



Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente

**CONVENZIONE ENEA REGIONE LAZIO FINALIZZATA ALLO  
SVOLGIMENTO DI ATTIVITÀ PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO  
SISMICO DEL TERRITORIO REGIONALE DEL LAZIO.**

**RELAZIONE FINALE**

Analisi della sismicità regionale ai fini dell'individuazione di  
classi di comuni con situazioni omogenee di scuotibilità in  
occasione di eventi sismici.

**Responsabile ENEA: Ing. Dario Rinaldis**

**Autori: Guido Martini, Antonella Paciello, Salvatore Paolini, Fabrizio Poggi, Alessandro Zini**

## Indice

### **Analisi della sismicità regionale ai fini dell'individuazione di classi di Comuni con situazioni omogenee di scuotibilità in occasione di eventi sismici**

<b>1.</b>	<b>Introduzione .....</b>	<b>pag. 1</b>
<b>2.</b>	<b>Metodo Storico .....</b>	<b>pag. 3</b>
<b>2.1</b>	<b>Selezione ed analisi dei terremoti significativi .....</b>	<b>pag. 3</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Definizione dei Centri Sismici .....</b>	<b>pag. 4</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Modellazione dei Campi Macrosismici .....</b>	<b>pag. 6</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Individuazione degli eventi più gravosi per il territorio del Lazio .....</b>	<b>pag. 7</b>
<b>2.2</b>	<b>Valutazione delle massime intensità storiche locali .....</b>	<b>pag. 9</b>
<b>2.3</b>	<b>Classificazione dei livelli di sismicità storica nelle UAS del Lazio .....</b>	<b>pag. 15</b>
<b>3.</b>	<b>Metodo Statistico .....</b>	<b>pag. 20</b>
<b>3.1</b>	<b>Introduzione .....</b>	<b>pag. 20</b>
<b>3.2</b>	<b>Analisi non parametrica .....</b>	<b>pag. 21</b>
<b>4.</b>	<b>Elaborazione degli accelerogrammi di riferimento per le analisi di Microzonazione Sismica .....</b>	<b>pag. 30</b>
<b>4.1</b>	<b>Selezione delle <i>time histories</i> da Banche Dati Accelerometriche .....</b>	<b>pag. 32</b>
<b>4.2</b>	<b>Generazione degli accelerogrammi di riferimento .....</b>	<b>pag. 33</b>
<b>5.</b>	<b>Conclusioni .....</b>	<b>pag. 40</b>
<b>6.</b>	<b>Bibliografia .....</b>	<b>pag. 43</b>
	<b>Appendice A - Classificazione dei livelli di sismicità storica</b>	
	<b>Appendice B - Classificazione finale delle UAS</b>	
	<b>Appendice C - Selezione da Banche Dati Accelerometriche</b>	

## **Analisi della sismicità regionale ai fini dell'individuazione di classi di comuni con situazioni omogenee di scuotibilità in occasione di eventi sismici**

### **1. Introduzione**

Obiettivo principale del presente programma di ricerca è definire aree del territorio della Regione Lazio con livelli di pericolosità sismica statisticamente omogenei, utili per la classificazione sismica regionale e la selezione di accelerogrammi rappresentativi del moto del suolo, da utilizzare come *input* sismico nelle analisi di microzonazione e di risposta locale.

La metodologia utilizzata si basa sull'analisi della sismicità storica della regione mediante un approccio "di sito" e sull'elaborazione con metodi statistici degli spettri ad *hazard* uniforme per siti rocciosi elaborati nell'ambito del Progetto S1 della Convenzione INGV-DPC 2004 – 2006 [Progetto S1 INGV, 2007]. I risultati delle analisi eseguite sono riferite a unità territoriali denominate Unità Amministrative Sismiche (di seguito UAS). La maggior parte dei Comuni del Lazio corrispondono ad un'unica UAS, mentre per sei di essi, a causa della loro estensione o alla presenza di isole amministrative, è stato necessario prevedere UAS differenziate: il totale delle Unità Amministrative Sismiche analizzate ammonta a 402.

I casi particolari sono i seguenti:

- Comune di Roma: 20 UAS costituite dai 19 Municipi più l'isola amministrativa del XX Municipio;
- Comune di Rieti: 2 UAS delimitate mediante i confini dei bacini idrografici dei fossi Papena, Ranaro e Pantana;
- Comune di Pescorocchiano: 2 UAS separate dal confine idrografico del Fiume Salto;
- Comune di Vejano: 2 UAS per la presenza di un'isola amministrativa.
- Comune di Nepi: 2 UAS per la presenza di un'isola amministrativa;
- Comune di Colfelice: 2 UAS per la presenza di un'isola amministrativa;

Il totale delle Unità Amministrative Sismiche analizzate ammonta a 402.

Per suddividere le UAS in classi omogenee di sismicità sono state usate in parallelo due metodologie: nella prima è stato in sostanza applicato un metodo basato sulla analisi delle informazioni di sismica storica per la valutazione della pericolosità delle UAS; nella seconda sono state applicate metodologie statistiche ai dati distribuiti dal Progetto S1 dell'INGV, in particolare ai valori degli spettri ad *hazard* uniforme per un periodo di ritorno di 475 anni distribuiti su una maglia

di circa 5 Km di lato. Sono state quindi definite le strategie per individuare le aree geografiche della Regione Lazio (Gruppi di UAS) caratterizzate da una pericolosità sismica omogenea e tali da poter essere rappresentate, in base alle metodologie adottate, sia dai massimi risentimenti dovuti ad eventi sismici riconducibili a Centri sismici opportunamente definiti (metodo storico), sia da forme spettrali di riferimento (metodo statistico).

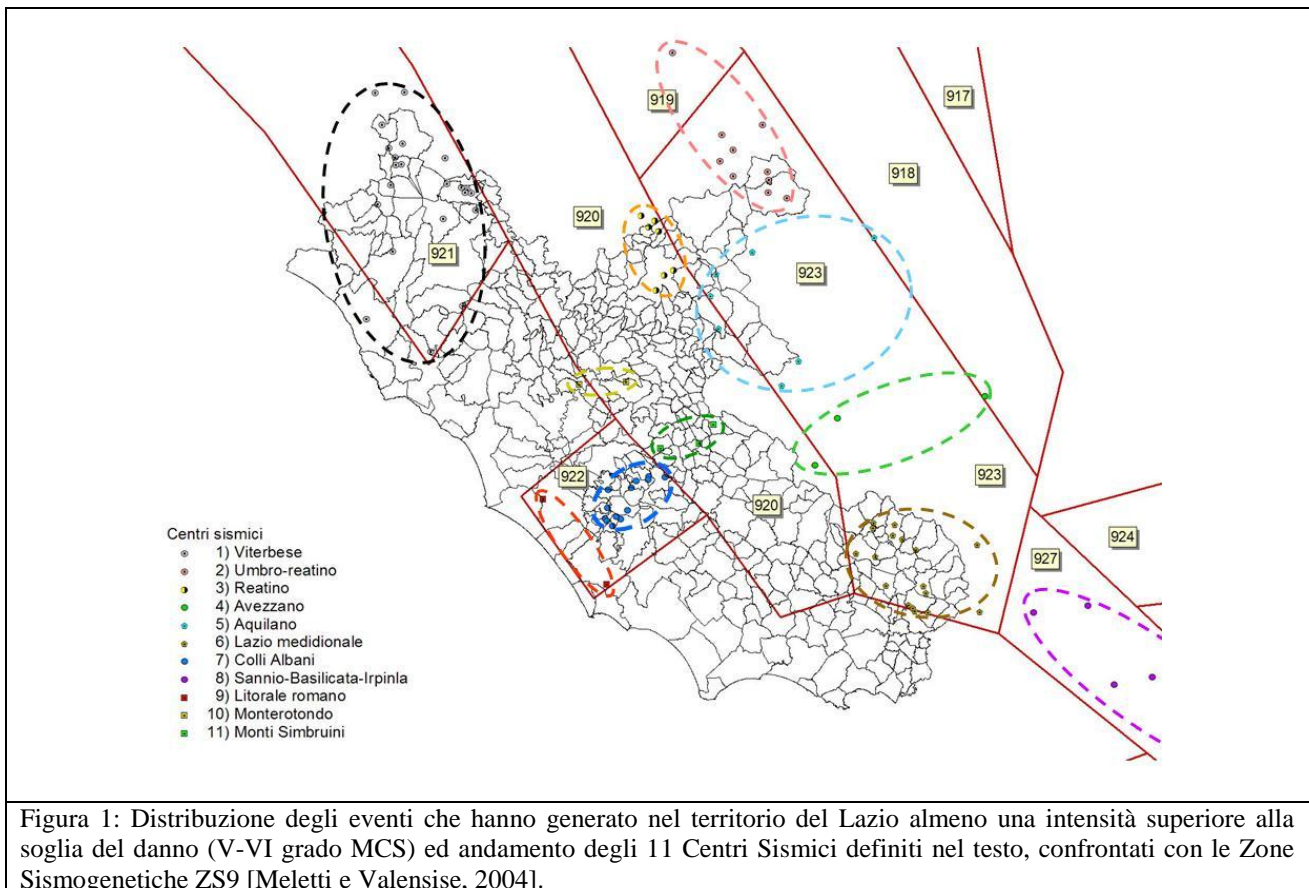
L'analisi degli effetti dei terremoti che hanno colpito nel passato le UAS, ha avuto una duplice valenza: da un lato ha permesso di verificare l'attendibilità dei risultati dell'analisi statistica di "raggruppamento" degli spettri con particolare riferimento alla loro distribuzione geografica, dall'altro è stata utilizzata per definire gli intervalli dei parametri sismologici e "*strong-motion*" con cui è stata effettuata la selezione delle registrazioni accelerometriche reali nella Banca Dati accelerometrica Europea [Ambraseys *et al.*, 2000] e nel sito COSMOS [Consortium of Organizations for Strong-Motion Observation Systems] contenente dati accelerometrici mondiali.

Le *time-histories* selezionate e adattate alle forme spettrali di riferimento per ogni Gruppo di UAS, costituiscono gli accelerogrammi da considerare caratteristici per ciascun Gruppo e, una volta scalati ai livelli di pericolosità sismica locale, le registrazioni di riferimento per ogni singola UAS.

## 2. Metodo Storico

L'analisi della pericolosità sismica storica locale nelle UAS del Lazio è stata eseguita utilizzando le informazioni macrosismiche messe a disposizione della comunità scientifica, a seguito del Progetto S1 dell'INGV, ed in particolare il Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani CPTI04 [Gruppo di lavoro CPTI, 2004] ed il Database Macrosismico BDMI04 [Stucchi *et al.*, 2007].

Le elaborazioni sono state eseguite essenzialmente in ambiente GIS, anche mediante applicativi originali per la analisi spaziale dei dati. Attraverso la definizione delle massime intensità storiche locali e degli eventi che le hanno generate, si è giunti all'identificazione di raggruppamenti di UAS con valori omogenei di pericolosità sismica definita sulla base dei parametri magnitudo, distanza ed intensità epicentrali. In questo modo si è potuto procedere alla selezione, tramite interrogazione delle banche dati accelerometriche, di registrazioni reali compatibili con i livelli di sismicità storicamente risentiti nelle singole UAS.



### 2.1. Selezione ed analisi dei terremoti significativi

Per la identificazione degli eventi che hanno storicamente generato effetti significativi nelle UAS, sono state analizzate le informazioni contenute nei due database scelti come riferimento del

presente lavoro (CPTI04 e DBMI04).

In primo luogo si è proceduto alla selezione geografica di tutti i risentimenti superiori alla soglia di danno (grado V-VI della scala MCS) che cadono all'interno del territorio del Lazio e degli eventi che li hanno generati. Per i 103 terremoti così identificati (Figura 1), sono stati estratti dal CPTI04 i relativi parametri sismologici.

### 2.1.1. Definizione dei Centri Sismici

Per meglio analizzare l'andamento degli effetti generati dagli eventi selezionati, quest'ultimi sono stati raggruppati in 11 Centri sismici per i quali possono essere riconosciute caratteristiche sismologiche omogenee. Sempre in Figura 1 viene mostrata la distribuzione dei Centri sismici così definiti, sovrapposta alla Zonazione Sismogenetica del territorio nazionale ZS9 [Meletti e Valensise, 2004]: dal confronto si nota che l'andamento generale dei Centri sismici segue in modo soddisfacente quello delle ZS9, aumentandone il dettaglio descrittivo.

Più nel dettaglio, seguendo la corrispondenza con la Zonazione Sismogenetica del territorio nazionale ZS9, i Centri sismici possono essere così raggruppati:

- a) nella ZS9 n. 923, descritta come l'area a maggiore rilascio di energia dell'Appennino centro-settentrionale e caratterizzata da importanti faglie primarie cui corrispondono le più estese sorgenti sismogenetiche ed i terremoti a magnitudo più elevata:
  - Centri sismici 4) Avezzano e 5) Aquilano, caratterizzati da eventi con magnitudo 6.5–7.0 ed intensità epicentrali tra il IX-X e l'XI grado MCS. La distribuzione dei risentimenti degli eventi collegati a questi centri sismici presenta un andamento a carattere regionale.
  - Centro 2) Umbro-reatino, con eventi a magnitudo 6.0-6.5 ma sempre con intensità epicentrali elevate tra il X e l'XI MCS e influenza a carattere regionale.
  - Centro 6) Lazio meridionale, con magnitudo 6.0-6.5 ma intensità epicentrali tra il IX-X e il X MCS e tendenza ad una maggiore attenuazione delle intensità con la distanza epicentrale, cui corrisponde una distribuzione a carattere provinciale.
- b) nella ZS9 n. 927, nella quale cadono eventi al di fuori dei confini amministrativi del Lazio, rappresentativa dell'area a massimo rilascio di energia dell'Appennino meridionale, legata ad una tettonica di tipo distensivo:
  - Centro 8) Sannio-Basilicata-Irpinia, con eventi ad elevati valori sia di magnitudo (6.5-7.0), sia di intensità epicentrale (tra in X e l'XI MCS). La distribuzione delle

intensità legate a questo Centro sismico si sovrappone a quella data dal Centro sismico n. 6, contribuendo ai livelli di scuotimento locale del suolo con un apporto di tipo *far field*.

c) nella ZS9 n. 920, che viene descritta come coincidente con il settore tirrenico a tettonica distensiva, caratterizzato da una sismicità a bassa energia con sporadici eventi a magnitudo relativamente elevata:

- Centro 3) Reatino, i cui eventi presentano magnitudo 5.5-6.0 ed intensità epicentrali tra il VII-VIII e l'VIII-IX MCS. I campi macrosismici mostrano un rapido decadimento con la distanza epicentrale, conferendo a questo Centro sismico una influenza a carattere prevalentemente provinciale.
- Centri 10) Monterotondo e 11) Monti Simbruini, sono due Centri sismici a carattere essenzialmente locale, con eventi di magnitudo 5.0 circa ed intensità epicentrali tra il VI ed il VII MCS. Per la loro posizione intermedia tra la fascia Appenninica a forte sismicità e la costa, forniscono un contributo non trascurabile alla definizione dei livelli di sismicità locale dei Comuni interessati dai relativi eventi.

d) nella ZS9 n. 921, corrispondente all'area del Lazio settentrionale:

- Centro 1) Viterbese, caratterizzato da eventi con magnitudo tra 5.0 e 5.5 ed intensità epicentrali tra il VII e l'VIII MCS. Unica eccezione è il terremoto di Bagnoregio dell'11/6/1695 al quale viene assegnata una magnitudo prossima a 6.0 ed una intensità epicentrale di VIII-IX MCS. La distribuzione delle intensità per gli eventi di questo Centro mostra forte attenuazione con la distanza epicentrale, compatibile con una posizione molto superficiale degli ipocentri, con una conseguente influenza a carattere provinciale.

e) nella ZS9 n. 922, comprendente l'area dei Colli Albani, fino alla costa a sud di Roma, rientrano sia il Centro sismico direttamente legato al distretto vulcanico, sia quello connesso ad alcuni eventi con carattere locale, con epicentri più spostati verso la costa:

- Centro 7) Colli Albani. Come nel caso del viterbese, i terremoti di questo Centro sismico presentano magnitudo moderate (tra 5.0 e 5.5) ed intensità epicentrali tra il VI-VII ed il VII-VIII MCS. Si conferma in questa area vulcanica la tendenza ad una limitata estensione areale dei danni più significativi probabilmente legata ad una bassa profondità ipocentrale e conseguentemente una distribuzione dei risentimenti a livello provinciale.

- Centro 9) Litorale romano. Anche questo Centro sismico risulta caratterizzato da eventi con una magnitudo tra 5.0 e 5.5, mentre le intensità sono comprese tra il VI ed il VII MCS. Gli eventi collegati a questo Centro sismico hanno una influenza locale sul livello di sismicità dei Comuni interessati.

Le Zone sismogenetiche 921 e 922 racchiudono le aree della fascia tirrenica caratterizzate da un elevato flusso di calore, coincidenti con i distretti vulcanici del Lazio settentrionale e dei Colli Albani. Tale settore è caratterizzato da una sismicità diffusa ma con moderato rilascio di energia, con pochi eventi a magnitudo più elevata.

Per ognuno degli 11 Centri sismici sopra descritti, è stata eseguita l'analisi della distribuzione dei risentimenti locali, cercando di evidenziare, tra tutti gli eventi selezionati, quelli più gravosi per le UAS del Lazio.

### **2.1.2. Modellazione dei Campi Macrosismici**

Nella determinazione delle intensità sismiche locali generate da ogni terremoto occorre risolvere primariamente il problema della “spazializzazione” del dato macrosismico puntiforme e cioè la estensione areale dei valori di intensità assegnati ad ogni località presente nei campi macrosismici. In altre parole occorre cercare la migliore procedura, relativamente all'oggetto dell'analisi, per interpolare le informazioni sui risentimenti contenute nei singoli campi macrosismici.

Come ormai ampiamente dibattuto all'interno della comunità scientifica, il modello di distribuzione spaziale delle intensità di un terremoto dipende dalla sovrapposizione di fattori sia di tipo regionale, come il modello di radiazione della sorgente o le caratteristiche dei livelli crostali attraversati dalle onde sismiche, sia locali quali le caratteristiche geologiche e morfologiche dei singoli siti: queste ultime possono generare fenomeni di attenuazione o amplificazione locale che a loro volta possono influenzare il livello di danneggiamento del sito e, conseguentemente, la distribuzione generale delle intensità di un terremoto.

Per una corretta valutazione della pericolosità sismica locale proveniente da informazioni di carattere storico, è necessario ricostruire un modello “medio” della distribuzione dei risentimenti, tale da ridurre al minimo l'influenza delle caratteristiche di sito sulla valutazione dell'intensità locale.

A questo proposito è stata valutata la possibilità di adottare un approccio deterministico nella ricostruzione delle distribuzioni areali di intensità mediante l'applicazione di leggi di attenuazione dell'intensità con la distanza epicentrale, applicando sia la classica relazione di Blake con i parametri stimati per l'Italia Centrale [Blake, 1941], sia le nuove formulazioni delle relazioni di

attenuazione della intensità macrosismica adottate nel corso del Progetto S1 dell'INGV [Gómez Capera *et al.*, 2007; Albarello *et al.*, 2007], in particolare un modello che ipotizza un decadimento proporzionale alla radice cubica della distanza epicentrale [Gómez Capera, 2006] e un secondo di tipo log-lineare [Pasolini *et al.*, 2007a–b] nel quale la attenuazione dell'intensità è funzione della distanza ipocentrale e di un parametro definito come un equivalente macrosismico della magnitudo.

I test eseguiti su alcuni degli eventi meglio documentati non sono stati soddisfacenti in quanto, analizzando la distribuzione degli scarti tra le intensità osservate e quelle teoriche, sono stati ottenuti valori molto variabili sia in termini di distanza epicentrale, sia di azimuth. Questo risultato può dipendere anche dal fatto che tutti i modelli ipotizzano un decadimento isotropo della intensità, mentre i campi macrosismici reali, soprattutto per gli eventi appenninici, mostrano una spiccata anisotropia.

Pertanto la ricostruzione della distribuzione spaziale delle intensità è stata effettuata mediante carte delle isosisme tracciate manualmente. Nonostante le riserve sollevate all'interno della comunità scientifica riguardo l'uso di tale tecnica, in primo luogo per la soggettività insita nel tracciamento delle isolinee, in questa fase del lavoro si è ritenuto che tale procedura fosse la migliore per l'analisi della pericolosità a scala regionale.

### **2.1.3. Individuazione degli eventi più gravosi per il territorio del Lazio**

L'identificazione degli eventi a cui associare le massime intensità storiche locali è stata eseguita utilizzando un sottoinsieme dei 103 eventi che hanno causato intensità locali superiori alla soglia del danno. Tale sottoinsieme è stato ottenuto eliminando:

- eventi avvenuti prima dell'anno 1000, per la incompletezza delle informazioni macrosismiche disponibili;
- eventi con pochi punti di intensità locale, ad esclusione di due casi (26/5/1819 di Tarquinia nel Centro sismico n. 1 e 15/8/1795 di S. Gregorio da Sassola nel Centro sismico n. 11) per i quali i pochi dati disponibili risultano significativi nella valutazione della sismicità nei Comuni interessati;
- eventi particolari, quali il terremoto del 9/9/1349 con area epicentrale Viterbese-Umbria, in quanto il relativo campo macrosismico si discosta notevolmente dall'andamento prevalente per i restanti terremoti del Centro sismico n. 1. D'altra parte questo evento risulta far parte di una sequenza di forti terremoti riportati nei cataloghi NT4.1.1/81-92 (marzo 1998), CFTI4 Med e CPTI04 quasi con la stessa data ed apparentemente riferibili allo stesso set di

informazioni storiche.

Successivamente, procedendo separatamente per ogni Centro sismico, sono stati cercati i terremoti che causano le massime intensità storiche locali.

Partendo dagli eventi con le intensità epicentrali più elevate ed i campi macrosismici meglio definiti, sono state tracciate le relative carte delle isosisme. A queste sono stati sovrapposti i campi macrosismici dei restanti eventi, procedendo per intensità epicentrali decrescenti, in modo da individuare ed eliminare gli eventi per i quali le intensità locali cadono in aree comprese entro isosisme di intensità maggiore e che, quindi, non contribuiscono alla valutazione delle massime intensità storiche. In caso contrario, quando i campi macrosismici presentano intensità locali uguali o superiori, i relativi eventi sono stati mantenuti e sono state tracciate le loro isosisme.

In questo modo sono risultati selezionati 33 eventi dei 103 terremoti di partenza: nella Tabella I vengono mostrati i relativi parametri sismologici tratti dal CPTI04.

**Tabella I**

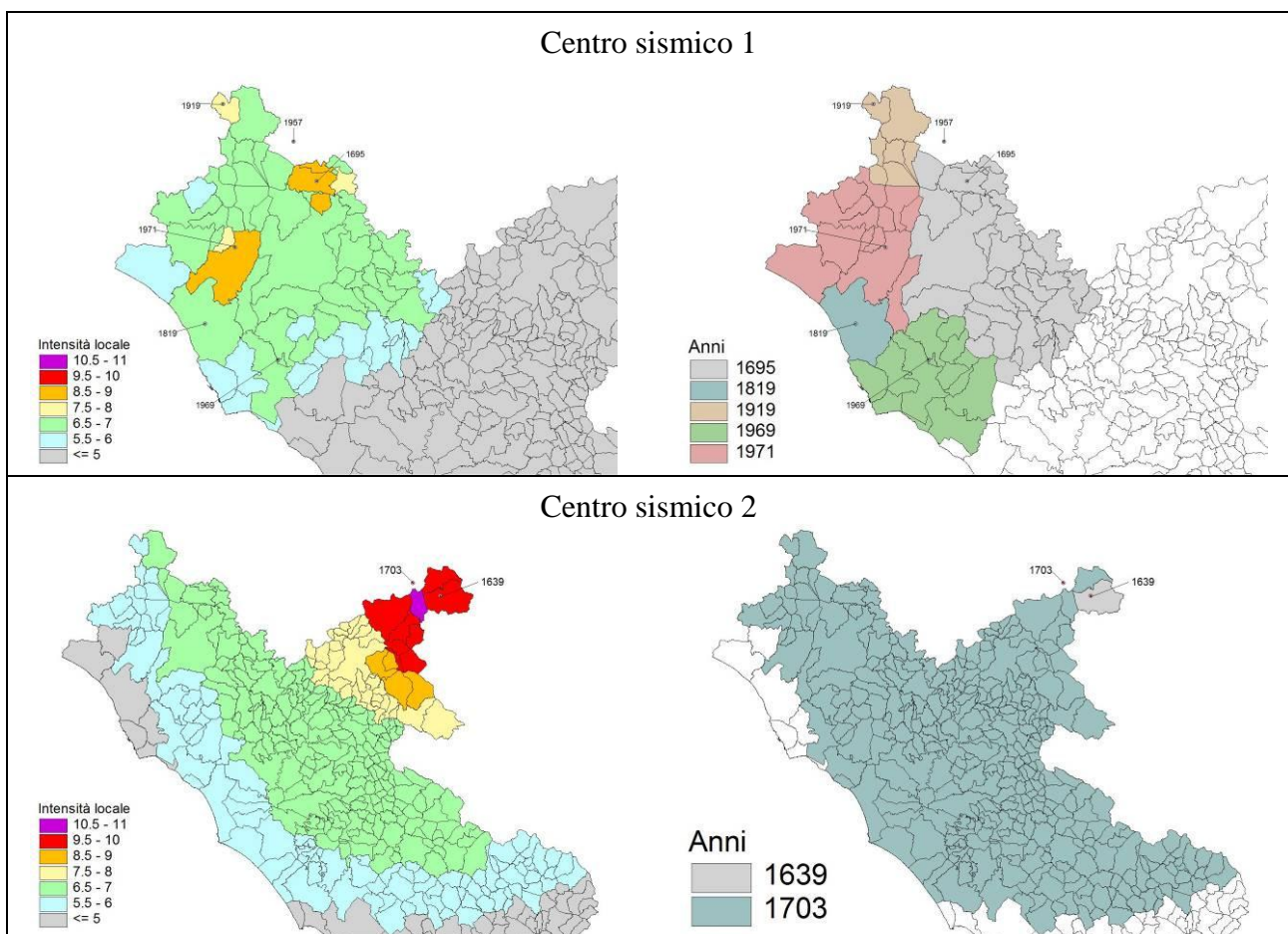
N	ANNO	ME	GI	OR	MI	SE	AE	RT	NP	IMX	IO	TI	LAT	LON	TL	MAW	DAW	TW	MAS	DAS	TS	MSP	DSP	ZS9	TZ	NCFT	NNT	NCPT	ZONE
417	1695	6	11	2	30	0	BAGNOREGIO	DOM	50	90	85		42.612	12.110	A	5.77	0.10		5.70	0.15		5.70	0.15	921	G	277	903	417	1
744	1819	5	26	16	30	0	TARQUINIA	DOM	1	70	70		42.252	11.757	A	5.17	0.30		4.80	0.45		4.99	0.42	921	A	0	2029	744	1
1687	1919	9	10	16	57	0	PIANCASTAGNAIO	DOM	67	80	80		42.793	11.788	A	5.38	0.07		5.11	0.10		5.28	0.09	921	G	486	918	1687	1
2117	1957	12	6	4	54	0	CASTEL GIORGIO	DOM	63	75	70		42.707	12.029	A	5.17	0.30		4.80	0.45		4.99	0.42	921	G	0	930	2117	1
2268	1969	7	2	7	55	0	TOLFA	DOM	72	70	70		42.168	12.002	A	5.08	0.23		4.67	0.34		4.87	0.32	921	G	0	943	2268	1
2294	1971	2	6	18	9	0	TUSCANIA	DOM	89	85	75		42.442	11.846	A	4.90	0.08		4.40	0.12		4.62	0.11	921	G	535	932	2294	1
343	1639	10	7	0	30	0	AMATRICE	DOM	27	100	100		42.636	13.252	A	6.26	0.22		6.26	0.22		6.26	0.22	923	G	254	1329	343	2
434	1703	1	14	18	0	0	Appennino reatino	CFTI	196	110	110		42.680	13.120	A	6.81	0.10		6.81	0.10		6.81	0.10	923	G	289	1107	434	2
72	1298	12	1	0	0	0	Reatino	CFTI	7	95	85	M	42.550	12.830	A	5.93	0.11		5.93	0.17		5.93	0.17	923	A	134	1101	72	3
643	1785	10	9	0	0	0	PIEDILUCO	DOM	33	80	80		42.564	12.777	A	5.48	0.13		5.26	0.19		5.42	0.18	920	G	335	1115	643	3
1299	1898	6	27	23	38	0	RIETI	DOM	186	80	75		42.415	12.905	A	5.48	0.11		5.27	0.16		5.43	0.15	920	G	0	1132	1299	3
445	1706	11	3	13	0	0	Maiella	CFTI	99	105	95	M	42.080	14.080	A	6.60	0.12		6.60	0.12		6.60	0.12	923	A	292	1392	445	4
1608	1915	1	13	6	52	0	AVEZZANO	DOM	1041	110	110		42.013	13.530	A	6.99	0.08		6.99	0.08		6.99	0.08	923	G	477	1308	1608	4
97	1349	9	9	0	0	0	Aquilano	CFTI	22	100	95		42.170	13.380	A	6.46	0.25		6.46	0.25		6.46	0.25	923	G	153	1324	97	5
435	1703	2	2	11	5	0	Aquilano	CFTI	70	100	100		42.470	13.200	A	6.65	0.16		6.65	0.16		6.65	0.16	923	G	291	1332	435	5
38	1170	5	9	0	0	0	Ceccano	CFTI	1	80	80		41.570	13.330	A	5.57	0.19		5.40	0.28		5.55	0.28	920	G	102	1231	38	6
95	1349	9	9	9	0	0	Lazio merid - Molise	CFTI	24	100	100		41.480	14.070	A	6.62	0.23		6.62	0.23		6.62	0.23	923	G	154	1238	95	6
358	1654	7	23	0	25	0	Sorano-Marsica	CFTI	44	100	95		41.630	13.680	A	6.17	0.17		6.17	0.17		6.17	0.17	923	G	259	1240	358	6
706	1806	8	26	7	35	0	Colli Albani	CFTI	35	80	75	M	41.720	12.730	A	5.47	0.14		5.25	0.21		5.41	0.19	922	G	357	954	706	7
779	1829	6	1	9	0	0	Colli Albani	CFTI	25	70	70		41.750	12.680	A	5.17	0.30		4.80	0.45		4.99	0.42	922	G	376	956	779	7
1012	1876	10	26	14	18	0	PALESTRINA	DOM	29	70	65		41.827	12.784	A	5.03	0.33		4.60	0.49		4.80	0.45	922	G	0	960	1012	7
1319	1899	7	19	13	18	54	Colli Albani	CFTI	125	70	70		41.800	12.680	A	5.18	0.11		4.82	0.16		5.01	0.15	922	G	455	969	1319	7
1800	1927	12	26	15	6	14	Colli Albani	CFTI	38	80	70		41.700	12.700	A	5.02	0.15		4.58	0.23		4.79	0.21	922	G	491	974	1800	7
153	1456	12	5	0	0	0	MOLISE	DOM	199	110	100		41.302	14.711	A	6.96	0.14		6.96	0.14		6.96	0.14	927	G	187	1451	153	8
394	1688	6	5	15	30	0	Sannio	CFTI	216	110	110		41.280	14.570	A	6.72	0.11		6.72	0.11		6.72	0.11	927	G	268	1454	394	8
700	1805	7	26	21	0	0	Molise	CFTI	223	100	100		41.500	14.470	A	6.57	0.11		6.57	0.11		6.57	0.11	927	G	356	1457	700	8
1244	1895	11	1	0	0	0	CASTELPORZIANO	DOM	98	65	60		41.768	12.440	A	4.83	0.26		4.30	0.39		4.53	0.36	922	G	0	938	1244	9
1691	1919	10	22	6	10	0	ANZIO	DOM	142	70	70		41.537	12.684	A	5.53	0.05		5.33	0.07		5.48	0.06	922	G	0	973	1691	9
180	1484	1	19	0	0	0	MONTEROTONDO	DOM	6	65	65		42.090	12.562	A	5.06	0.18		4.64	0.27		4.84	0.25	0	0	934	180	10	
1342	1901	4	24	14	20	0	MONTELIBRETTI	DOM	44	80	75		42.100	12.736	A	5.15	0.15		4.78	0.23		4.97	0.21	920	G	0	986	1342	10
678	1795	8	15	0	0	0	S. GREGORIO DA SASS.	DOM	2	70	70		41.918	12.871	A	5.17	0.30		4.80	0.45		4.99	0.42	920	G	0	980	678	11
1975	1941	9	8	16	30	0	CERVARA DI ROMA	DOM	13	70	65		41.988	13.068	A	5.03	0.33		4.60	0.49		4.80	0.45	920	G	0	1294	1975	11
2530	2000	3	11	10	35	27	ALTO ANIENE	INGVAM	7	60	60		41.936	13.016	A	4.73	0.18	O	4.19	0.23		4.42	0.21	920	G	0	0	0	11

## 2.2. Valutazione delle massime intensità storiche locali

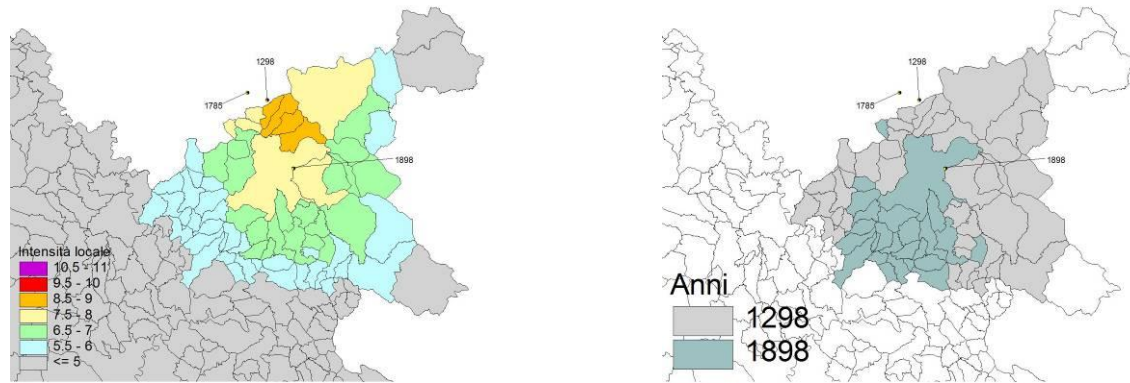
Le informazioni così raccolte sono state elaborate in ambiente GIS in modo da assegnare alle UAS del Lazio, per ogni Centro sismico, i valori delle intensità locali superiori alla soglia del danno più elevate e gli eventi che le hanno prodotte. A parità di intensità locale, viene privilegiato il contributo fornito dall'evento con l'epicentro più vicino.

Tale elaborazione ha consentito di generare una tabella GIS riassuntiva dei valori di massima intensità locale, riferibile agli eventi rappresentativi dei diversi Centri sismici, risentiti nelle diverse UAS. In questo modo è stata ottenuta una ulteriore selezione degli eventi precedentemente individuati, tale da ridurre a 29 il numero di terremoti significativi per la definizione della pericolosità sismica locale su base storica.

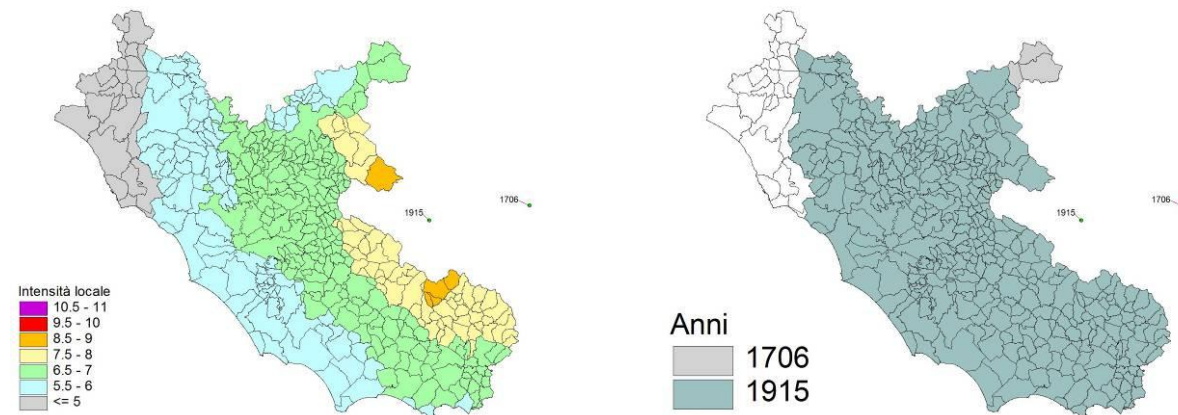
In Figura 2 vengono riportate, per ogni Centro sismico, la distribuzione delle massime intensità storiche assegnate alle UAS, affiancata a quella degli anni dei rispettivi terremoti di riferimento: i parametri sismologici di questi ultimi sono sintetizzati in Tabella II.



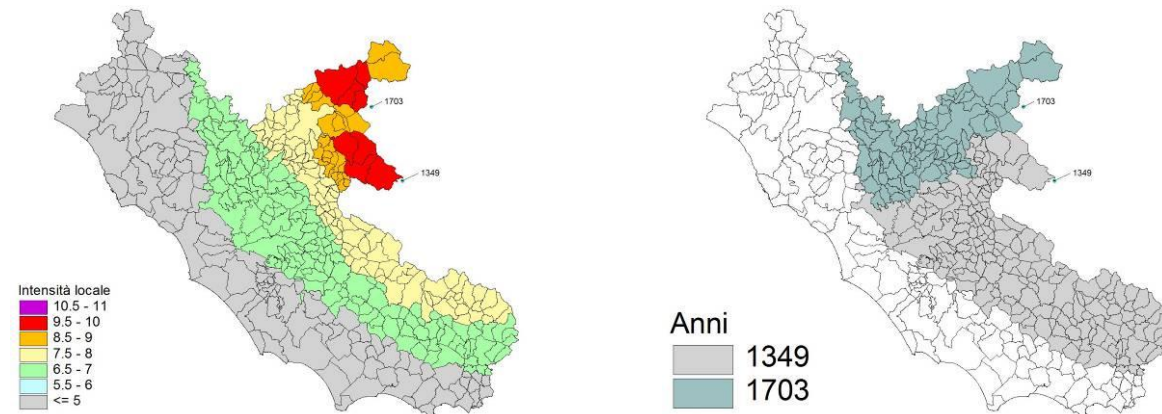
### Centro sismico 3



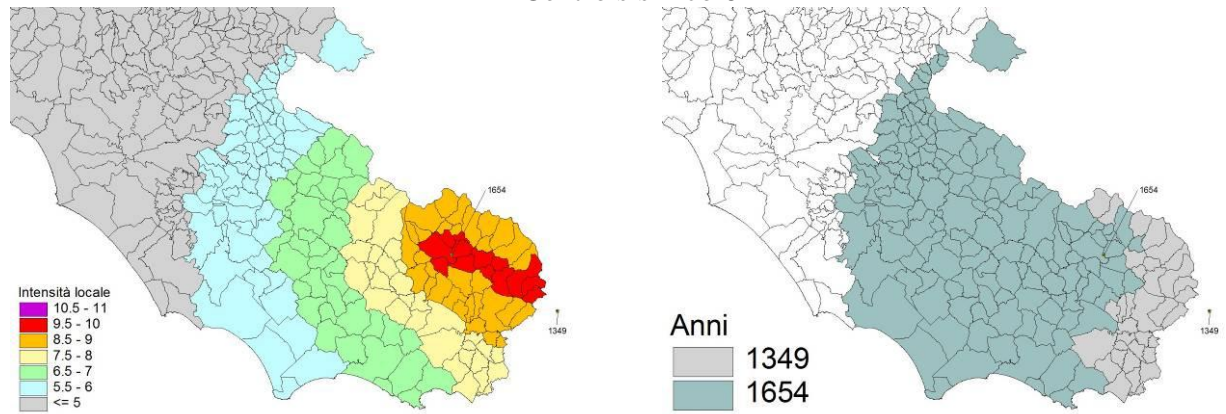
### Centro sismico 4



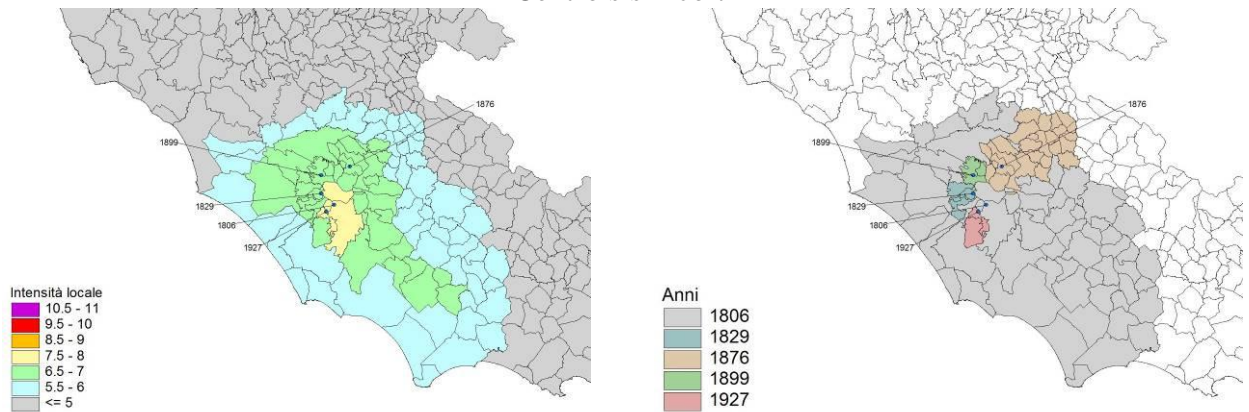
### Centro sismico 5



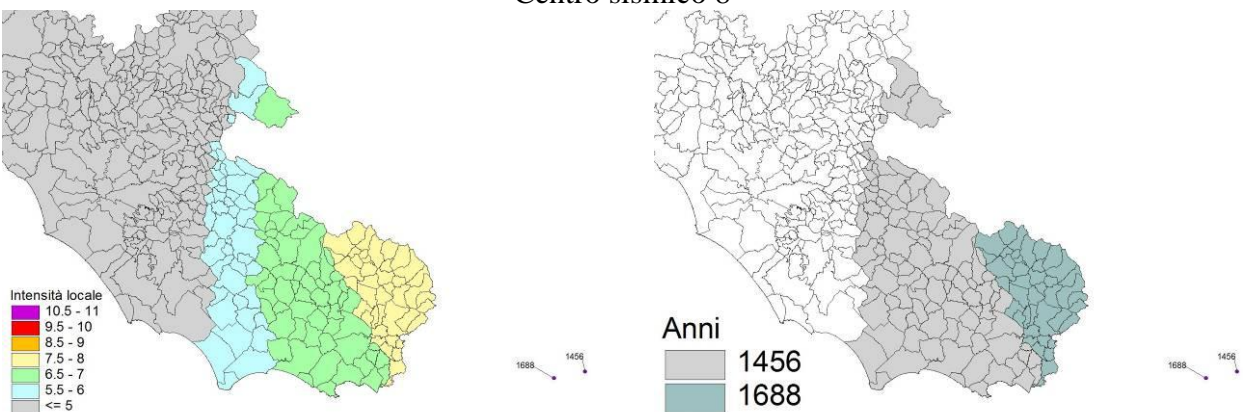
### Centro sismico 6



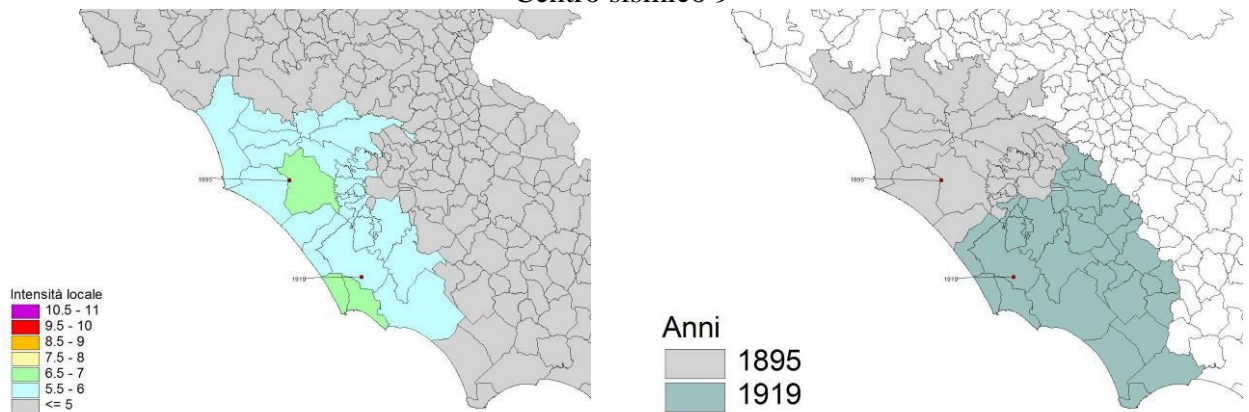
Centro sismico 7



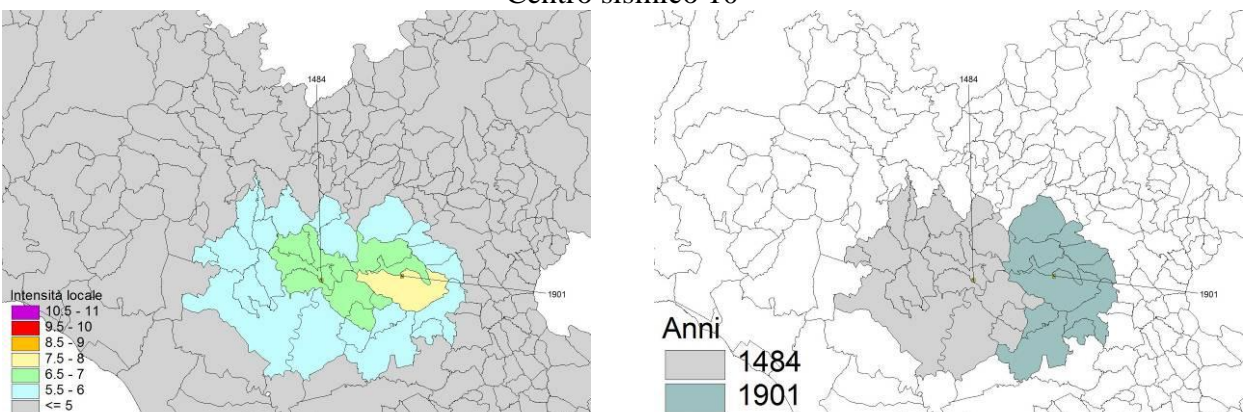
Centro sismico 8

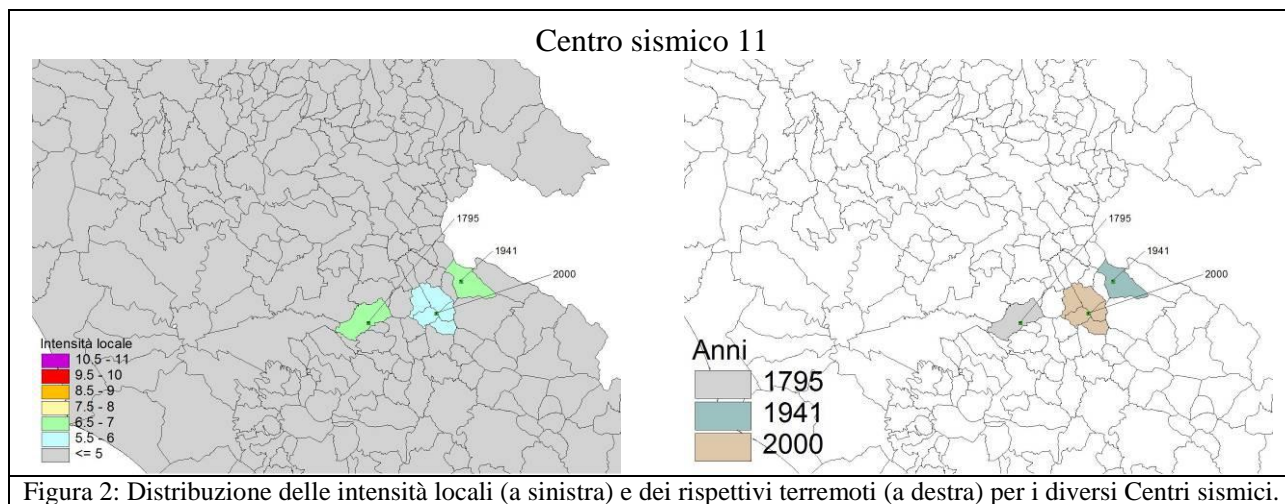


Centro sismico 9



Centro sismico 10





Nella stessa Figura 2, viene confermata la differente estensione geografica dell'influenza, attribuibile ai diversi Centri sismici, sulla distribuzione delle intensità storiche nel territorio del Lazio. Da questo punto di vista, essi possono essere raggruppati in:

- Centri sismici con un'area d'influenza a scala regionale: come nel caso dei Centri 2, 4 e 5;
- Centri sismici a scala provinciale: Centri 1, 3, 6, 7 e 8;
- Centri sismici a carattere essenzialmente locale: Centri 9, 10 e 11.

**Tabella II**

ANNO	ME	GI	OR	MI	SE	AE	IO	MAW	ZONE
1695	6	11	2	30	0	BAGNOREGIO	85	5.77	1
1819	5	26	16	30	0	TARQUINIA	70	5.17	1
1919	9	10	16	57	0	PIANCASTAGNAIO	80	5.38	1
1969	7	2	7	55	0	TOLFA	70	5.08	1
1971	2	6	18	9	0	TUSCANIA	75	4.90	1
1639	10	7	0	30	0	AMATRICE	100	6.26	2
1703	1	14	18	0	0	Appennino reatino	110	6.81	2
1298	12	1	0	0	0	Reatino	85	5.93	3
1898	6	27	23	38	0	RIETI	75	5.48	3
1706	11	3	13	0	0	Maiella	95	6.60	4
1915	1	13	6	52	0	AVEZZANO	110	6.99	4
1349	9	9	0	0	0	Aquilano	95	6.46	5
1703	2	2	11	5	0	Aquilano	100	6.65	5
1349	9	9	9	0	0	Lazio merid.-Molise	100	6.62	6
1654	7	23	0	25	0	Sorano-Marsica	95	6.17	6
1806	8	26	7	35	0	Colli Albani	75	5.47	7
1829	6	1	9	0	0	Colli Albani	70	5.17	7
1876	10	26	14	18	0	PALESTRINA	65	5.03	7
1899	7	19	13	18	54	Colli Albani	70	5.18	7
1927	12	26	15	6	14	Colli Albani	70	5.02	7
1456	12	5	0	0	0	MOLISE	100	6.96	8
1688	6	5	15	30	0	Sannio	110	6.72	8
1895	11	1	0	0	0	CASTELPORZIANO	60	4.83	9
1919	10	22	6	10	0	ANZIO	70	5.53	9
1484	1	19	0	0	0	MONTEROTONDO	65	5.06	10
1901	4	24	14	20	0	MONTELIBRETTI	75	5.15	10
1795	8	15	0	0	0	S. Gregorio da Sassola	70	5.17	11
1941	9	8	16	30	0	CERVARA DI ROMA	65	5.03	11
2000	3	11	10	35	27	ALTO ANIENE	60	4.73	11

Si è quindi proceduto alla assegnazione delle massime intensità storiche per le UAS del Lazio, elaborando i livelli di intensità locale forniti da tutti i Centri sismici. Analizzando la tabella GIS riassuntiva delle informazioni macrosismiche, sono stati calcolati i massimi valori delle intensità osservate in ogni UAS, generando una ulteriore tabella nella quale sono state salvate le informazioni relative ai Centri sismici che hanno prodotto una intensità locale pari alla massima intensità storica delle singole UAS, eliminando tutte le altre informazioni.

La distribuzione geografica dei massimi storici viene mostrata in Figura 3 A). Questi sono disposti,

concordemente con l'assetto strutturale e sismotettonico dell'Italia Centrale, in fasce parallele all'asse appenninico, con i massimi localizzati nel reatino e nel Lazio meridionale. Un'ampia fascia ad intensità intermedia, tra il VI-VII ed il VII MCS, occupa l'area centrale della Regione, inglobando i Centri sismici a scala provinciale del viterbese e dei Colli Albani, nonché quelli locali di Monterotondo e dei Monti Simbruini. Infine, lungo il litorale si posizionano le intensità più basse, appena al di sopra della soglia del danno, ad eccezione delle UAS interessate dal Centro sismico del Litorale romano.

Occorre inoltre notare che l'analisi eseguita sulle Unità Amministrative Sismiche, ha aumentato significativamente il dettaglio della definizione dei livelli di pericolosità sismica locale. Il problema di aree comunali troppo estese rispetto alle variazioni di intensità locali con le distanze epicentrali sembra porsi anche per il viterbese dove, nei Comuni di Viterbo, Tuscania, Tarquinia e Tolfa, l'andamento delle isosisme mostra decadimenti che possono raggiungere i due gradi di intensità all'interno dello stesso Comune. Stessa situazione è ipotizzabile anche per alcuni Comuni del frusinate, quali ad esempio Cassino.

Per verificare la attendibilità dei risultati ottenuti, sono stati confrontati i valori delle massime intensità storiche assegnate alle UAS del Lazio con i corrispondenti livelli di pericolosità sismica calcolati secondo la procedura descritta nei documenti prodotti dal Progetto S1 dell'INGV [Albarelo *et al.* 2007a, Albarelo *et al.* 2007b] ed in particolare utilizzando il codice di calcolo SASHA [D'Amico e Albarelo, 2007].

Il codice SASHA adotta, come nella presente analisi, un approccio "di sito" e stima i valori di intensità locale caratterizzati dalla probabilità di eccedenza nell'intervallo cronologico stabiliti dall'operatore. L'analisi viene condotta partendo dai valori di intensità locale osservati integrati, in assenza di informazioni macrosismiche relative a terremoti comunque noti, con le intensità locali calcolate mediante una relazione di attenuazione ed eventualmente corretti sulla base dei risentimenti osservati in località vicine.

Nel caso specifico l'elaborazione è stata eseguita, per ogni UAS, utilizzando i dati contenuti nel DBMI04 integrati con i valori ottenuti applicando una legge di attenuazione generale valida per il territorio italiano [Pasolini *et al.*, 2007a–b] con i parametri dei terremoti presenti nel Catalogo CPTI04. Per i dettagli della metodologia si rimanda alla documentazione fornita nel sito del Progetto S1 (<http://esse1.mi.ingv.it/deliverable.html>).

Sono state calcolate le intensità con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, corrispondenti ad un tempo di ritorno di 475 anni (Figura 3 B) e con probabilità di eccedenza del 2% in 50 anni, corrispondenti ad un tempo di ritorno di 2475 anni (Figura 3 C).

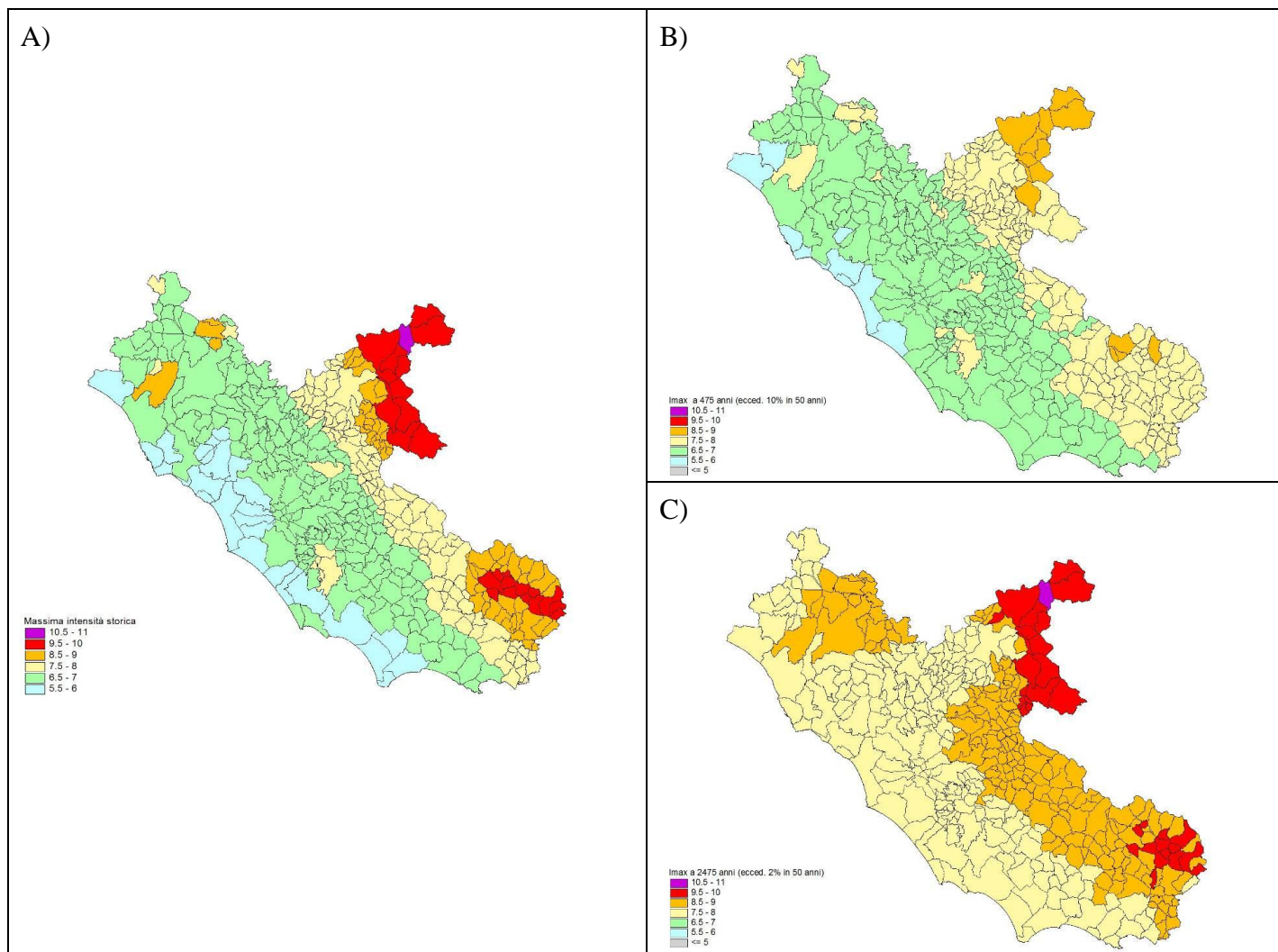


Figura 3: Confronto tra: A) massime intensità storiche ottenute nel presente lavoro; B) e C) pericolosità sismica in termini di intensità macrosismica, calcolata mediante il codice SASHA [D’Amico e Albarello, 2007], ed espressa dal valore di intensità con, in B), probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (tempo di ritorno 475 anni) e, in C), probabilità di eccedenza del 2% in 50 anni (tempo di ritorno 2475 anni).

Dal confronto emerge che i valori più elevati delle massime intensità storiche forniti dalla presente analisi per il settore appenninico del reatino e nel Lazio meridionale, concordano con i livelli di pericolosità calcolati per una probabilità di eccedenza del 2% in 50 anni (tempo di ritorno di 2475 anni) e, quindi, dovrebbero essere rappresentativi delle massime intensità potenzialmente osservabili in queste aree.

Nella restante parte del territorio, l’elaborazione probabilistica calcolata sempre per un tempo di ritorno di 2475 anni, fornisce due soli livelli di pericolosità, il primo caratterizzato da una intensità del IX grado MCS in corrispondenza del viterbese nord-orientale e della parte orientale del Lazio centro-meridionale, il secondo con una intensità dell’VIII grado MCS nel resto della regione e lungo la costa tirrenica. Parallelamente, la pericolosità calcolata per un tempo di ritorno di 475 anni fornisce indicazioni, per le intensità tra il VI e l’VIII gradi MCS, in linea con quanto ottenuto nel

presente studio evidenziando i contributi dei centri sismici collegati agli apparati vulcanici del viterbese e dei Colli Albani, anche se sembra sovrastimare le intensità locali nella fascia costiera del Lazio meridionale.

I valori forniti dal calcolo probabilistico a 2475 anni relativamente alle UAS della fascia pre-appenninica e costiera, sembrano troppo conservativi rispetto ai valori effettivamente osservati. Ciò potrebbe essere legato all'uso di una legge di attenuazione generale, valida per tutto il territorio nazionale, che tende a sottostimare il decadimento delle intensità in alcune aree del Lazio. Inoltre, come già evidenziato nel paragrafo 2.1.2 relativo alla modellazione dei campi macrosismici, le leggi di attenuazione di tipo isotropo, come quella utilizzata nell'analisi probabilistica della pericolosità, non si adattano sufficientemente alla elevata anisotropia di alcuni forti terremoti appenninici.

### 2.3. Classificazione dei livelli di sismicità storica nelle UAS del Lazio

La classificazione delle UAS in aree a sismicità omogenea è avvenuta mediante la generazione di "Indici" che riassumono i parametri sismologici degli eventi più gravosi.

In particolare, per ogni UAS e distinguendo secondo gli 11 Centri sismici, sono state raccolte le informazioni relative agli eventi che hanno generato le massime intensità storiche locali comprensive di data, localizzazione epicentrale, intensità epicentrale e magnitudo; la localizzazione georiferita degli epicentri è stata utilizzata per il calcolo delle distanze epicentrali dei capoluoghi comunali. I valori corrispondenti a tali parametri sono stati ridotti in Classi definite secondo le scale discrete riportate in Tabella III.

<b>Tabella III</b>					
<b>Intensità Locale</b>	<b>Classe</b>	<b>Magnitudo</b>	<b>Classe</b>	<b>Distanza (km)</b>	<b>Classe</b>
V-VI / VI	-> 06	≤ 5.00	-> 50	0 – 10	-> 10
VI-VII / VII	-> 07	5.00 – 5.50	-> 55	11 – 30	-> 30
VII-VIII / VIII	-> 08	5.51 – 6.00	-> 60	31 – 60	-> 60
VIII-IX / IX	-> 09	6.01 – 6.50	-> 65	61 – 100	-> 100
IX-X / X	-> 10	6.51 – 7.00	-> 70	> 100	-> 999

Adottando un criterio cautelativo, i valori di intensità intermedi sono stati riportati al grado immediatamente superiore. Sulla base di queste informazioni sono stati generati gli Indici rappresentativi degli eventi che hanno contribuito alla definizione dei livelli di massima sismicità

storica locale. Ogni indice è costituito da 7 cifre delle quali le prime due si riferiscono alla Classe della intensità epicentrale, le successive 2 alla Classe di magnitudo e le ultime 3 alla classe di distanza epicentrale: ad esempio l'Indice 0755010 viene assegnato ad un evento con intensità epicentrale di Classe 07, con Classe di magnitudo 55 e con una Classe di distanza 10.

**Tabella IV**

Frequenze	0.250	0.330	0.500	0.670	1.000	1.330	2.000	2.500	3.330	5.000	6.670	10.000	15.000	25.000
<b>PSA</b>														
50010	0.002	0.004	0.010	0.018	0.035	0.055	0.092	0.125	0.181	0.227	0.218	0.173	0.131	0.099
50030	0.001	0.001	0.004	0.006	0.013	0.020	0.034	0.046	0.068	0.085	0.083	0.066	0.051	0.036
55010	0.005	0.010	0.023	0.038	0.071	0.105	0.164	0.208	0.280	0.329	0.311	0.245	0.186	0.144
55030	0.002	0.003	0.008	0.014	0.026	0.038	0.060	0.077	0.104	0.124	0.118	0.094	0.072	0.052
55060	0.001	0.002	0.004	0.007	0.013	0.019	0.030	0.039	0.053	0.063	0.060	0.048	0.036	0.026
60010	0.011	0.022	0.050	0.082	0.145	0.203	0.291	0.348	0.432	0.477	0.444	0.347	0.264	0.211
60030	0.004	0.008	0.018	0.029	0.052	0.074	0.107	0.129	0.161	0.180	0.169	0.133	0.102	0.077
60060	0.002	0.004	0.009	0.015	0.026	0.037	0.054	0.065	0.081	0.091	0.086	0.068	0.052	0.039
65010	0.025	0.051	0.111	0.175	0.292	0.391	0.518	0.581	0.667	0.692	0.635	0.493	0.375	0.308
65030	0.009	0.018	0.039	0.062	0.105	0.142	0.190	0.215	0.249	0.261	0.241	0.189	0.145	0.112
65060	0.004	0.009	0.020	0.031	0.053	0.072	0.096	0.109	0.126	0.132	0.122	0.096	0.073	0.057
65100	0.003	0.005	0.012	0.019	0.032	0.043	0.058	0.065	0.076	0.079	0.074	0.058	0.044	0.034
65999	0.002	0.004	0.008	0.013	0.021	0.029	0.039	0.044	0.050	0.053	0.049	0.039	0.030	0.023
70010	0.058	0.115	0.244	0.374	0.592	0.753	0.921	0.969	1.029	1.003	0.907	0.700	0.532	0.451
70030	0.020	0.040	0.086	0.133	0.213	0.274	0.338	0.359	0.384	0.378	0.345	0.269	0.205	0.164
70060	0.010	0.020	0.043	0.067	0.107	0.138	0.171	0.181	0.194	0.192	0.175	0.136	0.104	0.083
70100	0.006	0.012	0.026	0.040	0.065	0.083	0.103	0.109	0.117	0.115	0.105	0.082	0.063	0.050
70999	0.004	0.008	0.017	0.027	0.043	0.055	0.069	0.073	0.078	0.077	0.070	0.055	0.042	0.033

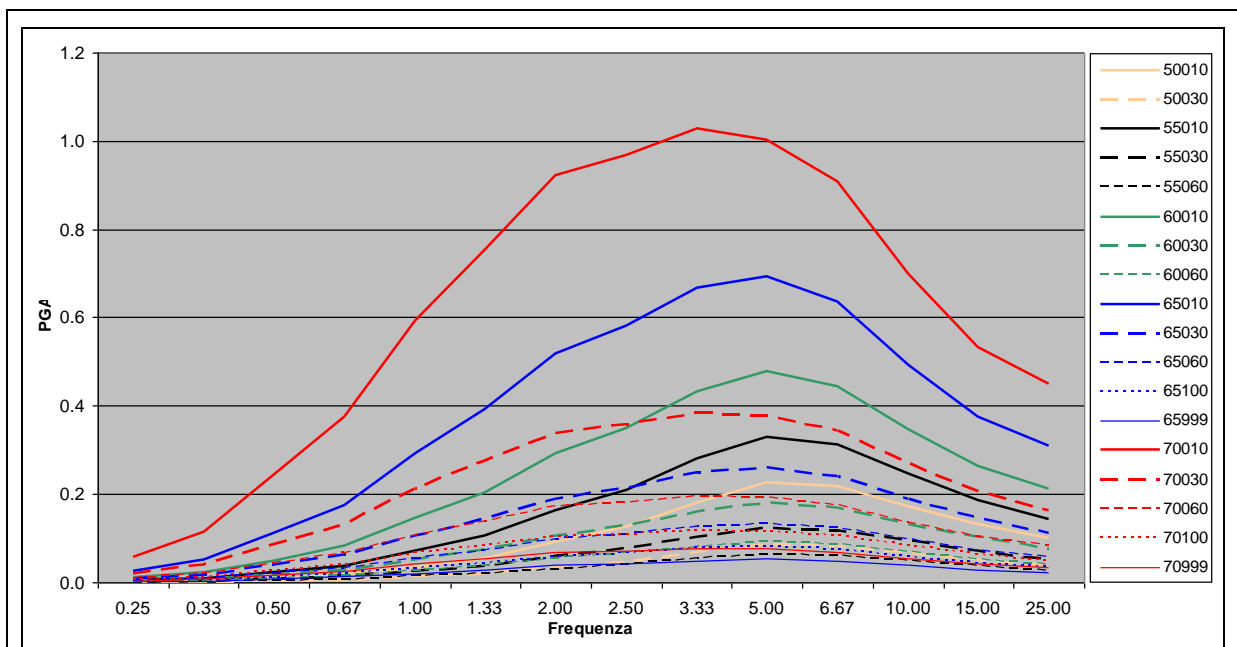


Figura 4: Spettri calcolati applicando la legge di attenuazione Sabetta e Pugliese, 1996.

Considerando che la massima intensità storica di una UAS può derivare da eventi riconducibili a più di un Centro sismico, contando quanti indici risultano assegnati alle singole UAS, si ottengono:

- 11 UAS con 4 indici;
- 33 UAS con 3 indici;
- 112 UAS con 2 indici;
- 246 UAS con 1 indice.

A questo punto è sorta la necessità di valutare l'influenza locale degli eventi che hanno determinato i diversi livelli di massima intensità storica. In altre parole si è cercata una via per individuare, per le UAS alle quali sono stati assegnati 2 o più indici, quelli relativi agli eventi che sono probabilmente più importanti per la definizione del livello di pericolosità sismica locale.

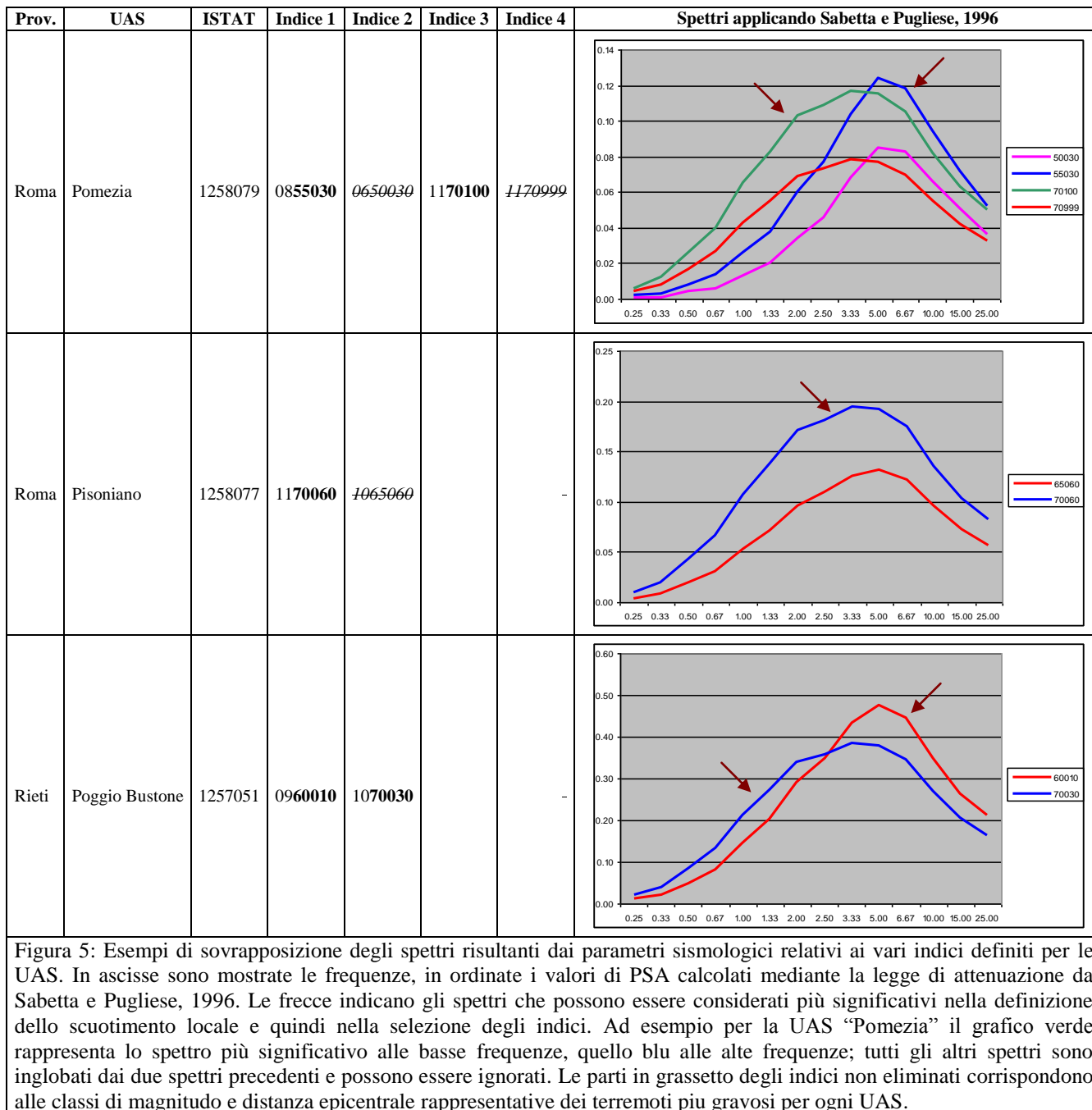
L'influenza locale degli eventi legati ad ogni indice è stata analizzata ricostruendo il probabile livello di scuotimento locale, descritto con spettri di risposta calcolati mediante la legge di attenuazione da Sabetta e Pugliese, 1996. Tale relazione di attenuazione calcola per diverse tipologie di substrato, sulla base della distanza dall'epicentro o dal piano di faglia e della magnitudo, i valori delle ordinate spettrali (PSA) locali delle componenti orizzontali e verticali, a frequenze prefissate.

Nel nostro caso sono stati calcolati gli spettri risultanti dai valori di magnitudo e distanza epicentrale, corrispondenti ai valori massimi delle Classi presenti nei vari indici, per un substrato rigido. I valori dell'accelerazione di picco (PGA) risultanti per le diverse coppie di valori magnitudo/distanza sono riportati in Tabella IV mentre le corrispondenti forme spettrali sono in Figura 4.

Sovrapponendo per ogni UAS gli spettri calcolati sulla base degli indici assegnati, è possibile valutare il probabile contributo di ogni indice e quindi dell'evento ad esso collegato, nella definizione del livello di massima intensità storica locale, eliminando gli indici relativi alle forme spettrali corrispondenti, per tutte le frequenze, ai più bassi valori di accelerazione. Nella Figura 5 sono mostrati alcuni esempi rappresentativi delle diverse situazioni incontrate.

Per il Comune di Pomezia sono stati definiti 4 indici; di questi solo due risultano significativi: l'indice 1170100 per le basse frequenze ed il 0855030 per le alte frequenze. Gli spettri relativi ai restanti indici 0650030 e 1170999 risultano inglobati dai precedenti e quindi possono essere eliminati dall'analisi.

Per il Comune di Pisoniano risultano definiti due indici, entrambi connessi ad eventi con classe di distanza epicentrale 60 (tra 31 e 60 km) ma con magnitudo differente. I grafici degli spettri mostrano che quello relativo all'indice 117060 sovrasta quello relativo all'indice 1065060 per cui descrive completamente il probabile livello di scuotimento locale .



Infine, per Poggio Bustone, gli spettri calcolati descrivono in modo differente la situazione alle basse frequenze (indice 1070030) ed alle alte frequenze (indice 0960010). In questo caso occorrerà tenere conto degli apporti dovuti da entrambi gli indici.

Applicando questo criterio di selezione agli indici calcolati per tutte le UAS del Lazio (l’elenco completo viene riportato in Appendice A), è stata ottenuta la distribuzione riportata in Figura 6.

In questo modo è stato possibile ridurre a 2 il numero massimo di indici assegnati ad una singola UAS. Eseguendo nuovamente il conteggio degli indici finali assegnati (Appendice B), risultano:

- 32 UAS con 2 indici;
- 370 UAS con 1 indice.

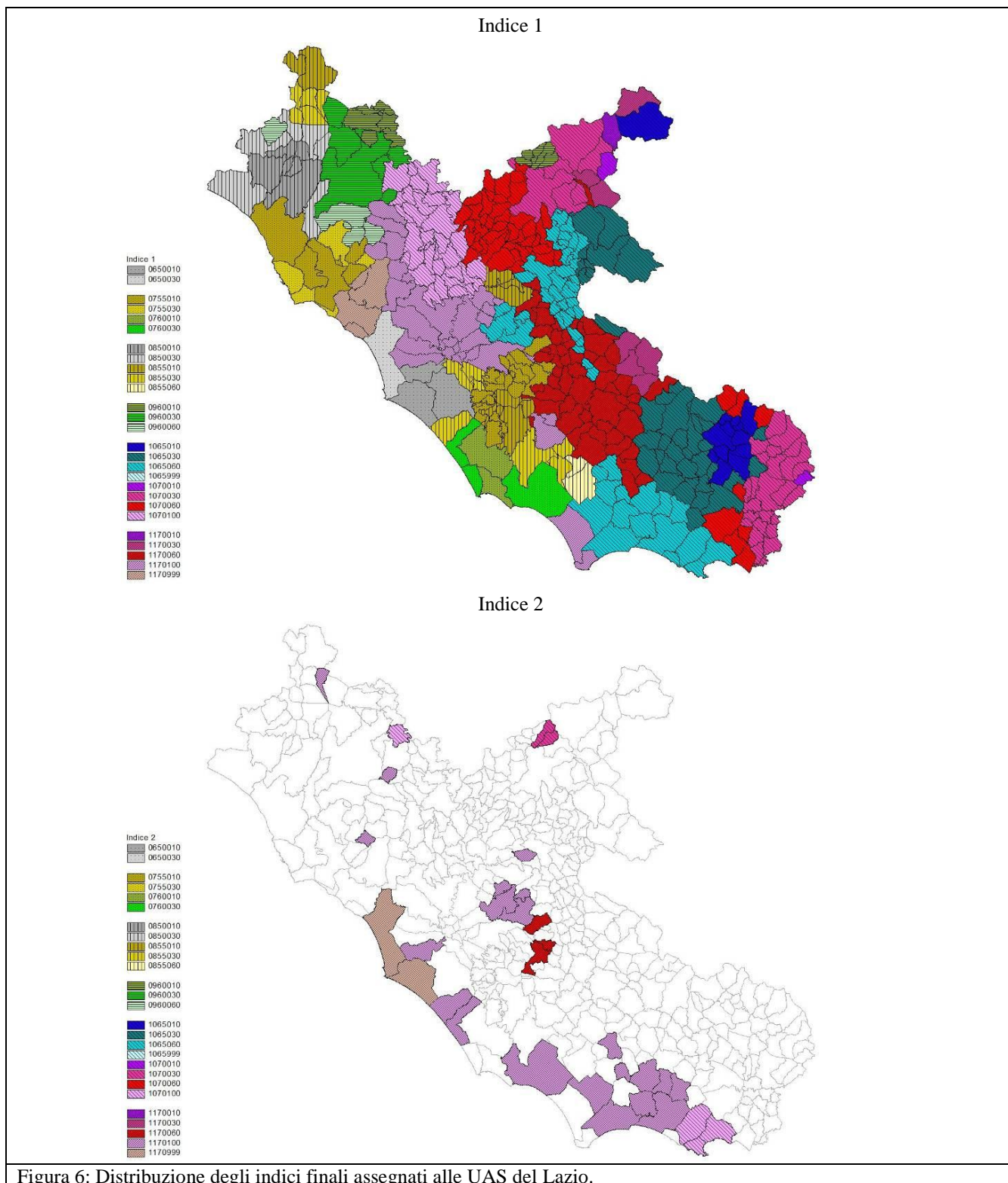


Figura 6: Distribuzione degli indici finali assegnati alle UAS del Lazio.

### 3. Metodo statistico

#### 3.1. Introduzione

Scopo dell'analisi statistica è stato quello di studiare le forme di spettri ad *hazard* uniforme elaborati nell'ambito del Progetto S1 dell'INGV, in modo da permettere un loro raggruppamento in funzione di parametri statistici significativi. Per rendere la nostra analisi confrontabile con i livelli di pericolosità di riferimento per il territorio nazionale previsti dalle Norme Tecniche [DM 14 gennaio 2008], sono stati elaborati i valori di accelerazione spettrale calcolati per periodi compresi tra 0.0 e 2.0 sec, con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (tempo di ritorno uguale a 475 anni), corrispondenti al 50° percentile. Tali valori sono distribuiti geograficamente su di una griglia a maglie quadrate di circa 5 km di lato, in corrispondenza dei vertici di ogni maglia (di seguito indicati come punti-griglia INGV).

In un primo momento gli spettri, per essere confrontabili in termini di forma, sono stati normalizzati al PGA; tuttavia successive analisi hanno mostrato la necessità di eseguire la scelta dei gruppi partendo dai dati non normalizzati. In particolare è emerso che analizzando le forme spettrali normalizzate si ottenevano *clusters* non compatibili con l'andamento generale della pericolosità sismica regionale fornita dal Progetto S1 dell'INGV.

La procedura di analisi statistica adottata nel presente lavoro può essere suddivisa in due fasi.

In una prima fase sono state studiate le forme spettrali, tenendo conto della struttura algebrica posseduta dai dati: ciò ha orientato nella scelta della misura di diversità tra coppie di unità statistiche. E' stato così deciso di utilizzare la distanza tra due punti contigui dello spettro ed il coefficiente angolare della retta passante tra di essi. I raggruppamenti di forme spettrali sono stati cercati mediante metodi di analisi multivariata, ponendo particolare attenzione alla rappresentatività delle variabili statistiche (distanze e coefficienti angolari). Le variabili, per come sono state definite, sono tra esse dipendenti e pertanto i vari test per la validazione dei raggruppamenti di forme spettrali (ad esempio il CCC) non sono risultati significativi.

Nella seconda fase, per superare questa limitazione ed ottenere una più appropriata definizione dei gruppi di spettri di risposta, anche tenendo conto della particolare struttura dei dati fortemente polarizzati a livello spaziale e con asimmetria nella loro distribuzione, è sembrato preferibile utilizzare una “*cluster-analysis*” non parametrica. Più nel dettaglio, gli spettri sono stati modellati mediante una regressione con il polinomio di Pearson del IV tipo e successivamente sottoposti alla “*cluster-analysis*”.

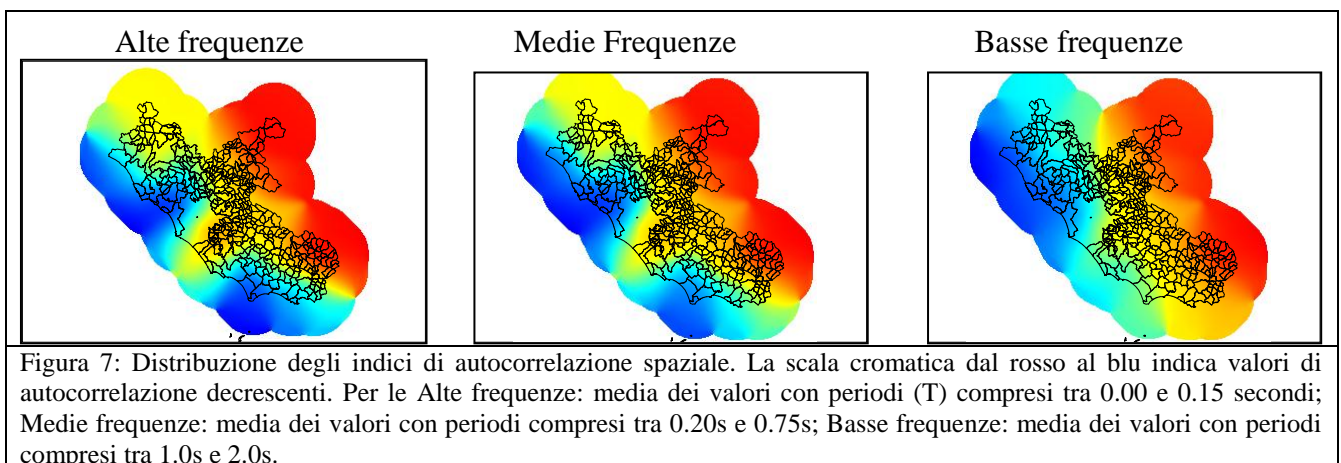
A conclusione dell'analisi statistica sono stati definiti 6 Gruppi di Unità Amministrative Sismiche

a pericolosità sismica omogenea. L'inquadrimento geografico globale dei Gruppi di UAS e le relative forme spettrali di riferimento, sembrano essere rappresentativi delle caratteristiche sismogenetiche della regione Lazio.

### 3.2. Analisi non parametrica

Viene di seguito presentata la metodologia applicata per arrivare alla classificazione delle UAS in 6 Gruppi omogenei dal punto di vista della pericolosità sismica. Prima di descrivere nel dettaglio la procedura utilizzata, è opportuno sottolineare la presenza di una forte autocorrelazione spaziale nei dati in analisi.

Per "autocorrelazione spaziale" s'intende la caratteristica delle osservazioni statistiche di influenzarsi a vicenda in ragione della loro contiguità spaziale, nel senso che i valori di ciascun punto risultano essere fortemente correlati a quelli relativi ai punti più vicini. In altri termini, minore è la distanza tra le osservazioni, maggiore è la probabilità di individuare *pattern* simili. Questa considerazione non costituisce di per sé una sorpresa, data la natura del fenomeno in esame, ma serve a guidare preliminarmente la vera e propria *clustering*, nonché a dettare alcune ipotesi relative alla distribuzione spaziale dei valori di accelerazione. Considerando un raggio di 5 km, ovvero porzioni di territorio di area pari a circa 80 km<sup>2</sup>, l'indice di autocorrelazione spaziale di Moran [Moran, 1950; Anselin, 1995; Fotheringham *et al.*, 2000] oscilla tra 0.64 e 0.67 ed è quindi piuttosto elevato, dato che il massimo valore teorico di questo parametro è pari ad 1.



In Figura 7 sono evidenziate, mediante l'interpolazione dei valori in funzione delle distanze (*Inverse Distance Weighting*) applicata ai 556 punti-griglia INGV analizzati, le aree a maggior autocorrelazione spaziale. Ognuna di queste aree, a parità di cromatismo, evidenzia un addensamento spaziale di valori simili. Tali aree saranno di ausilio nella individuazione dei futuri

*cluster*.

La scelta dell’algoritmo di classificazione ottimale, a seguito di numerosi tentativi *trial and error*, è ricaduta sul *Kernel Density*. E’ una tecnica altrimenti nota come *cluster-analysis* non parametrica. In quanto non parametrica, la funzione non è definita a priori: le ipotesi di lavoro sono meno vincolanti e l’analisi ne guadagna in termini di flessibilità. I *cluster* vengono definiti semplicemente in termini di regioni che circondano un punto di massimo di una funzione di densità di probabilità (il cosiddetto “nocciolo”). Laddove si verificano dei picchi del valore di probabilità si determina un potenziale *cluster*. Il motivo principale di preferenza per tale tecnica risiede nel fatto che consente di pervenire ad una caratterizzazione in *cluster* che sia effettivamente svincolata dalla costrizione in forme geometriche, nello spazio multivariato, sostanzialmente regolari e simmetriche, cosa che invece si verifica con i metodi tradizionali gerarchici o non gerarchici. A maggior ragione, quando si proiettano le formazioni ivi ottenute in un sistema GIS, ovvero in uno spazio geografico, occorre liberarsi dal vincolo della regolarità.

Allo scopo di pervenire ad una classificazione dei punti di rilevazione in base alle forme degli spettri di risposta, è stata utilizzata una curva di interpolazione dei punti con l’intento di “ricostruire” l’intero spettro. La successiva operazione di *clustering* è stata effettuata sulle suddette curve e, non già sui valori originari delle accelerazioni spettrali. Più precisamente, sono stati calcolati 100 rapporti incrementali della funzione interpolata, ad un passo di 2 centesimi di secondo, per un arco da 0 a 2 secondi. In questa luce, i rapporti incrementali sostituiscono i valori di accelerazione originari, poiché modellano nel loro insieme curve spettrali peculiari.

La funzione interpolatrice ottimale è stata individuata nella equazione di *Pearson* del IV tipo: tale funzione è stata soltanto di recente utilizzata in ambito scientifico, soprattutto nello studio di fenomeni fisici, per caratterizzare la forma di distribuzioni sommariamente simili alla *t* di *Student* ma con una spiccatissima asimmetria. Il valore predetto in base a questa funzione è:

$$y = \frac{a}{\left( 1 + \frac{4(x-b)^2 \left( 2^{\frac{1}{d}} - 1 \right)}{c^2} \right)^d}$$

Il parametro  $a$  corrisponde all'ampiezza,  $b$  corrisponde alla simmetria rispetto al centro,  $c$  e  $d$  costituiscono fattori di correzione che hanno come unico vincolo quello di essere positivi. Il valore medio di  $R^2$  ottenuto, si aggira intorno a 0.99.

Il numero di Gruppi tale da consentire una buona sintesi senza eccessiva perdita d'informazioni è risultato uguale a nove (Figura 8). Il *cluster* n. 9 tuttavia corrisponde a pochissime osservazioni, relative a punti-griglia posti immediatamente a Nord e a Sud di Roma, che sembrano indicare la presenza di una "zona-cuscinetto" tra aree sismologicamente differenziate. Di conseguenza, in sede di validazione esperta dei risultati, è stato possibile accorpate i punti-griglia di questo *cluster* nei Gruppi contigui più simili. Di seguito (Tabella VI), a fini descrittivi, sono mostrate le principali statistiche relative ai 9 Gruppi ottenuti con l'analisi delle *Kernel Density*.

**Tabella VI**

Statistiche descrittive dei *clusters* ottenuti con la *kernel density* relative alle diverse classi di frequenze

Cluster	Numero di casi	N. Indice (Media T Lazio = 1 sec)			Media Ag		
		ALTE	MEDIE	BASSE	ALTE	MEDIE	BASSE
<b>1</b>	75	96.1	88.4	69.7	0.26	0.25	0.05
<b>2</b>	110	62.3	63.8	64.4	0.17	0.18	0.05
<b>3</b>	158	112.7	112.1	113.9	0.31	0.31	0.09
<b>4</b>	58	114.6	106.0	87.9	0.31	0.30	0.07
<b>5</b>	40	165.6	168.1	171.3	0.45	0.47	0.13
<b>6</b>	59	61.4	70.8	89.9	0.17	0.20	0.07
<b>7</b>	28	165.4	168.7	179.7	0.45	0.47	0.14
<b>8</b>	20	73.5	89.2	119.6	0.20	0.25	0.09
<b>9</b>	8	90.5	86.3	76.6	0.25	0.24	0.06

(continua)

Cluster	Numero di casi	Deviazione standard			Coefficiente di variazione		
		ALTE	MEDIE	BASSE	ALTE	MEDIE	BASSE
<b>1</b>	75	0.02	0.02	0.00	7.5	7.9	7.8
<b>2</b>	110	0.03	0.03	0.01	19.1	17.3	14.1
<b>3</b>	158	0.03	0.04	0.01	10.7	12.2	17.0
<b>4</b>	58	0.02	0.02	0.01	6.9	6.8	7.7
<b>5</b>	40	0.02	0.03	0.01	4.6	5.8	5.4
<b>6</b>	59	0.03	0.03	0.01	18.4	14.4	11.3
<b>7</b>	28	0.02	0.03	0.01	4.5	5.6	5.4
<b>8</b>	20	0.02	0.02	0.01	12.4	9.9	6.7
<b>9</b>	8	0.01	0.01	0.00	3.5	4.9	8.0

Giova a questo punto ricordare che le attività d'analisi relative al presente programma di ricerca, sono avvenute in concomitanza con la pubblicazione della nuova Normativa Sismica nazionale [DM 14 gennaio 2008] che prevede l'utilizzo, da parte dei progettisti che devono operare in zona sismica, di spettri elastici di sito differenziati nel territorio, distribuiti con una maglia di circa 5 km

di lato (la stessa usata per gli spettri ad hazard uniforme del Progetto S1 dell'INGV).

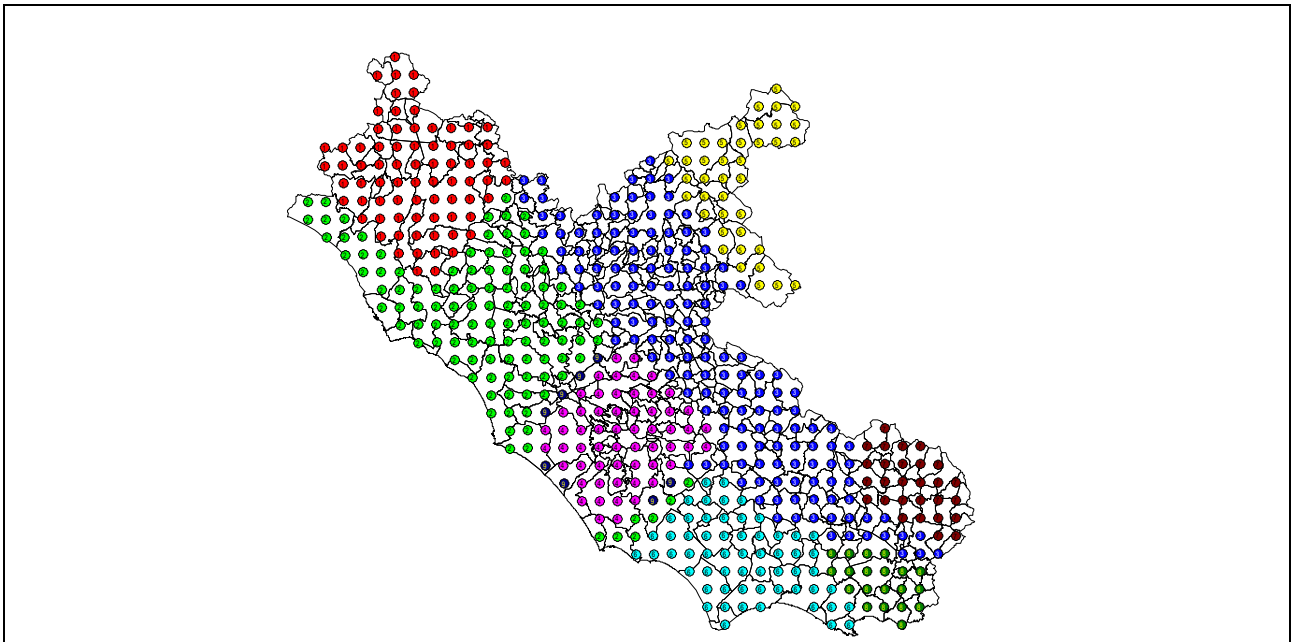


Fig. 8 – Distribuzione geografica dei *cluster* ottenuti elaborando i valori spettrali dei 556 punti-griglia INGV.

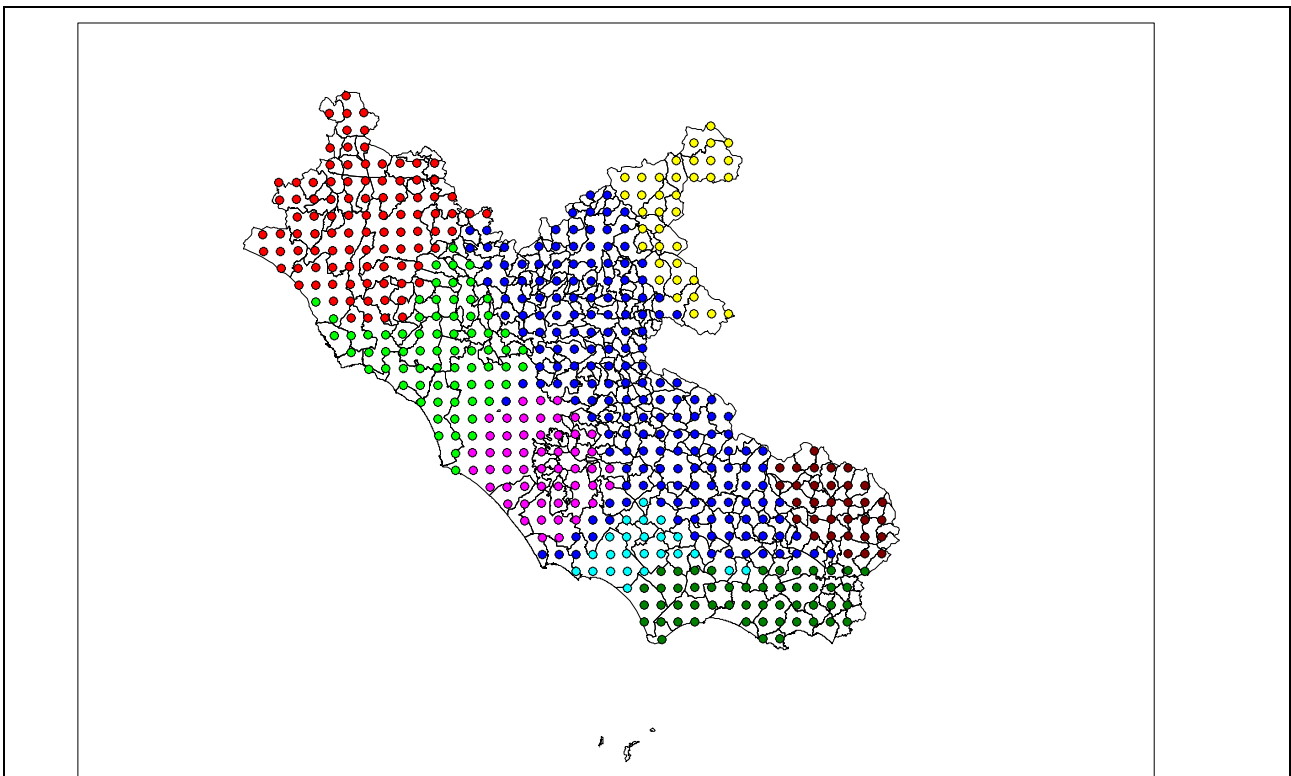
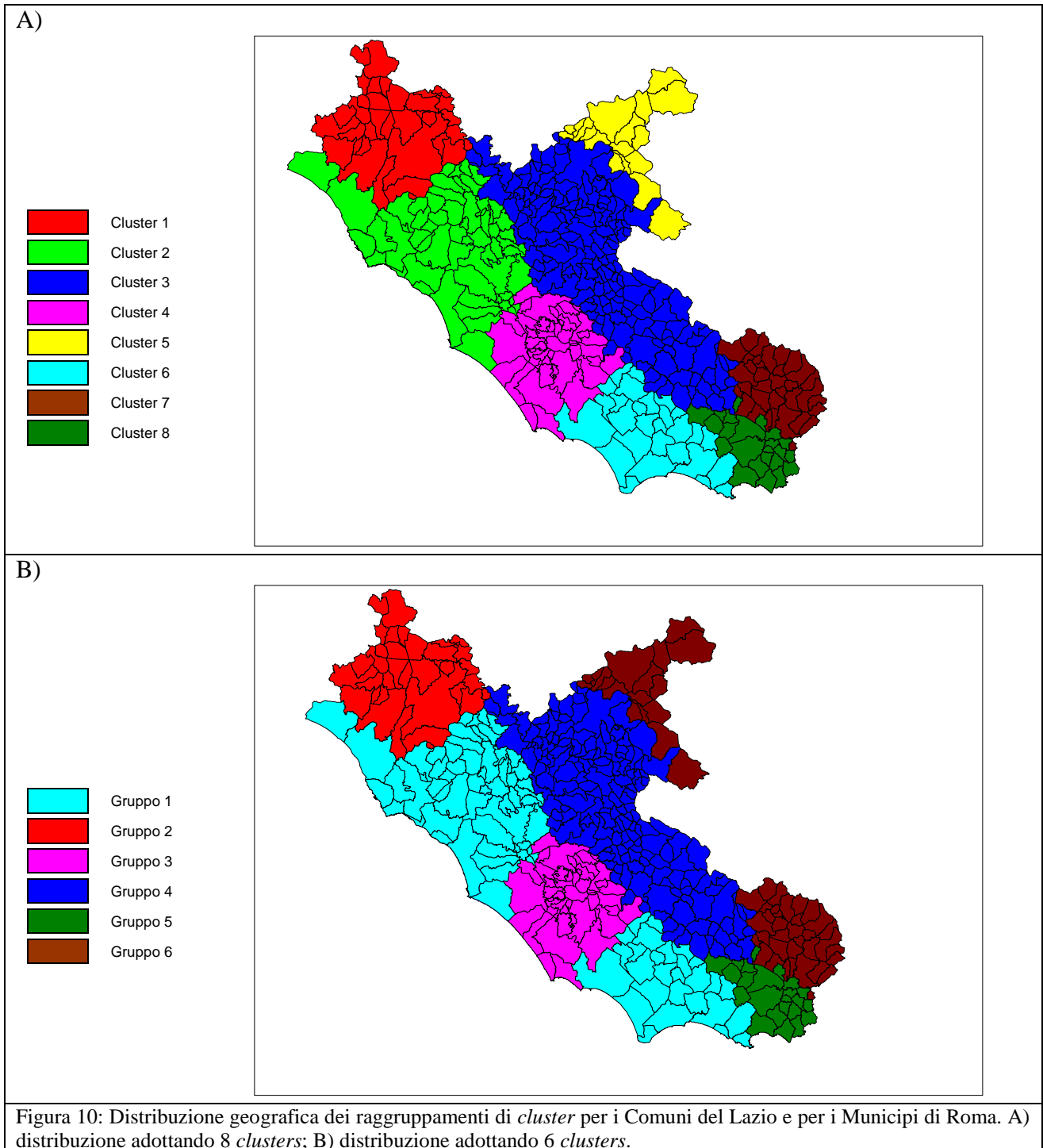


Fig. 9 – Distribuzione geografica dei *cluster* per i valori spettrali forniti dalla nuova Normativa Sismica nazionale.

E' stato pertanto ritenuto interessante eseguire l'elaborazione degli spettri elastici di normativa, definiti per la categoria di suolo "A" e per i quali sono stati assegnati i parametri  $a_g$ ,  $F_o$  e  $T_c^*$ , con la

stessa tecnica statistica con cui sono stati trattati gli spettri ad *hazard* uniforme: la classificazione risultante da tale analisi è mostrata in Figura 9.



Dal confronto tra le due classificazioni così ottenute (Figure 8 e 9), appare chiaramente come la suddivisione in gruppi differisca nelle zone di confine con Toscana e Campania, mentre nelle zone centrali ed in quelle confinanti con l’Abruzzo i risultati sembrano coincidere. Molte ipotesi possono

essere proposte per spiegare tali differenze; ad esempio che vi sia un'influenza dei valori spettrali limitrofi a distanze maggiori di quelli considerati, oppure che vi sia l'intento di rendere maggiormente conservativa la normativa in tali aree.

La fase successiva del lavoro è consistita nel passaggio dalla classificazione dei 556 punti-griglia della rilevazione INGV (Figura 8), a quella delle 402 UAS del Lazio: in altre parole si è passati da una classificazione di punti-*cluster* ad una di UAS-*cluster*. Tale processo induttivo è stato condotto essenzialmente sulla base di criteri statistici e di giudizio esperto che tenessero conto sia degli indicatori statistici di ciascun punto, sia dei profili di contiguità territoriale dei punti stessi.

A titolo di esempio, quando il territorio amministrativo di una UAS contiene punti appartenenti a due *cluster* differenti, o anche a più di due, l'assegnazione al proprio Gruppo d'appartenenza avviene sulla base dei punti-*cluster* prevalenti, nonché della classificazione delle UAS limitrofe dal momento che, come descritto precedentemente, data la forte autocorrelazione spaziale tra i punti di misura è possibile in parte inferire le caratteristiche di una UAS anche dalle UAS confinanti. Il risultato di questa induzione è rappresentato in Figura 10.

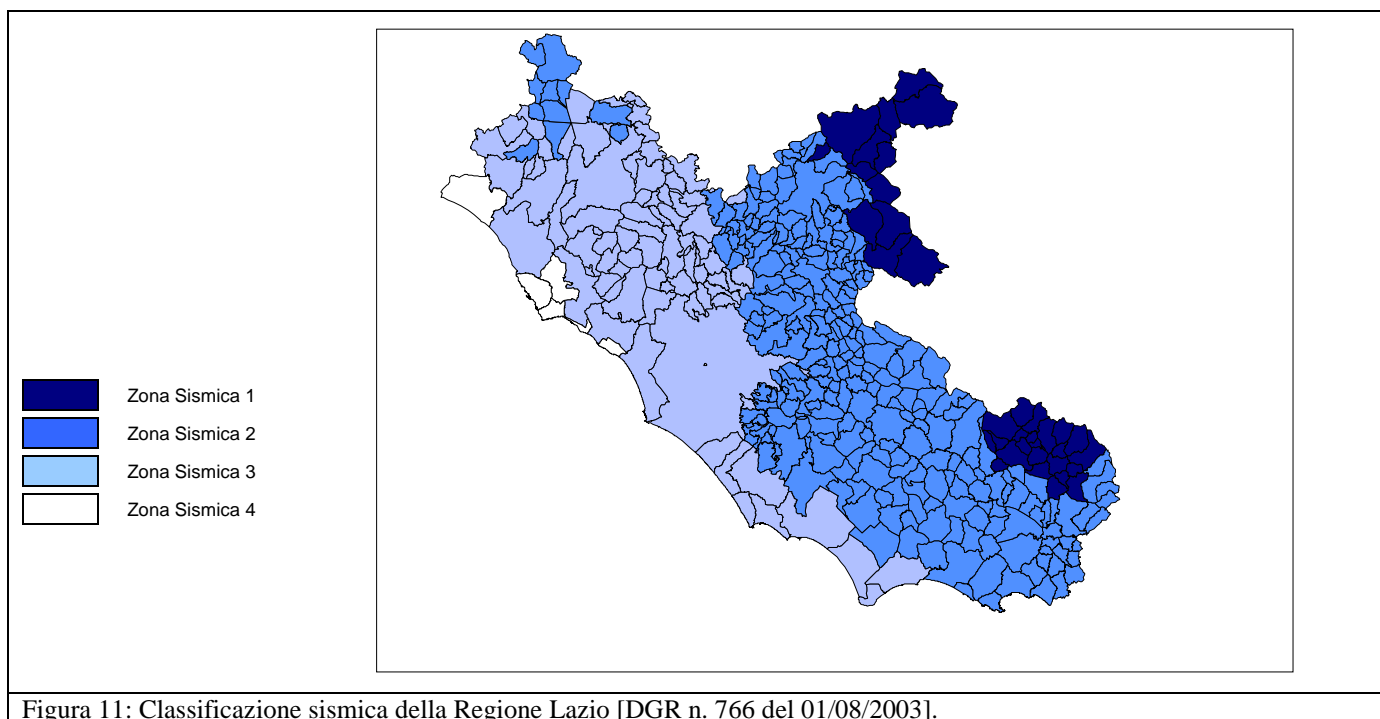


Figura 11: Classificazione sismica della Regione Lazio [DGR n. 766 del 01/08/2003].

Inoltre, per le UAS che non presentano alcun punto-*cluster* all'interno del proprio territorio, si è provveduto alla stima dei valori mancanti a partire dai valori di longitudine/latitudine del rispettivo centroide amministrativo, mediante funzioni polinomiali. Il valore del *fit* di queste funzioni è molto elevato (a conferma ulteriore della forte autocorrelazione spaziale) e giustifica il ricorso a questo

tipo di estrapolazione.

Considerando che uno degli obiettivi della presente attività di ricerca è la individuazione di aree del territorio della Regione Lazio con livelli di pericolosità sismica statisticamente omogenei che potessero indirizzare la revisione della classificazione sismica adottata dalla Regione Lazio nel 2003 [DGR n. 766 del 01/08/2003] (Figura 11), è sembrato interessante esaminare le corrispondenze tra le assegnazioni in termini di Zona Sismica (classificazione sismica del 2003) e di *cluster* (presente analisi statistica) relative ad ogni UAS.

In termini generali, la classificazione del 2003 è una rappresentazione in scala “ordinale”, che procede dalla classe a maggiore fino a quella a minore pericolosità sismica. Quella ottenuta con la presente analisi è invece una rappresentazione di tipo “nominale” nel senso che, ad esempio, il *cluster* n. 1 non indica necessariamente una maggiore pericolosità rispetto agli altri: ogni *cluster* è infatti caratterizzato da una peculiare combinazione dei diversi valori di ordinata spettrale.

Il risultato finale dell’analisi in *cluster* non si risolve quindi nel determinare “direttamente” un ordinamento delle UAS in termini di pericolosità sismica, ma nell’evidenziare aree con pericolosità sismica omogenea, attraverso un metodo squisitamente statistico-induttivo, lasciando “parlare” maggiormente i dati, a partire dalla evidenziazione di alcuni *pattern* nella distribuzione spaziale delle variabili.

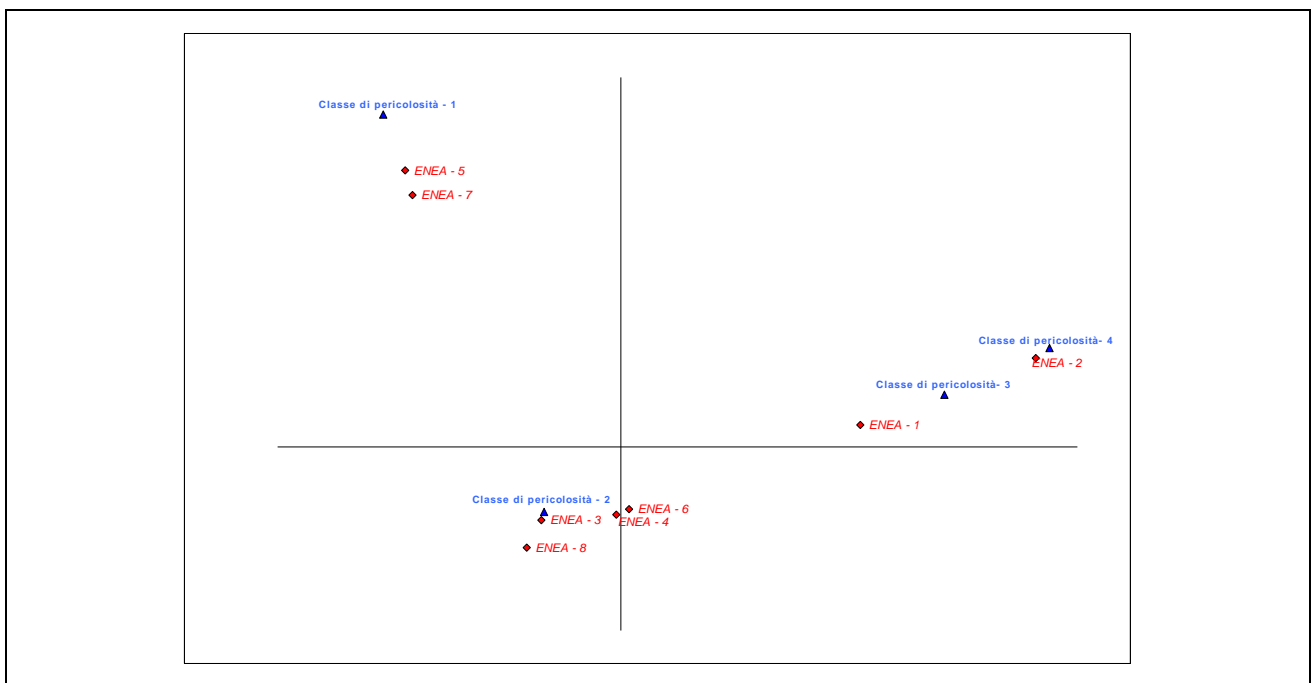


Figura 12: Rappresentazione grafica dell’analisi delle corrispondenze tra la Classificazione Sismica della Regione Lazio del 2003 e la classificazione in aree omogenee di pericolosità sismica risultanti dalla *cluster-analysis*. Il grafico è la rappresentazione in un piano cartesiano con le distanze tra le modalità delle due classificazioni ed è da interpretare nel senso che quanto maggiore è la distanza tra i punti relativi alle singole classificazioni, tanto minore è il numero di UAS per le quali vi è una corrispondenza tra le singole classi assegnate e viceversa.

In ogni caso, nonostante le differenze in termini sia metodologici, sia di significato delle singole classi, esistono tra le due classificazioni alcune analogie che possono essere evidenziate e sintetizzate con l'ausilio dell'analisi statistica delle corrispondenze. Questo tipo d'analisi mira a catturare le co-occorrenze più significative che sussistono tra le due classificazioni. Per "co-occorrenza significativa" si intende uno specifico incrocio tra le modalità delle due classificazioni, che, si ricorda, sono rispettivamente 4 per la classificazione del 2003 e 8 per la presente analisi in *cluster*. Ad una singola UAS può essere quindi assegnata una ed una sola coppia "classe di pericolosità-*cluster*" tra le 32 possibili.

Il risultato dell'analisi delle corrispondenze viene sintetizzata nel grafico riportato in Figura 12. Tale grafico è la rappresentazione in un piano cartesiano delle distanze tra le singole modalità delle due classificazioni, scaturite dalla lettura di una tabella di frequenze incrociate di dimensioni 4x8, ed è da interpretare nel senso che più i punti sono lontani, meno possiedono caratteristiche in comune e viceversa. Esempi di coppie che ricorrono con frequenza significativa, e che marcano nel complesso un contributo elevato alla corrispondenza, sono rispettivamente la "classe di pericolosità 2-*cluster* n. 3" e la "classe di pericolosità 1-*cluster* n. 5/*cluster* n. 7".

Inoltre, a posteriori, è possibile leggere l'asse delle ascisse di detto grafico nel senso di un *continuum* decrescente di pericolosità sismica. Così, ad esempio, il passaggio dal *cluster* n. 5 al *cluster* n. 2 equivale al massimo di divario in termini di pericolosità sismica empiricamente accertata.

Nel complesso si può affermare che la corrispondenza tra le due classificazioni è abbastanza buona, a denotare come, pur partendo da presupposti diversi, l'analisi in *cluster* non costituisca una radicale soluzione di continuità ma sia in grado di "dialogare" con la precedente, fornendo quindi uno strumento adeguato per l'operazione di revisione della classificazione sismica regionale del 2003. Tuttavia, se si effettua un confronto visivo tra le mappe relative alle due classificazioni (Figura 10 e Figura 11), la classificazione in *clusters* si distingue sia per l'articolazione in un numero maggiore di classi, da cui consegue un più elevato livello di dettaglio nella distribuzione della pericolosità sismica, sia per una maggiore considerazione dell'ipotesi di autocorrelazione spaziale, che si risolve nella caratterizzazione di gruppi più "compatti" sul territorio.

Procedendo con la descrizione dei risultati della presente analisi, in base all'esame delle forme spettrali dei *cluster* calcolate al 90° percentile (Figura 13a e b), valore questo scelto in omaggio ad una procedura maggiormente conservativa, è stato possibile operare una riduzione "a posteriori" del numero di Gruppi. Si è passati così dagli 8 originari a 6. Tale operazione di semplificazione è stata resa possibile grazie al fatto che i *cluster* 2 e 6 ed i *cluster* 5 e 7 (Figura 13a), presentano evidenti

analogie in termini di forma spettrale. In particolare, volendo rimanere conservativi, il *cluster* 6 è in grado di “assorbire” il *cluster* 2 ed il *cluster* 7 può fare altrettanto nei confronti del *cluster* 5, dato il loro maggior valore relativo al 90° percentile.

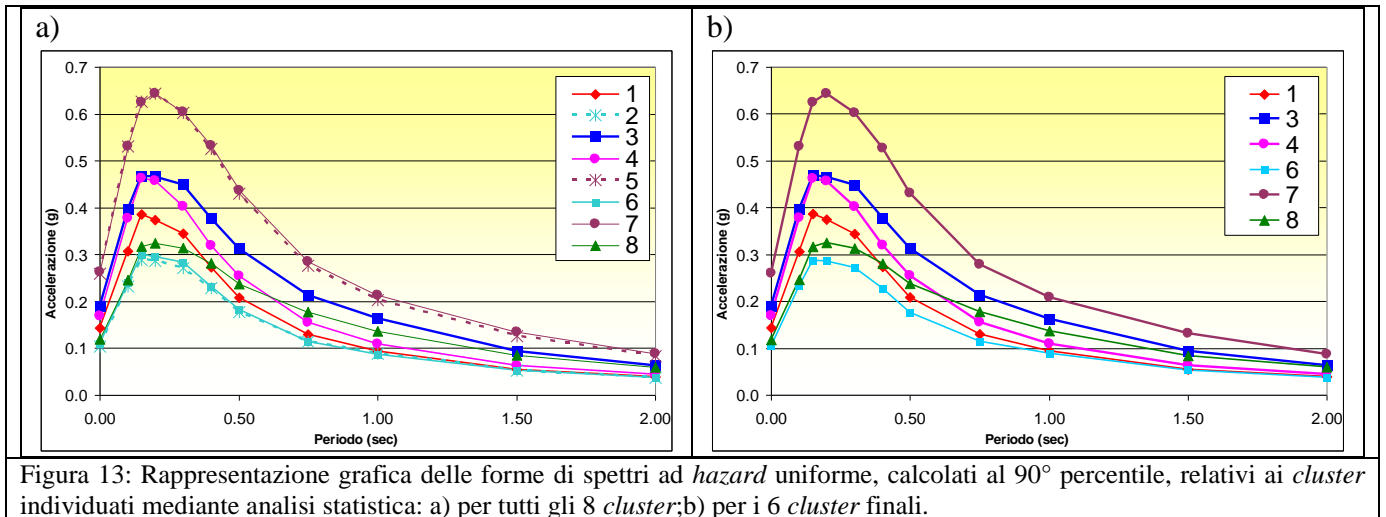


Figura 13: Rappresentazione grafica delle forme di spettri ad *hazard* uniforme, calcolati al 90° percentile, relativi ai *cluster* individuati mediante analisi statistica: a) per tutti gli 8 *cluster*; b) per i 6 *cluster* finali.

Come ultimo parametro rappresentativo del livello di pericolosità sismica locale, per ogni UAS è stato calcolato il valore dell’accelerazione di picco  $A_{g0rif}$  (valore dell’accelerazione dello spettro ad *hazard* uniforme per un periodo  $T=0$ ), calcolato al 90° percentile dei dati ricadenti all’interno dei singoli confini amministrativi. Questo parametro è stato elaborato sempre sulla base dei valori di accelerazione per una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (tempo di ritorno 475 anni) e distribuiti su di una griglia con circa 2 km di lato, forniti dal Progetto S1 dell’INGV. Come nel caso degli spettri ad *hazard* uniforme utilizzati per l’analisi statistica, i valori di accelerazione spettrale elaborati sono quelli corrispondenti al 50° percentile.

I valori delle  $A_{g0rif}$  sono riportati, per ogni UAS del Lazio, nell’ultima colonna della tabella in Appendice B.

#### 4. Elaborazione degli accelerogrammi di riferimento per le analisi di Microzonazione Sismica

Le recenti disposizioni contenute dalla normativa sismica nazionale e le metodologie di Microzonazione Sismica richiedono la definizione di parametri di *input* che rappresentino il livello di sollecitazione sismica attesa per l'area in esame. Il progettista dovrà generalmente impiegare un modello lineare/non lineare per la struttura e definire un insieme di accelerogrammi Rappresentativi della pericolosità sismica del sito.

Per quest'ultimo aspetto, sono attualmente disponibili tre opzioni di base.

La prima è quella di utilizzare accelerogrammi artificiali spettro-compatibili generati con programmi come SIMQKE [GASPARINI E VANMARCKE, 1979]. L'approccio impiegato in SIMQKE è quello di generare una densità spettrale di potenza dallo spettro di risposta mediato (*smoothed*), e quindi di ottenere, in base ad essa, segnali sinusoidali con fasi e ampiezze casuali. Per far ciò viene utilizzato un algoritmo iterativo per migliorare il confronto con lo spettro di *target*, calcolando il rapporto tra quest'ultimo e lo spettro simulato alle frequenze selezionate. La funzione di densità spettrale di potenza è poi modificata in base al quadrato di questo rapporto, generando un nuovo moto del suolo. L'attrattiva di un tale approccio è evidente perché è possibile ottenere serie temporali di accelerazioni che sono quasi completamente compatibili con lo spettro elastico di progetto, che in alcuni casi rappresenta l'unica informazione disponibile per il progettista per quanto riguarda la sollecitazione trasmessa dal terreno. Tuttavia, è ormai ampiamente riconosciuto che l'uso di tali registrazioni artificiali, in particolare per l'analisi non lineare, è problematico.

Il problema di fondo, con gli accelerogrammi artificiali spettro-compatibili, è che generalmente hanno un numero eccessivo di cicli *strong-motion* e, di conseguenza, possiedono un irragionevolmente elevato contenuto energetico. È necessario inoltre discutere la terminologia, dato che l'aggettivo "artificiale", talvolta con l'ulteriore qualificazione di "intelligente", è applicato anche alle metodologie che usano accelerogrammi naturali opportunamente modificati

In aggiunta ai problemi connessi con il modo in cui i record artificiali sono calcolati, non si possono nascondere le difficoltà che nascono dal tentare di generare un record il cui spettro segua quello elastico di progetto nell'intero intervallo di frequenza. Quest'ultimo se ottenuto dalla valutazione probabilistica della pericolosità sismica (PSHA) è rappresentativo del contributo di diverse sorgenti sismiche.

La seconda opzione è rappresentata dall'utilizzo di accelerogrammi simulati, generati cioè da modelli sismologici che tengono conto delle caratteristiche della sorgente sismica, degli effetti di

propagazione delle onde sismiche ed infine degli effetti di sito. Alcuni dei molti metodi di generazione di *ground-motion* [ad esempio: ZENG *et al.*, 1994; BERESNEV E ATKINSON, 1998; BOORE, 2003; SABETTA E PUGLIESE, 1996; MUCCIARELLI *et al.*, 2004], sono liberamente disponibili, ma la necessità di definire molti parametri sismologici, richiede l'intervento di un specialista del settore.

La terza ed ultima opzione prevede l'utilizzo di accelerogrammi naturali registrati durante i terremoti che, per definizione, sono esenti da problemi associati con gli accelerogrammi artificiali spettro-compatibili. L'incremento della disponibilità di registrazioni *strong-motion* e la relativa facilità con cui possono essere ottenute, contrariamente a quanto avviene per le registrazioni sintetiche o artificiali, rende l'uso delle registrazioni naturali un'opzione più che mai attraente per la definizione dell'*input* sismico.

Due importanti siti *web* per l'accesso ai dati *strong-motion* sono COSMOS (CONSORTIUM OF ORGANIZATIONS FOR STRONG-MOTION OBSERVATION SYSTEMS) E PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center). Il sito *web* COSMOS (<http://db.cosmos-eq.org>) contiene una banca dati di più di 4000 record da tutto il mondo, liberamente disponibili, il 40% dei quali provengono dell'Ovest degli Stati Uniti, il 20% del Giappone e il 18% circa della Nuova Zelanda [STEPP, 2000]. Un'altra fonte di dati è il CD-ROM "*European Strong-Motion Database*" [AMBRASEYS *et al.*, 2000] realizzato dall'ENEA in collaborazione con l'*Imperial College* di Londra, La Sogin-Servizio Sismico Nazionale ed il CEA di Parigi. Si può inoltre interrogare il sito *internet* europeo <http://www.isesd.cv.ic.ac.uk/ESD/frameset.htm> ed il sito ITACA della Protezione Civile (<http://itaca.mi.ingv.it>).

Bisogna infine sottolineare che la recente Normativa Sismica italiana non ammette l'uso di accelerogrammi artificiali nelle analisi dinamiche di opere e sistemi geotecnici. L'uso di accelerogrammi generati mediante simulazione del meccanismo di sorgente e della propagazione è ammesso a condizione che siano adeguatamente giustificate le ipotesi relative alle caratteristiche sismogenetiche della sorgente e del mezzo di propagazione. L'uso di accelerogrammi naturali è ammesso, a condizione che la loro scelta sia rappresentativa della sismicità del sito e sia adeguatamente giustificata in base alle caratteristiche sismogenetiche della sorgente, alle condizioni del sito di registrazione, alla magnitudo, alla distanza dalla sorgente e alla massima accelerazione orizzontale attesa al sito. Gli accelerogrammi naturali devono essere selezionati e scalati in modo da approssimare gli spettri di risposta nel campo di periodi d'interesse per il problema in esame [DM 14 gennaio 2008].

Nel presente programma di ricerca è stata utilizzata una procedura di selezione ed elaborazione di

*time-histories* naturali che prevede:

- a) la selezione di registrazioni accelerometriche relative a terremoti reali con caratteristiche sismologiche compatibili sia con i risultati dell'analisi storica, sia con gli spettri ad *hazard* uniforme calcolati a conclusione dell'analisi statistica;
- b) il confronto, per ogni Gruppo di UAS, tra le forme spettrali degli spettri elastici relativi alle registrazioni selezionate e gli spettri ad *hazard* uniforme di riferimento;
- c) il processamento delle registrazioni selezionate per ogni Gruppo di UAS, finalizzato ad adattarne lo spettro alle relative forme spettrali ad *hazard* uniforme;
- d) la scalatura finale delle *time-histories* identificate, in modo da renderle compatibili con i picchi di accelerazione calcolati per ogni UAS della Regione Lazio.

#### 4.1. Selezione delle *time-histories* da Banche Dati Accelerometriche

Sulla base degli indici assegnati al termine dell'analisi della pericolosità sismica storica locale, è stato possibile individuare una serie di gruppi di parametri (Tabella V) che descrivono le caratteristiche sismologiche degli eventi storicamente più gravosi per le UAS del Lazio. Gli indici mostrati in Tabella V seguono la codifica precedentemente descritta nel Paragrafo 2.3 a pag. 15.

<b>Tabella V</b>					
<b>Io VI</b>	<b>Io VII</b>	<b>Io VIII</b>	<b>Io IX</b>	<b>Io X</b>	<b>Io XI</b>
0650010	0755010	0850010	0960010	1065010	1170010
0650030	0755030	0850030	0960030	1065030	1170030
	0760010	0855010	0960060	1065060	1170060
	0760030	0855030		1065999	1170100
		0855060		1070010	1170999
				1070030	
				1070060	
				1070100	

Purtroppo il parametro Intensità, inteso sia come intensità epicentrale del singolo evento, sia come intensità locale risentita presso le stazioni di misura, non sempre è presente nelle banche dati attualmente disponibili, per cui il suo utilizzo come chiave di ricerca rischia di limitare fortemente il numero di registrazioni selezionate. Per tale motivo l'interrogazione delle banche dati accelerometriche è stata eseguita sulla base dei parametri magnitudo e distanza epicentrale.

Inoltre, considerando l'obiettivo di ottenere accelerogrammi di riferimento per gli studi di microzonazione sismica e di risposta sismica locale, la ricerca è stata ulteriormente ristretta alle *time-histories* registrate da stazioni accelerometriche in condizioni di *free-field* e fondate su siti

rigidi/rocciosi. In Appendice C viene riportata la tabella riassuntiva del numero di registrazioni corrispondenti alle varie classi di magnitudo e di distanza epicentrale, identificate mediante interrogazione delle banche dati accelerometriche. Tutte le registrazioni selezionate sono state sottoposte a giudizio esperto tendente a valutarne la qualità in termini di caratteristiche delle singole stazioni e della strumentazione che le ha registrate. L’elenco degli eventi e delle stazioni così individuate, suddiviso per classi di magnitudo, è consultabile sempre in Appendice C.

#### 4.2. Generazione degli accelerogrammi di riferimento

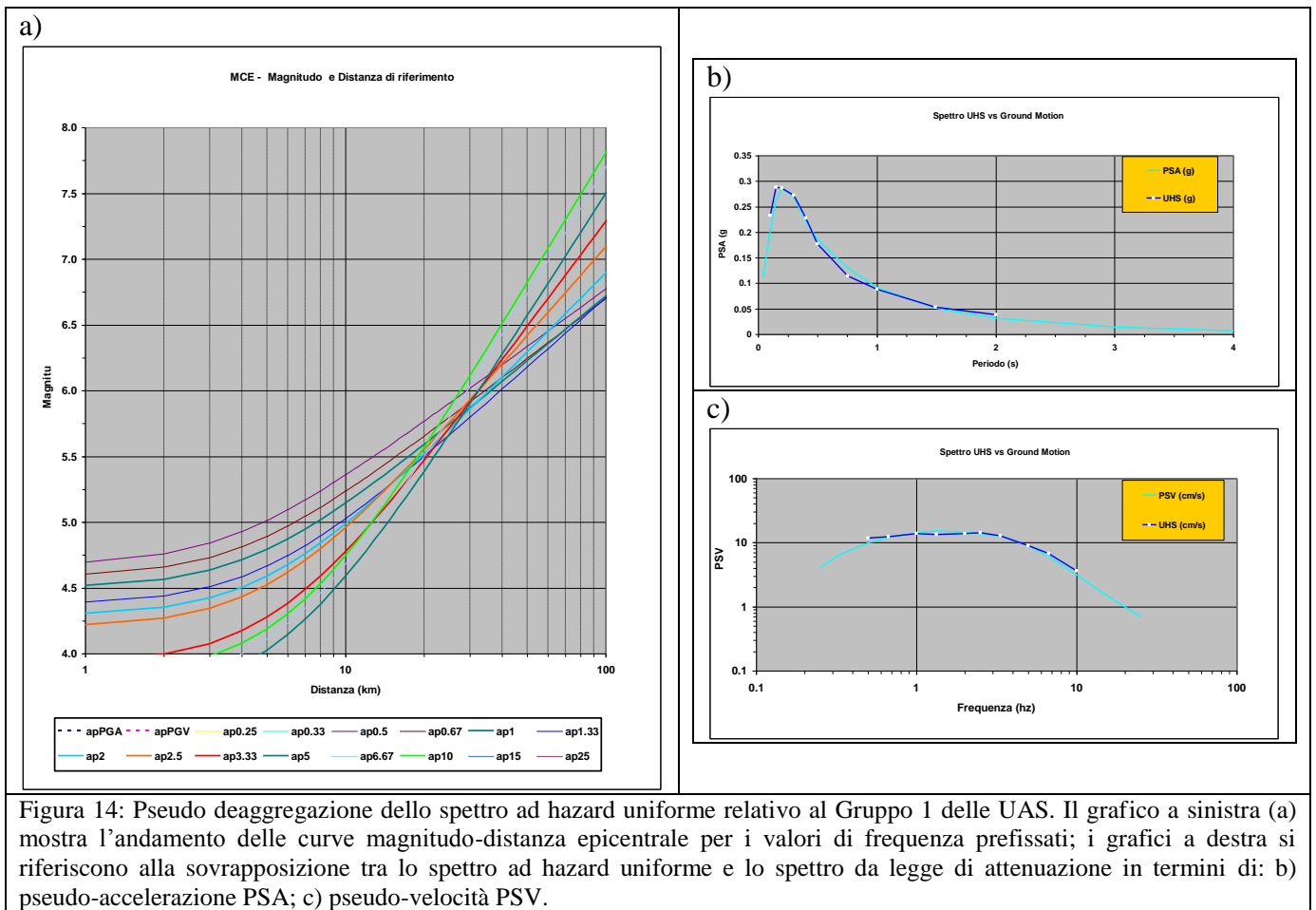
Per la selezione finale delle registrazioni accelerometriche sono state per prima cosa stabilite le classi di magnitudo caratteristiche per ogni Gruppo di UAS. A tal proposito, per stabilire il livello massimo di magnitudo compatibile con i livelli di pericolosità derivanti dall’analisi statistica, è stata eseguita una sorta di pseudo deaggregazione degli spettri ad *hazard* uniforme calcolati per ogni Gruppo di UAS, utilizzando la legge di attenuazione Sabetta-Pugliese [Pugliese A., comunicazione personale].

Più nel dettaglio, sono stati calcolati i valori di magnitudo, per distanze epicentrali crescenti ed una serie di frequenze prefissate, corrispondenti al valore della pseudo-velocità ottenuta dallo spettro ad *hazard* uniforme (Tabella VI).

**Tabella VI**

Mag	5.9																
Dist (km)	30																
s1	0																
s2	0																
fraz. stdv	1																
		Spettro calcolato															Periodo
Ground Motion	PGA	PGV	4.0	3.0	2.0	1.5	1.0	0.75	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1	0.07	0.04	Frequenza
(M, R, f_stdv)	PSV (cm/s)	6.7	4.1	6.4	9.8	12.1	14.4	15.3	14.5	13.8	12.6	8.9	6.1	3.1	1.6	0.7	PSV (cm/s)
	PSA (g)		0.007	0.014	0.031	0.052	0.092	0.130	0.186	0.222	0.269	0.286	0.261	0.201	0.151	0.111	PSA (g)
	PGA	PGV	0.25	0.33	0.5	0.67	1	1.33	2	2.5	3.33	5	6.67	10	15	25	Frequenza
	UHS (g)		0.104		0.038	0.053	0.088	0.114	0.177	0.228	0.272	0.286	0.288	0.233			
	UHS (cm/s)		0.0	0.0	11.9	12.4	13.7	13.4	13.8	14.2	12.8	8.9	6.7	3.6	0.0	0.0	UHS (cm/s)

Il grafico corrispondente (Figura 14a), consente di visualizzare la coppia di valori magnitudo-distanza epicentrale per la quale si ha un andamento delle curve: questa coppia di valori è rappresentativa dei parametri sismologici dell’evento che ha contribuito maggiormente alla definizione dello spettro ad *hazard* uniforme. Una conferma indiretta della bontà dell’approssimazione si ha nei grafici di Figura 14b-c, rispettivamente in termini di pseudo-accelerazione e di pseudo-velocità, nei quali è mostrata la sovrapposizione tra lo spettro UHS e quello corrispondente ai valori magnitudo-distanza epicentrale prescelti.



E' stato possibile così stabilire gli intervalli di magnitudo corrispondenti agli eventi più significativi per ogni Gruppo di UAS, incrociando i risultati dell'analisi storica con quelli della pseudo deaggregazione. In particolare è stato stabilito che il livello minimo di magnitudo è quello proveniente all'analisi storica, mentre il livello massimo di magnitudo è quello fornito dalla pseudo deaggregazione.

Tabella VII				
	Intervalli di M da analisi storica	Pseudo deaggregazione		Intervalli di M per selezione accelerogrammi
		M	R	
Gruppo 1	da $\geq 5.0$ a 6.5-7.0	5.9	30	5.0-5.5 / 5.5-6.0
Gruppo 2	da 5.0-5.5 a 6.0-6.5	5.5	16	$\geq 5.0$ / 5.0-5.5
Gruppo 3	da $\geq 5.0$ a 6.5-7.0	5.5	13	$\geq 5.0$ / 5.0-5.5
Gruppo 4	da $\geq 5.0$ a 6.5-7.0	6.0	20	$\geq 5.0$ / 5.0-5.5 / 5.5-6.0
Gruppo 5	da 6.0-6.5 a 6.5-7.0	6.4	40	6.0-6.5
Gruppo 6	da 5.5-6.0 a 6.5-7.0	6.1	15	5.5-6.0 / 6.0-6.5

In Tabella VII vengono riassunte queste informazioni, con particolare attenzione alla colonna di

destra nella quale sono riportate, per tutti i Gruppi di UAS, le classi di magnitudo utilizzate per la selezione delle *time-histories* provenienti dalle banche dati accelerometriche.

La selezione è stata eseguita adottando il criterio di massima somiglianza tra gli spettri UHS di ogni Gruppo di UAS e gli spettri di risposta elastica delle registrazioni accelerometriche appartenenti alle classi di magnitudo precedentemente descritte.

La valutazione della somiglianza tra spettri di riferimento e spettri di risposta è già stata adottata per la selezione di *time histories* da utilizzare sia nelle simulazioni numeriche in ottica di microzonazione sismica, sia per il calcolo della risposta sismica locale.

In particolare la Regione Emilia Romagna negli indirizzi per gli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica [Regione Emilia Romagna, 2007], dopo aver definito la forma dello spettro di risposta normalizzato rappresentativo del moto sismico atteso per un periodo di ritorno di 475 anni (con smorzamento pari al 5%) ed averlo normalizzato al valore del picco di accelerazione, procede alla valutazione della similarità delle forme degli spettri di risposta delle registrazioni naturali mediante la procedura di Bommer e Acevedo [2004], definita dalla seguente formula

$$D_{\text{rms}} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{a_{\text{target}}(T_i)}{a_{\text{target, max}}} - \frac{a_s(T_i)}{a_{s, \text{max}}} \right)^2} \quad \text{dove:}$$

$a_{\text{target}}(T_i)/a_{\text{target, max}}$  e  $a_s(T_i)/a_{s, \text{max}}$  sono le ordinate spettrali al periodo  $T_i$  normalizzate, rispettivamente, del moto di riferimento (target) e di quello selezionato (s),  $N$  è il numero di periodi considerati.

Parallelamente, la Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica (ReLUIS) ha progettato un codice di calcolo denominato Rexel, che consente la ricerca di combinazioni di accelerogrammi naturali compatibili con gli spettri delle Norme Tecniche per le Costruzioni [DM 14 gennaio 2008], dell'EUROCODICE 8 oppure spettri definiti arbitrariamente dall'utente [Iervolino *et al.*, 2010]. La selezione delle registrazioni accelerometriche avviene mediante il calcolo di un indice di somiglianza con gli spettri di *target* definito dalla formula:

$$\delta_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left( \frac{S_{a_j}(T_i) - S_{a_{\text{target}}}(T_i)}{S_{a_{\text{target}}}(T_i)} \right)^2} \quad \text{dove}$$

$S_{a_j}(T_i)$  è la ordinata in pseudo-accelerazione dello spettro reale  $j$  corrispondente al periodo  $T_i$  mentre  $S_{a_{\text{target}}}(T_i)$  è il valore dell'ordinata spettrale dello spettro di riferimento allo stesso periodo;  $N$  è il numero totale di ordinate spettrali all'interno dell'intervallo di periodi di interesse.

Nel presente lavoro è stata applicata, oltre alle precedenti, la tecnica statistica dell'Indice Quadratico Relativo, definita dalla formula:

$$IQR = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [S_{a_{target}}(T_i) - S_{a_j}(T_i)]^2}{N}}}{\frac{\sum_{i=1}^N [S_{a_j}(T_i)]^2}{N}}$$

dove i parametri hanno lo stesso significato della formula precedente. In tutte e tre le metodologie, quanto minore è il valore dell'indice calcolato, tanto migliore è la somiglianza tra gli spettri. Per i risultati ottenuti durante l'elaborazione, l'Indice Quadratico Relativo è sembrato il parametro che meglio descrivesse le somiglianze tra forme spettrali ed è stato quindi utilizzato per ordinare e selezionare le *time histories* caratteristiche del moto del suolo atteso nei diversi Gruppi di UAS. In Tabella VIII sono riportati i risultati ottenuti per il Gruppo 1 e le registrazioni selezionate sulla base del valore dell'Indice Quadratico Relativo. Un esempio degli spettri elastici di risposta delle registrazioni naturali, confrontati con lo spettro ad *hazard* uniforme assegnato al Gruppo 1, è mostrato in Figura 15a.

<b>Tabella VIII</b>					
<b>Indici di somiglianza degli spettri</b>					
Gruppo	Cl. Mag.	FileTH	D <sub>rms</sub>	δ	<b>IQR</b>
1	5055	000428xa	0.0674	0.3216	<b>0.2912</b>
1	5055	000365xa	0.0473	0.3428	<b>0.3457</b>
1	5055	000982xa	0.0585	0.4185	<b>0.3531</b>
1	5560	000764ya	0.0451	0.4022	<b>0.4325</b>
1	5055	000763ya	0.0710	0.5603	<b>0.4503</b>

Le registrazioni accelerometriche così selezionate per tutti i Gruppi di UAS, sono state elaborate al fine renderle compatibili con i relativi spettri ad *hazard* uniforme. La tecnica utilizzata è una versione modificata della metodologia proposta da Silva [SILVA, 1987] ed implementata da NAEIM E LEW [1995]. Il vantaggio di questa tecnica consiste nell'incorporare in modo naturale la non stazionarietà, la casualità e la variazione nel tempo del contenuto in frequenza degli accelerogrammi registrati. Questa caratteristica delle *time-histories* si ottiene conservando la fase delle registrazioni e modificandone l'ampiezza, in quanto la fase determina come l'energia si distribuisce nel tempo. Per quanto riguarda il contenuto globale in frequenza, esso viene definito a partire dallo spettro di

risposta con tecniche iterative.

La metodologia sviluppata per la Regione Lazio prende in considerazione il fatto che gli spettri ad *hazard* uniforme caratterizzanti i 6 Gruppi di UAS sono generati con una distribuzione dell'energia in frequenza che è, per natura dell'analisi statistica alla base della loro elaborazione, una combinazione fra differenti tipologie di eventi, diversi sia per magnitudo, sia per distanza epicentrale.

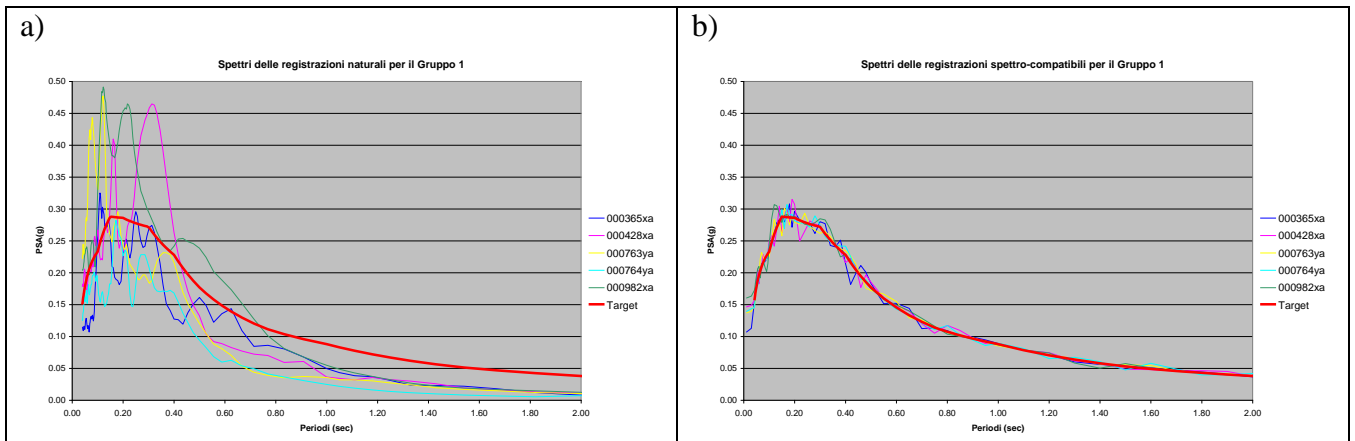


Figura 15: Confronto, per il Gruppo 1 di UAS, tra lo spettro UHS e gli spettri elastici di risposta: a) delle registrazioni naturali; b) delle registrazioni spettro-compatibili.

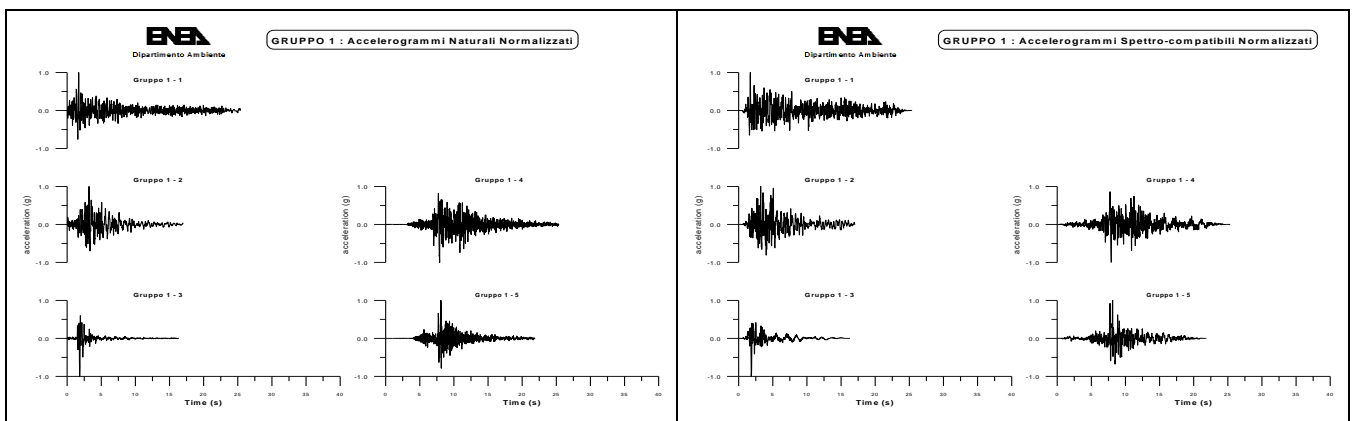


Figura 16: Tracce delle registrazioni normalizzate, naturali e spettro-compatibili, di riferimento per le UAS del Gruppo 1.

Pertanto gli spettri delle *time-histories* selezionate saranno adattati allo stesso spettro UHS, indipendentemente dalla magnitudo e distanza epicentrale dell'evento che le ha generate; l'algoritmo aggiungerà contenuto in frequenza o lo attenuerà in funzione del contenuto spettrale dell'accelerogramma naturale. Un esempio del risultato ottenuto viene mostrato in Figura 15b, ove sono sovrapposti gli spettri elastici spettro-compatibili ed il relativo spettro ad *hazard* uniforme per il Gruppo 1 di UAS. In Figura 16 sono invece riportate le tracce delle registrazioni normalizzate relative al Gruppo 1, sia naturali (a sinistra), sia spettro-compatibili (a destra).

L'assegnazione finale degli accelerogrammi di riferimento a tutte le UAS del Lazio è avvenuta moltiplicando le *time-histories* normalizzate (naturali e spettro-compatibili) relative al Gruppo cui la singola UAS appartiene, per il relativo valore dell' $Ag_{0rif}$  (Appendice B).

I file numerici in formato testo degli accelerogrammi di riferimento per tutte le UAS, vengono consegnati come allegato alla presente relazione finale. Per ogni UAS è stato realizzato un archivio compresso (formato .zip) contenente le 5 registrazioni di riferimento, naturali e spettro-compatibili, scalate al corrispondente valore di  $Ag_{0rif}$ . I nomi dei singoli archivi sono stati assegnati adottando la seguente codifica:

- Per le UAS dei capoluoghi è stato utilizzato il codice ISTAT del relativo Comune seguito dal codice “\_000” (ad esempio, per Colfelice: 1260027\_000);
- Per le UAS delle isole amministrative, è stato aggiunto al codice ISTAT del Comune, il codice “\_001” (ad esempio, per Colfelice - Isola amministrativa: 1260027\_001);
- Per i Municipi del Comune di Roma sono stati aggiunti al codice ISTAT i codici “\_010”, “\_020”, e così via (es. Roma I: 1258091\_010; Roma XX: 1258091\_200). L'unica eccezione è data dall'Isola Amministrativa del XX Municipio, alla quale è stato assegnato il nome 1258091\_201.

I nomi delle singole tracce contenute in ogni archivio sono contrassegnati da lettere (A, B, C, D, E), aggiunte al nome del relativo archivio. Ad esempio l'archivio relativo al Comune di Accumoli (1257001\_000), contiene i files di testo (vale a dire le tracce accelerometriche scalate ad  $Ag_{0rif}$ ): 1257001\_000\_A.txt; 1257001\_000\_B.txt; 1257001\_000\_C.txt; 1257001\_000\_D.txt; 1257001\_000\_E.txt.

In ogni file di testo, la prima riga riporta il nome della UAS, il numero dei punti ed il passo dell'incremento in tempo delle singole accelerazioni; la seconda riga le intestazioni delle colonne; dalla terza riga in poi i valori organizzati in 5 colonne:

Colonna 1: tempo in secondi;

Colonna 2: registrazione NATurale [NAT(g)] espressa in frazioni dell'accelerazione di gravità g (corrispondente a  $981 \text{ cm/sec}^2$ );

Colonna 3: registrazione SPettro-Compatibile [SPC(g)] espressa in g;

Colonna 4: registrazione NATurale [NAT(cm/s\*s)] espressa in  $\text{cm/sec}^2$ ;

Colonna 5: registrazione SPettro-Compatibile [SPC(cm/s\*s)] espressa in  $\text{cm/sec}^2$ .

Le informazioni nella prima riga sono leggibili nel formato Fortran (A35,1X,I4,1X,F5.3); le intestazioni delle colonne nella seconda riga sono separate da spazi e quindi leggibili in formato libero o nel formato Fortran (A7,3X,A6,8X,A6,8X,A11,3X,A11); i dati dalla terza riga in poi sono separati da spazi e quindi leggibili in formato libero o nel formato Fortran (F7.3,4(2X,E12.5)). L'incolonnamento e la separazione dei dati accelerometrici mediante spazi consente la lettura/apertura automatica dei file con programmi di tabulazione elettronica. A titolo di esempio,

sono di seguito riportate le prime righe di un file di testo relativo al Comune di Accumoli:

File: 1257001\_000\_A.txt

```

Accumoli                                2310 0.010
TIME (s)    NAT (g)      SPC (g)      NAT (cm/s*s)    SPC (cm/s*s)
0.000    -0.68476E-05    0.00000E+00    -0.67175E-02    0.00000E+00
0.010    -0.74598E-04    0.19917E-06    -0.73181E-01    0.19539E-03
0.020     0.24646E-04    0.74095E-06     0.24178E-01    0.72687E-03
0.030    -0.56496E-04    0.13562E-05    -0.55423E-01    0.13304E-02
0.040     0.14390E-04    0.31233E-05     0.14116E-01    0.30639E-02
0.050     0.10812E-03    0.75137E-05     0.10607E+00    0.73710E-02
.....

```

## 5. Conclusioni

E' stata eseguita l'analisi della pericolosità sismica del territorio della Regione Lazio finalizzata all'individuazione di aree a comportamento sismico omogeneo ed alla definizione di accelerogrammi rappresentativi dei livelli attesi di moto del suolo in condizioni pianeggianti e su roccia (*Suolo di Categoria A – NTC08*). Le unità territoriali adottate, denominate Unità Amministrative Sismiche (UAS), sono prevalentemente identificate dai limiti amministrativi comunali ad eccezione di Comuni con territorio particolarmente esteso (ad esempio il Comune di Roma è stato suddiviso nei suoi 19 Municipi) o per la presenza di Isole Amministrative. La metodologia adottata ha affiancato: un'analisi dei terremoti storici più significativi per la definizione delle massime intensità sismiche risentite nelle UAS e dei parametri sismologici dei terremoti ad esse correlati; l'analisi statistica dei parametri di pericolosità sismica rappresentati dagli spettri ad *hazard* uniforme, calcolati dal Progetto S1 dell'INGV per una probabilità di eccedenza inferiore al 10% in 50 anni pari ad un tempo di ritorno di 475 anni, per la individuazione di Gruppi di UAS a pericolosità omogenea ed il calcolo degli spettri ad *hazard* uniforme caratteristici per ogni Gruppo.

La determinazione della pericolosità sismica in termini d'intensità macrosismica, è stata condotta adottando un approccio "di sito" basato sui dati d'intensità storica locale disponibili, integrati con le informazioni fornite dalla distribuzione areale delle intensità ottenute mediante la realizzazione di carte delle isosisme. Tale approccio ha consentito non solo la valutazione delle massime intensità sismiche locali, ma anche l'identificazione dei valori d'intensità epicentrale, magnitudo e distanza epicentrale relativi agli eventi più gravosi per ogni UAS. Queste informazioni sono state utilizzate per definire le chiavi di ricerca delle registrazioni accelerometriche reali contenute in Banche Dati accelerometriche nazionali e mondiali.

I valori di massima intensità locale calcolati con il metodo storico sono stati confrontati con quelli ottenuti applicando una procedura messa a punto nell'ambito del Progetto S1 dell'INGV (Figura 3) che consente una stima probabilistica dei valori d'intensità locale, per una probabilità di eccedenza nell'intervallo cronologico stabiliti dall'operatore. Dal confronto emerge che le massime intensità sismiche più elevate, calcolate per il settore appenninico del reatino e del Lazio meridionale, concordano con i livelli di intensità calcolati per una probabilità di eccedenza del 2% in 50 anni (tempo di ritorno di 2475 anni), mentre per la parte restante del territorio regionale i risultati sono in linea con quelli calcolati per una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (tempo di ritorno di 475 anni).

Per quello che riguarda il metodo statistico, è stata applicata una tecnica di "cluster-analysis" non

parametrica (*Kernel Density*) alle forme degli spettri ad *hazard* uniforme ricadenti nel territorio regionale con una griglia di circa 5 km di lato. I risultati hanno consentito di identificare 6 Gruppi di UAS con pericolosità sismica omogenea (Figura 10). Per ogni Gruppo sono stati inoltre calcolati gli spettri ad *hazard* uniforme caratteristici, calcolati al 90° percentile (Figura 13b).

Considerando che le attività relative al presente programma di ricerca sono avvenute in concomitanza con la pubblicazione della nuova Normativa Sismica nazionale [DM 14 gennaio 2008] che fornisce di spettri elastici di sito, per i quali vengono assegnati  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_c^*$ , differenziati nel territorio con una maglia di circa 5 km di lato (la stessa usata per gli spettri ad *hazard* uniforme dell'INGV), è stata tentata una loro elaborazione con la stessa tecnica statistica applicata agli spettri ad *hazard* uniforme (Figura 9). Il confronto tra le due analisi evidenzia una leggera differenza nella suddivisione in gruppi delle zone di confine con Toscana e Campania, mentre nelle zone centrali ed in quelle confinanti con l'Abruzzo i risultati sembrano coincidere, confermando indirettamente la validità dei risultati di classificazione della pericolosità sismica locale.

Un ulteriore risultato dell'analisi statistica è stato il calcolo del valore dell'accelerazione orizzontale di picco ( $A_{g0rif}$ ) caratteristico per ogni UAS, corrispondente al 90° percentile dei dati distribuiti su di una maglia di circa 2 km di lato con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni forniti sempre dal Progetto S1 dell'INGV, compresi all'interno dei relativi confini amministrativi.

L'ultima parte delle attività ha consentito definizione delle *time-histories* di riferimento per ogni UAS del Lazio, da utilizzare come *input* sismico nelle analisi di microzonazione sismica e di risposta sismica locale. A questo proposito è stata adottata una procedura che prevede: la selezione di registrazioni dalle Banche Dati accelerometriche relative a terremoti aventi caratteristiche sismologiche compatibili con i risultati ottenuti con l'analisi storica e con una pseudo deaggregazione degli spettri ad *hazard* uniforme caratteristici per ogni Gruppo di UAS; la selezione, secondo un criterio di somiglianza tra forme spettrali, delle registrazioni con spettro elastico di risposta più simile agli spettri ad *hazard* uniforme di riferimento; il processamento delle registrazioni selezionate in modo da ottenere *time-histories* spettro-compatibili e la normalizzazione delle registrazioni naturali e spettro-compatibili al picco di accelerazione; la scalatura finale delle registrazioni (naturali e spettro-compatibili) mediante i valori dei picchi di accelerazione calcolati per ogni UAS del Lazio, in modo da adattare gli accelerogrammi di riferimento ai livelli di pericolosità sismica locale.

Concludendo, occorre per prima cosa tener presente che i risultati del presente lavoro, pur partendo dai valori degli spettri ad *hazard* uniforme con periodo di ritorno a 475 anni, sono da considerarsi conservativi per due ordini di motivi: in primo luogo perché per la valutazione degli indici con il

metodo storico sono stati presi in considerazione tutti gli eventi che risultano aver interessato le UAS del Lazio negli ultimi 2000 anni e quindi le registrazioni accelerometriche selezionate sono le più gravose e non quelle relative a un periodo di ritorno di 475 anni; in secondo luogo perché gli spettri rappresentativi dei singoli gruppi non corrispondono ai valori medi ma rappresentano il 90° percentile.

Per quello che riguarda le *time-histories* di riferimento calcolate per ogni UAS, occorre ricordare che la Normativa Sismica nazionale consente, tra l'altro, l'uso di accelerogrammi naturali a condizione che la loro scelta sia rappresentativa della sismicità del sito e sia adeguatamente giustificata in base alle caratteristiche sismogenetiche della sorgente, alle condizioni del sito di registrazione, alla magnitudo, alla distanza dalla sorgente e alla massima accelerazione orizzontale attesa al sito.

In questo lavoro si è cercato di individuare un numero il più possibile limitato di Gruppi di UAS, tale da definire con sufficiente precisione i parametri omogenei di pericolosità sismica e di procedere alla selezione di registrazioni accelerometriche compatibili con i parametri sismologici degli eventi più significativi. Non si può comunque dimenticare che, per definizione, gli spettri ad *hazard* uniforme sono caratterizzati da una distribuzione dell'energia in frequenza che, per la natura dell'analisi statistica utilizzata nella loro definizione, rappresenta il contributo di differenti tipologie di eventi, diversi sia per magnitudo, sia per distanza epicentrale. Per tale motivo la selezione finale delle registrazioni accelerometriche non potrà che riferirsi alla migliore approssimazione con i parametri sismologici e gli spettri ad *hazard* uniforme caratteristici, calcolati per ogni Gruppo di UAS. In ogni caso, la rappresentatività delle registrazioni di riferimento elaborate rispetto ai livelli di pericolosità sismica locale, è stata ottenuta mediante la scalatura delle *time-histories* normalizzate assegnate ad ogni Gruppo di UAS operata utilizzando il valore dell'accelerazione di picco di riferimento calcolata per ogni singola UAS.

Si sottolinea infine che per quello che riguarda l'uso delle *time-histories* di riferimento quale *input* sismico nelle analisi di microzonazione sismica e di risposta sismica locale, coerentemente con quanto prescritto dalla Normativa Sismica nazionale, è consigliabile adottare le 5 registrazioni naturali mediando i risultati finali. L'uso delle registrazioni spettro-compatibili è da considerarsi facoltativo, e comunque subordinato a quello delle registrazioni naturali, e può fornire indicazioni sulla stabilità dei risultati ottenuti con le diverse modellazioni numeriche.

## 6. Bibliografia

- Albarello D., Azzaro R., Barbano M. S., D'Amico S., D'Amico V., Rotondi R., Tuvè T. e Zonno G. (2007a): "Valutazioni di pericolosità sismica in termini di intensità macrosismica utilizzando metodi di sito". *Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D9*, <http://esse1.mi.ingv.it/d9.html>.
- Albarello D., D'Amico V., Gasperini P., Pettenati F., Rotondi R. e Zonno G. (2007b): "Nuova formulazione delle procedure per la stima dell'intensità macrosismica da dati epicentrali o da risentimenti in zone vicine". *Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D10*, <http://esse1.mi.ingv.it/d10.html>.
- Ambraseys N., Smit P., Berardi R., Rinaldis D., Cotton F. e Berge-Thierry C. (2000): "Dissemination of European Strong-Motion Data. CD-ROM collection". *European Council, Environment and Climate Research Programme*.
- Anselin, L. (1995): "Local indicators of spatial association – LISA". *Geographical Analysis*, 27, 93-115.
- Arias A. (1970): "A measure of earthquake intensity", In *Hansen R. (ed), Seismic Design of Nuclear PowerPlant*, MIT Press, Cambridge.
- Beresnev I.A. e Atkinson, G. M. (1998): "FINSIM — A FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite faults". *Seismological Research Letters* 69(1), 27–32.
- Blake A. (1941): "On the estimation of focal depth from macroseismic data". *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 31 (3), 225-232.
- Bommer, J.J. e Acevedo, A.B. (2004): "The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis". *Journal of Earthquake Engineering*, 8, 43 – 92.
- Boore, D. M. (2003): "Simulation of ground motion using the stochastic method". *Pure and Applied Geophysics*, 160, 635–676.
- Consortium of Organizations for Strong-Motion Observation Systems (COSMOS). <http://www.cosmos-eq.org/>.
- D'Amico V. e Albarello D. (2007): "Codice per il calcolo della pericolosità sismica da dati di sito: SASHA (Site Approach to Seismic Hazard Assessment)". *Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D12*, <http://esse1.mi.ingv.it/d12.html>.
- DGR n. 766 del 01/08/2003. "Riclassificazione sismica del territorio della Regione Lazio in applicazione dell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n° 3274 del 20 marzo 2003. Prime disposizioni".
- DM 14 gennaio 2008. "Nuove norme tecniche per le costruzioni, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008 - Suppl. Ordinario n. 30". Disponibile nel sito del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici: <http://www.cslp.it/>.
- Fotheringham A. S., Brundson C., Charlton M. (2000): "Quantitative Geography". SAGE Publications, London.
- Gasparini, D. A. e Vanmarcke E. H. (1979): "Simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra". *Evaluation of Seismic Safety of Buildings Report No. 2*, Department of Civil Engineering, MIT, Cambridge, Massachusetts, 99 pp.
- Gómez Capera A.A. (2006): "Seismic Hazard Map for the Italian territory using macroseismic data". *Earth. Sci. Res. J.*, 10 (2). 67-90.
- Gómez Capera A.A., Meletti C., Rebez A. e Stucchi M. (2007): "Mappa di pericolosità sismica in

- termini di intensità macrosismica ottenuta utilizzando lo stesso impianto metodologico di MPS04". *Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D7*, <http://esse1.mi.ingv.it/d7.html>.
- Gruppo di lavoro CPTI (2004): "Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04)", INGV, Bologna. <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI04/>.
- Gruppo di Lavoro (2004): "Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003. Rapporto Conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile", INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 appendici.
- Iervolino I, Galasso C. e Cosenza E. (2010): "REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis". *Bull. Earthquake. Eng.*, **8**, 339–362.
- Meletti C. e Valensise G. (2004): "Zonazione sismogenetica ZS9 – App.2 al Rapporto Conclusivo". In: Gruppo di Lavoro, 2004.
- Montaldo V. e Meletti C. (2007): "Valutazione del valore della ordinata spettrale a 1sec e ad altri periodi di interesse ingegneristico". *Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D3*, <http://esse1.mi.ingv.it/d3.html>.
- Moran, P.A.P. (1950): "Notes on Continuous Stochastic Phenomena". *Biometrika*, 37, (1/2), 17-23.
- Pasolini C., Gasperini P., Albarello D., Lolli B. e D'Amico V. (2008a): "The attenuation of seismic intensity in Italy part I: theoretical and empirical backgrounds". *Bull. Seism. Soc. Am.*, **98**, 682-691.
- Pasolini C., Albarello D., Gasperini P., D'Amico V. e Lolli B. (2008b): "The attenuation of seismic intensity in Italy part II: modeling and validation". *Bull. Seism. Soc. Am.*, **98**, 692-708.
- Progetto S1 INGV (2007): "Proseguimento della assistenza al DPC per il completamento e la gestione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 e progettazione di ulteriori sviluppi". *Convenzione INGV-DPC 2004 – 2006*, <http://esse1.mi.ingv.it/index.html>.
- Regione Emilia Romagna (2007): "Gli indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica". *Sito web regionale all'indirizzo: <<http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/sismica/Microzonazione/Indirizzi.htm>>*.
- Sabetta F. e Pugliese A. (1996): "Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions". *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **86** (2), 337-352.
- Stepp, C. J. (2000): "Coordination of strong-motion programs and strong-motion data dissemination". *Proceedings of the Twelfth World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, Paper No. 2600.
- Stucchi M., Camassi R., Rovida A., Locati M., Ercolani E., Meletti C., Migliavacca P., Bernardini F. e Azzaro R. (2007): "DBMI04, il database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI04". <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI04/> Quaderni di Geofisica, 49, pp. 38.
- Zeng Y., Anderson J. G. e Yu G. (1994): "A composite source model for computing realistic synthetic strong ground motions". *Geophysical Research Letters*, **21**(8), 725–728.