per gli studi di risposta sismica locale nel territorio di Amatrice.

Pertanto, in base all'insieme dei risultati esposti, si ritiene che il comportamento del Flysch della "Formazione di Frosinone" sia assimilabile a quello di un *bedrock* sismico.

Luglio 2018

Prof. Gabriele Scarascia Mugnozza



8. Bibliografia

Accordi, B. (1963) Lineamenti strutturali del Lazio e dell'Abruzzo meridionale. Mem. soc. geol. It., 4, 595-633 Bologna.

Albarello, D. & Castellaro, S. (2011) - Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola. Supplemento a Ingegneria sismica anno XXVIII, 2,32-62.

Bindi D., Pacor F., Luzi L., Puglia R., Massa M., Ameri G. et Paolucci R. (2011) - Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database. Bull. of Earthquake Engineering, 9, 1899-1920.

Borcherdt, R. D. (1994) "Estimate of site-dependent response spectra for design (methodology and justification)". Earthquake Spectra, 10, 617-653.

Cacciuni A., Centamore E., Di Stefano R., Dramis F. (2000). Evoluzione morfotettonica della Conca di Amatrice. Studi Geologici Camerti 1995/2, 95-100.

Chambers J., Cleveland W., Kleiner B., and Tukey P., (1983). Graphical Methods for Data Analysis, Wadsworth.

CS.LL.PP. (2018). DM 17 Gennaio, Norme tecniche per le costruzioni. Supplemento ordinario alla "Gazzetta Ufficiale" n. 42 del 20 febbraio 2018 - Serie generale, n. 8.

Geoplan Consulting, (2013) - Intervento di messa in sicurezza e ripristino della viabilità sulla via E. Biondi. Relazione geologico-tecnica. - D.M. 11/03/1988 - D.M. 14/01/2008 R.R. Lazio 2/2012.

Nakamura Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimates of subsurface using microtremor on the round surface. Quarterly Rept. of Railway Tech. Res. Inst., Jpn, 30, 25-33.

Scarascia Mugnozza, G., Martino, S., Porchia, A. (2016) Relazione illustrativa del Giugno 2016- Microzonazione sismica livello 1.