

UNIVERSITÀ DI PISA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E INDUSTRIALE
Geotecnica

REGIONE TOSCANA
DIR. POLITICHE AMBIENTE ED ENERGIA SETTORE
SISMICA
(ATTENZIONE DR. M. BAGLIONE)

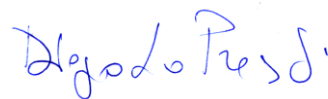
ACCORDO STIPULATO CON DESTeC - UNIPI
ANALISI FINALIZZATE ALLA VERIFICA A LIQUEFAZIONE DEI
TERRENI NELL'AREA DELLA PROVINCIA DI PISA E LUCCA.

RELAZIONE CONCLUSIVA

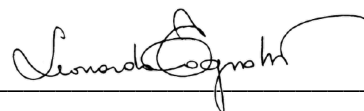
NOVEMBRE 2018

*ANALISI FINALIZZATE ALLA VERIFICA A LIQUEFAZIONE DEI
TERRENI NELL'AREA DELLA PROVINCIA DI PISA E LUCCA.*

Prof. Diego C. F. Lo Presti (Responsabile Scientifico)



Prof. Leonardo Tognotti (Direttore del Dipartimento)



Pisa, 05 Novembre 2018

1. PREMESSA

Nel mese di novembre 2017 la Regione Toscana (Direzione Ambiente ed Energia - Settore Sismica) ha incaricato l'Università di Pisa, che ha accettato, di realizzare degli studi riguardanti la verifica a liquefazione dei terreni (granulari e saturi) nell'area delle Province di Pisa, Lucca, Massa-Carrara e Livorno (Fig.1). Il responsabile scientifico dell'accordo è il prof. D. Lo Presti. L'accordo è stato stipulato tra la Regione Toscana ed il DESTeC. Successivamente alla stipula il prof. Lo Presti si è trasferito al DIC I (Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale).

La presente relazione illustra il lavoro svolto ed i possibili futuri sviluppi. Il lavoro ha coinvolto il dr. ing. S. Stacul (assegnista), l'ing. A. Magalotti (Laureanda - LM), l'ing. A. Carmignani (Laurea Triennale) e l'ing. S. Cheli (borsista reclutata ad-hoc con fondi del DIC I).

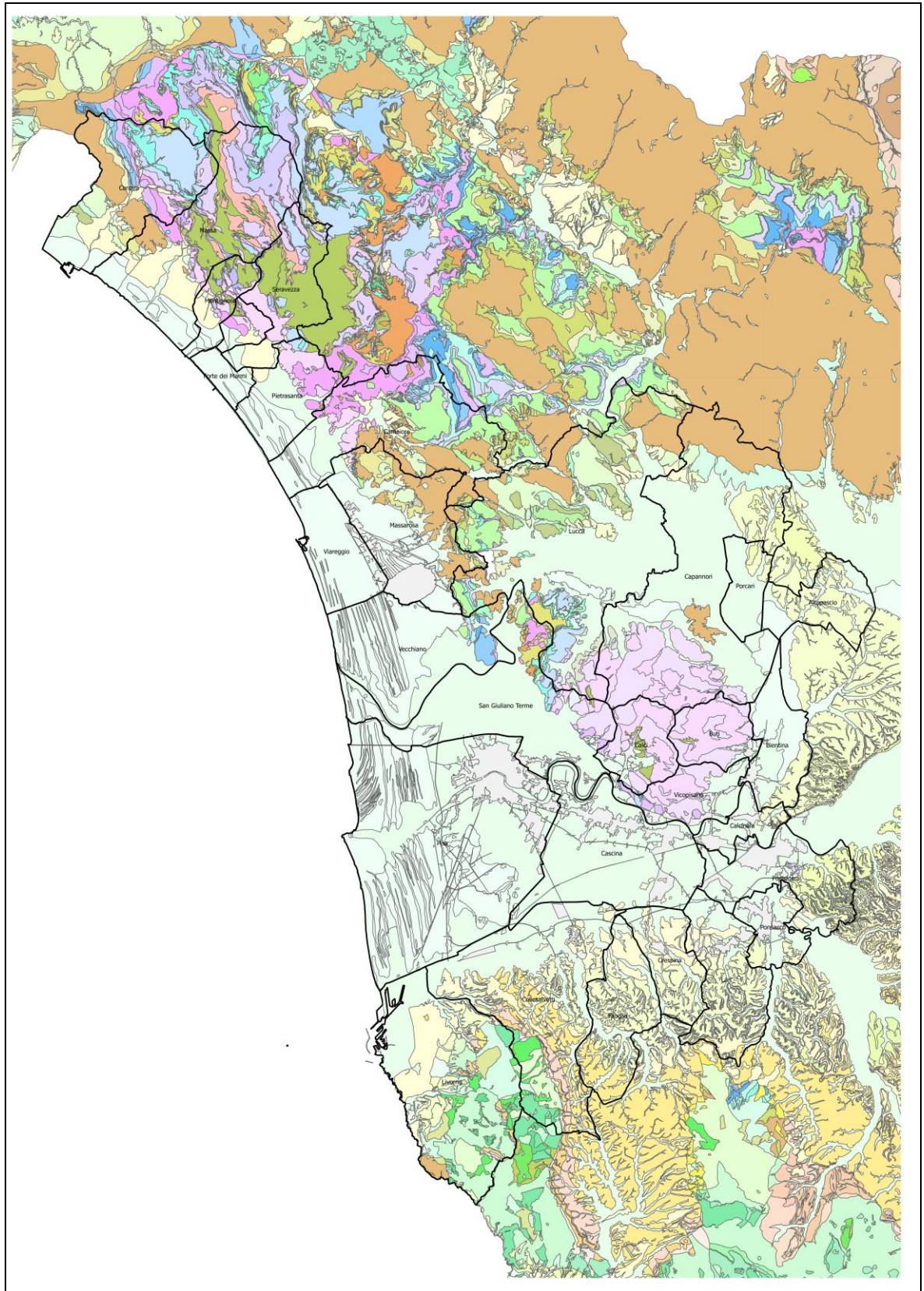


Fig. 1 Carta geologica con definizione dell'area dei Comuni appartenenti all'area di studio.

2. BANCA DATI

In accordo con i tecnici della Regione Toscana è stato predisposto un piano di raccolta di risultati di indagini in sito (già disponibili) secondo le tipologie di seguito indicate:

- prove penetrometriche statiche di tipo meccanico (CPTm);
- prove penetrometriche statico di tipo elettrico con misura della pressione interstiziale (prove con piezocono CPTu).

Per quanto riguarda l'acquisizione delle prove CPTm-CPTu sono stati utilizzati i seguenti archivi:

- Banca Dati prove CPT Regione Toscana (gestita LaMMA) disponibile su <http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/cartoteca.html>;
- Banca Dati prove CPT di provenienza dagli studi di Microzonazione Sismica Comunali;
- Banca Dati prove CPT ex Provinciale

Inoltre la RT e il DIC I hanno recuperato, da singoli professionisti che operano nel territorio, ulteriori indagini penetrometriche.

Non è stato però possibile reperire le informazioni da sondaggi prossimi alle verticali penetrometriche come prima specificato. Pertanto anche la quota piezometrica è stata ricavata dalla cartografia predisposta da RT come specificato di seguito. La maggioranza delle penetrometrie sono state fornite su supporto cartaceo. L'insieme delle indagini penetrometriche è stato assoggettato ad una selezione, scartando le prove che risultavano illeggibili o incomplete. Sono state considerate complete le prove che riportavano profondità, resistenza alla punta e attrito laterale, in forma leggibile. Per alcune prove è stato possibile reperire unicamente i diagrammi delle resistenze con la profondità. Per digitalizzare queste informazioni è stato necessario predisporre un algoritmo basato sull'impiego di Autocad.

Dal momento che non tutte le prove CPT presentano l'indicazione della quota di falda e, anche se indicata, non risulta sufficientemente attendibile, la Regione Toscana ha provveduto ad uno studio *ad hoc*, ricavando la quota di falda direttamente dalla superficie piezometrica, disponibile quasi per l'intera area di studio, e desunta dagli studi freaticometrici effettuati dall'Autorità di Bacino dell'Arno e del Serchio, ognuna per le rispettive aree di competenza.

Di seguito, viene proposta la carta della superficie piezometrica (Fig.2) per la zona di studio.

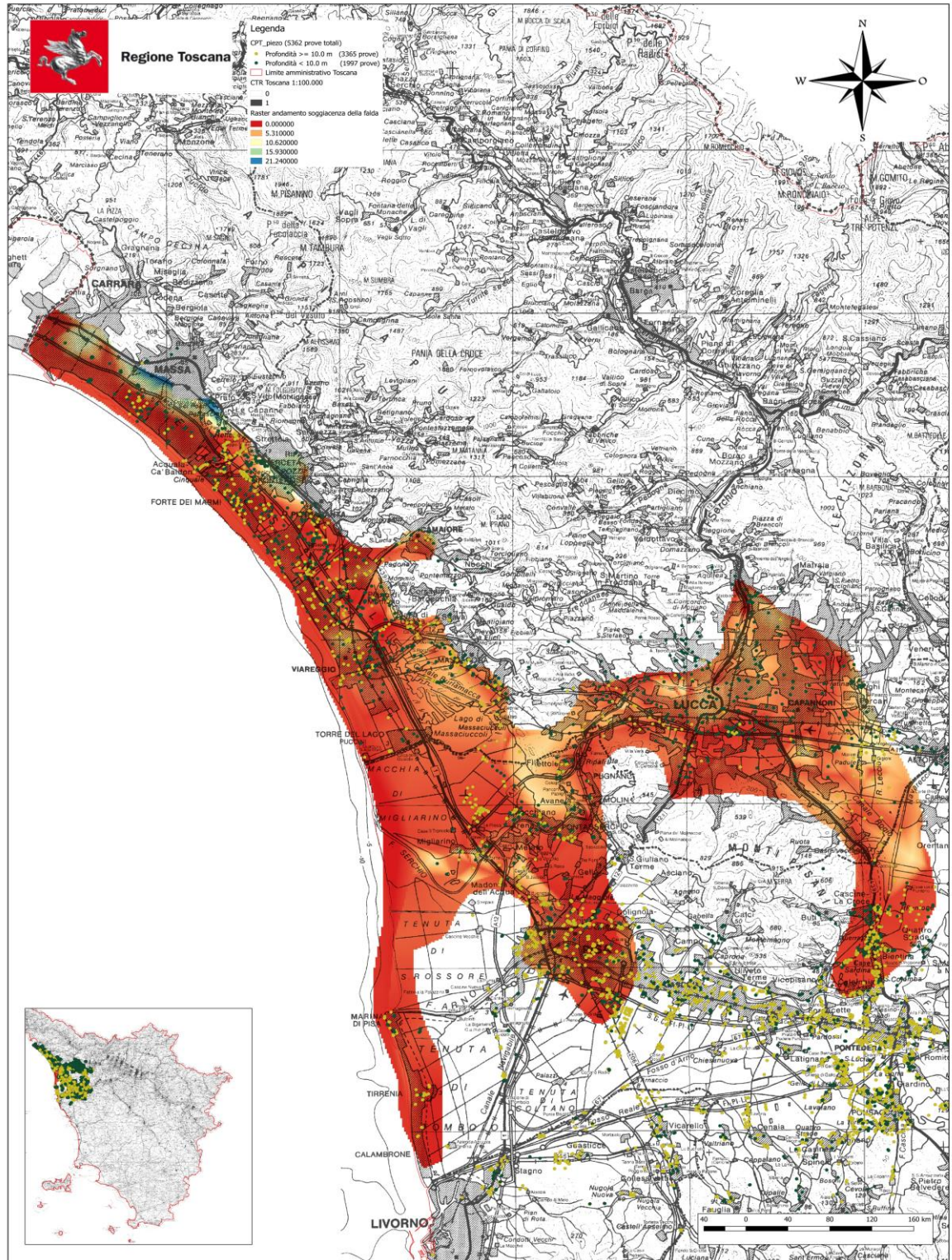


Fig. 2 Carta della superficie piezometrica. (Elaborata con la collaborazione dell'Ufficio Prevenzione Sismica del Settore Sismica della Regione Toscana)

Nella Tabella 1 sono riassunti, suddivisi per macroaree, il numero di prove suddivise per tipologia (CPTm o CPTu) e per classe di profondità raggiunta.

Tabella 1. Database utilizzato

MACROAREA: VERSILIA								
Comune	N° CPTm	N° CPTu	Depth (m)					
			0-5 m	5-8 m	8-10 m	10-15 m	15-20 m	> 20 m
Camaiore	103	13	2	31	63	19	0	1
Carrara	18	/	2	12	2	0	2	0
Forte dei Marmi	91	/	3	27	53	8	0	0
Massa	77	/	19	30	20	7	1	0
Massarosa	93	/	2	31	30	25	3	2
Montignoso	79	/	9	14	9	26	21	0
Pietrasanta	188	/	21	70	49	25	21	2
Serravezza	33	/	5	7	13	8	0	0
Viareggio	87	/	7	24	28	20	8	0
MACROAREA: PIANA DI LUCCA								
Comune	N° CPTm	N° CPTu	Depth (m)					
			0-5 m	5-8 m	8-10 m	10-15 m	15-20 m	> 20 m
Altopascio	53	/	9	26	9	8	1	0
Capannori	100	/	22	34	28	9	7	0
Lucca	80	/	25	40	14	1	0	0
Porcari	45	/	2	11	17	15	0	0
MACROAREA: PIANA DI PISA (Arno)								
Comune	N° CPTm	N° CPTu	Depth (m)					
			0-5 m	5-8 m	8-10 m	10-15 m	15-20 m	> 20 m
Bientina	347	/	5	85	170	58	15	14
Buti	88	/	24	17	30	15	0	2
Calci	22	/	15	5	2	0	0	0
Calcinaia	206	/	1	21	148	23	13	0
Cascina	510	/	7	79	299	69	22	34
Collesalveti	223	/	5	30	84	43	29	32
Crespina	53	/	3	7	25	13	4	1
Fauglia	50	/	4	7	24	8	6	1
Lari	129	/	8	18	68	13	21	1
Livorno	17	/	0	0	8	5	1	3
Pisa	488	/	14	64	168	133	60	49
Ponsacco	338	/	7	57	198	47	26	3
Pontedera	534	3	8	83	301	88	25	32
San Giuliano Terme	156	/	15	19	73	32	3	14
Vicopisano	93	/	8	21	47	14	3	0
Vecchiano	199	/	32	48	46	31	22	20

La maggior parte delle prove CPT, ricadenti nell'area di studio, si trova collocata nella macroarea della piana di Pisa (77%, pari a 3456 CPT) di cui gran parte delle prove (49%) ricade nell'intervallo di profondità 8-10m, il 17% nell'intervallo 10-15 m e il 7% in quello di 15-20m. Solo un esiguo 6% delle prove ha una profondità superiore a 20 m. Le prove che rientrano nella macroarea della Versilia sono il 17% (pari a 782 CPT) delle prove totali e di queste il 31% ricade nell'intervallo 5-8m, il 34% in 8-10m, il 18% in quello 10-15m e solo il 7% nell'intervallo di 15-20m. Le CPT superiori a 20 m sono solo l'1%. Le prove che appartengono alla piana di Lucca sono solo il 6% (pari a 278 CPT) dell'intera banca dati analizzata, di cui il 40% rientra nell'intervallo 5-8m, il 24% in quello 8-10m, il 12% in quello 10-15m, e solamente il 3% in 15-20m. Nessuna prova supera la profondità dei venti metri.

Tabella 2. Profondità raggiunte nelle prove CPT del Database

Macroarea	Depth (m)						CPT TOT
	0-5 m	5-8 m	8-10 m	10-15 m	15-20 m	> 20 m	
Versilia	70	246	267	138	56	5	782
Piana di Lucca	58	111	68	33	8	0	278
Piana di Pisa (Arno)	156	561	1691	592	250	206	3456

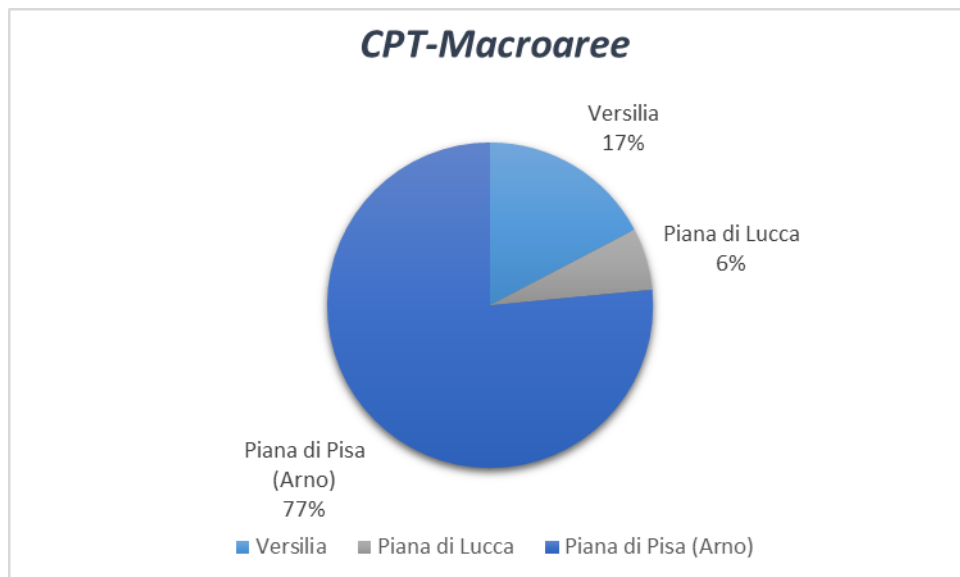


Fig. 3 Numerosità delle prove per macroaree

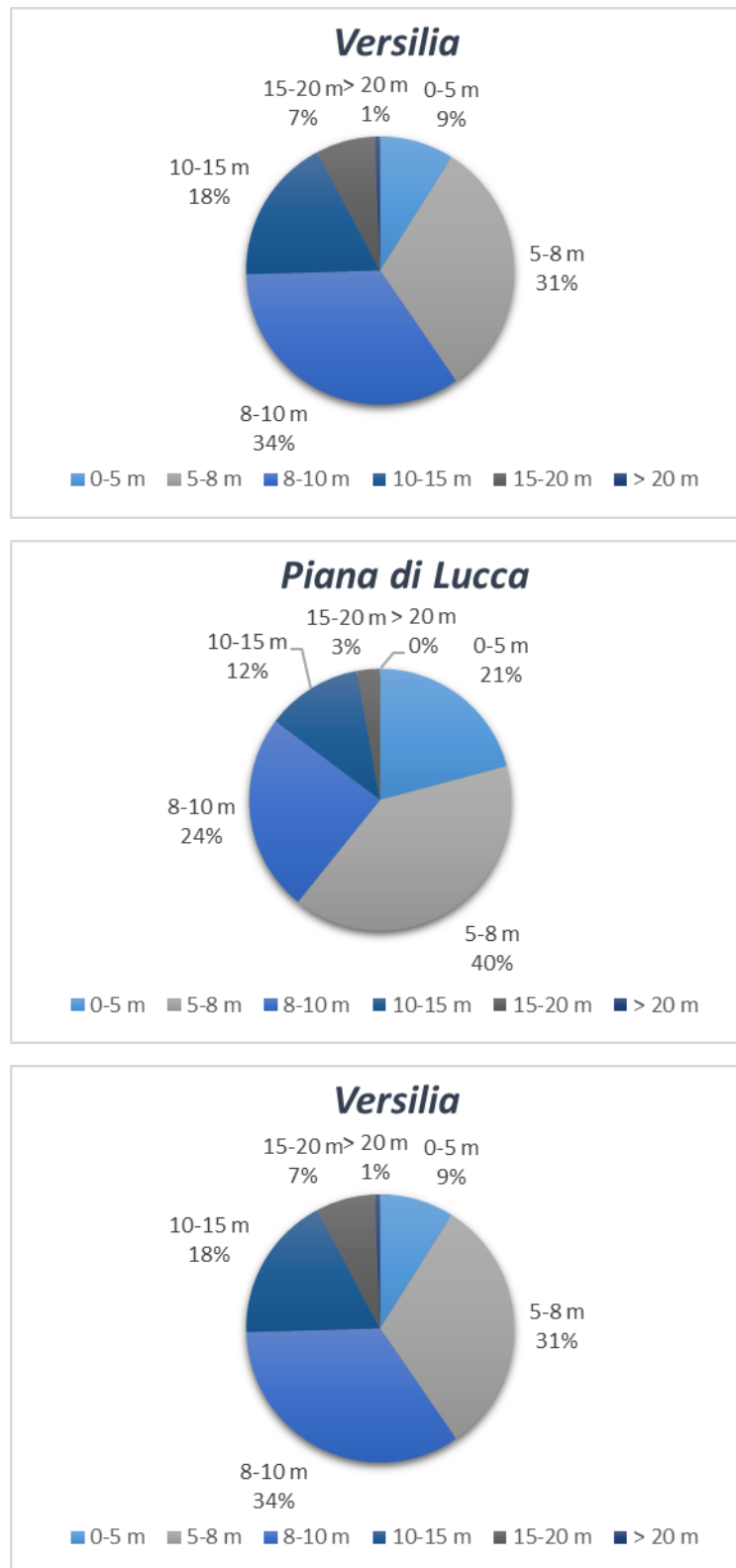


Fig. 4 Profondità raggiunte per macrofauna

Nella Tabella 3 sono riassunti, suddivisi per province, il numero di prove suddivise per tipologia (CPTm o CPTu) e per classe di profondità raggiunta.

Tabella 3. Prove suddivise per tipologia (CPTm - CPTu)

PROVINCIA: LIVORNO								
Comune	N° CPTm	N° CPTu	Depth (m)					
			0-5 m	5-8 m	8-10 m	10-15 m	15-20 m	> 20 m
Livorno	17	/	0	0	8	5	1	3
Collesalveti	223	/	5	30	84	43	29	32
PROVINCIA: LUCCA								
Comune	N° CPTm	N° CPTu	Depth (m)					
			0-5 m	5-8 m	8-10 m	10-15 m	15-20 m	> 20 m
Altopascio	53	/	9	26	9	8	1	0
Camaiore	103	13	2	31	63	19	0	1
Capannori	100	/	22	34	28	9	7	0
Forte dei Marmi	91	/	3	27	53	8	0	0
Lucca	80	/	25	40	14	1	0	0
Massarosa	93	/	2	31	30	25	3	2
Pietrasanta	188	/	21	70	49	25	21	2
Porcari	45	/	2	11	17	15	0	0
Viareggio	87	/	7	24	28	20	8	0
Serravezza	33	/	5	7	13	8	0	0
PROVINCIA: MASSA-CARRARA								
Comune	N° CPTm	N° CPTu	Depth (m)					
			0-5 m	5-8 m	8-10 m	10-15 m	15-20 m	> 20 m
Carrara	18	/	2	12	2	0	2	0
Montignoso	79	/	9	14	9	26	21	0
Massa	77	/	19	30	20	7	1	0
PROVINCIA: PISA								
Comune	N° CPTm	N° CPTu	Depth (m)					
			0-5 m	5-8 m	8-10 m	10-15 m	15-20 m	> 20 m
Bientina	347	/	5	85	170	58	15	14
Buti	88	/	24	17	30	15	0	2
Calci	22	/	15	5	2	0	0	0
Calcinaia	206	/	1	21	148	23	13	0
Cascina	510	/	7	79	299	69	22	34
Crespina	53	/	3	7	25	13	4	1
Fauglia	50	/	4	7	24	8	6	1
Lari	129	/	8	18	68	13	21	1
Pisa	488	/	14	64	168	133	60	49
Ponsacco	338	/	7	57	198	47	26	3
Pontedera	534	3	8	83	301	88	25	32
San Giuliano Terme	156	/	15	19	73	32	3	14
Vicopisano	93	/	8	21	47	14	3	0
Vecchiano	199	/	32	48	46	31	22	20

PROVINCIA: FIRENZE ¹								
Comune	N° CPTm	N° CPTu	Depth (m)					
			0-5 m	5-8 m	8-10 m	10-15 m	15-20 m	> 20 m
Vicchio	5	4	0	0	1	8	0	0

Tabella 4. Profondità raggiunte nelle prove CPT del Database (dato per provincia)

Provincia	Depth (m)						CPT TOT
	0-5 m	5-8 m	8-10 m	10-15 m	15-20 m	> 20 m	
Livorno	5	30	92	48	30	35	240
Lucca	98	301	304	138	40	5	886
Massa-Carrara	30	56	31	33	24	0	174
Pisa	151	531	1599	544	220	171	3216

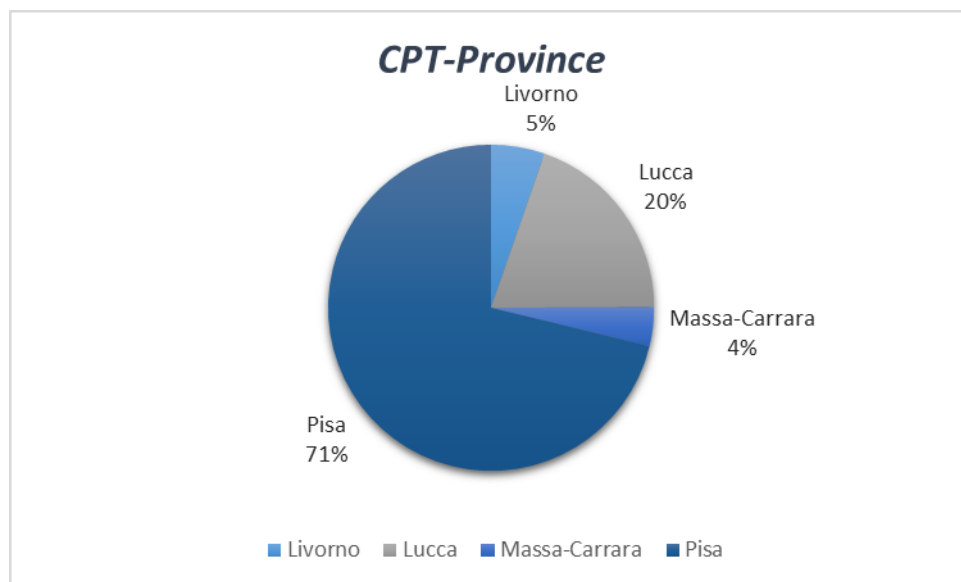


Fig. 5 Numerosità delle prove per provincia

¹ Prove utilizzate unicamente per verificare la metodologia proposta

3. DEFINIZIONE DELL'INPUT SISMICO

Per determinare la PGA (Peak Ground Acceleration) su suolo di riferimento, è stato utilizzato il programma “Spettri di risposta” liberamente scaricabile dal sito del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Sono state considerati una vita nominale pari a 50 anni ($V_N=50$) e un coefficiente d'uso pari ad 1 ($C_u=1$). Pertanto si è considerato un tempo di ritorno di 475 anni. Inoltre si è considerata una categoria di sottosuolo di tipo C poiché le aree di studio consistono di depositi prevalentemente di tipo granulare con fine, spessori superiori a 30 m e velocità delle onde di taglio generalmente inferiori a 360 m/sec e pertanto assimilabili a suolo di tipo C, ai sensi del Capitolo 3.2 NTC 2018, e una categoria topografica di tipo T1 (superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$). Nella Tabella 5, è riassunta, per ogni comune, la PGA individuata su suolo di riferimento.

Tabella 5. Stima della PGA secondo le NTC 2018 per ciascun comune considerato

PROVINCIA: LIVORNO			
Comune	Categoria di sottosuolo	Categoria Topografica	PGA
Livorno	C	T1	0.182
Collesalveti	C	T1	0.208
PROVINCIA: LUCCA			
Comune	Categoria di sottosuolo	Categoria Topografica	PGA
Altopascio	C	T1	0.191
Camaiore	C	T1	0.188
Capannori	C	T1	0.200
Forte dei Marmi	C	T1	0.192
Lucca	C	T1	0.196
Massarosa	C	T1	0.189
Pietrasanta	C	T1	0.196
Porcari	C	T1	0.195
Viareggio	C	T1	0.182
Serravezza	C	T1	0.210
PROVINCIA: MASSA-CARRARA			
Comune	Categoria di sottosuolo	Categoria Topografica	PGA
Carrara	C	T1	0.206
Montignoso	C	T1	0.212
Massa	C	T1	0.200
PROVINCIA: PISA			
Comune	Categoria di sottosuolo	Categoria Topografica	PGA
Bientina	C	T1	0.175
Buti	C	T1	0.180
Calci	C	T1	0.179
Calcinaia	C	T1	0.180
Cascina	C	T1	0.180
Crespina	C	T1	0.210
Fauglia	C	T1	0.209
Lari	C	T1	0.210
Pisa	C	T1	0.177
Ponsacco	C	T1	0.203
Pontedera	C	T1	0.190
San Giuliano Terme	C	T1	0.182
Vicopisano	C	T1	0.178
Vecchiano	C	T1	0.181
PROVINCIA: Firenze ²			
Comune	Categoria di sottosuolo	Categoria Topografica	PGA
Vicchio	D	T1	0.320

² Prove utilizzate unicamente per verificare la metodologia proposta.

Per la valutazione della magnitudo M , che nelle verifiche a liquefazione determina il valore del coefficiente MSF (Magnitude Scale Factor), sono state utilizzate le carte rappresentanti i valori modali e i valori medi di M , ottenuti a seguito della disaggregazione della pericolosità con periodi di ritorno pari 475 anni (GdL MS 2008, Spallarossa e Barani, 2007). Vale la pena ricordare che la Magnitudo è correlata alla durata dell'evento sismico e quindi al numero di cicli ed influenza il valore del fattore di sicurezza. Al ridursi della Magnitudo il fattore di sicurezza aumenta a parità di tutti gli altri fattori.

I comuni dell'area di studio ricadono interamente nell'intervallo $4.5 \leq M \leq 5$ per quanto riguarda i valori modali di M (Fig. 6). Nel caso dei valori medi di M (Fig. 7), alcuni comuni ricadono nell'intervallo $4.5 \leq M \leq 5$ mentre altri nell'intervallo $5 \leq M \leq 5.5$. Pertanto, è stato deciso di scegliere come magnitudo di input un valore omogeneo, per tutti i comuni facenti parte dell'area di studio, e pari a 5.5.

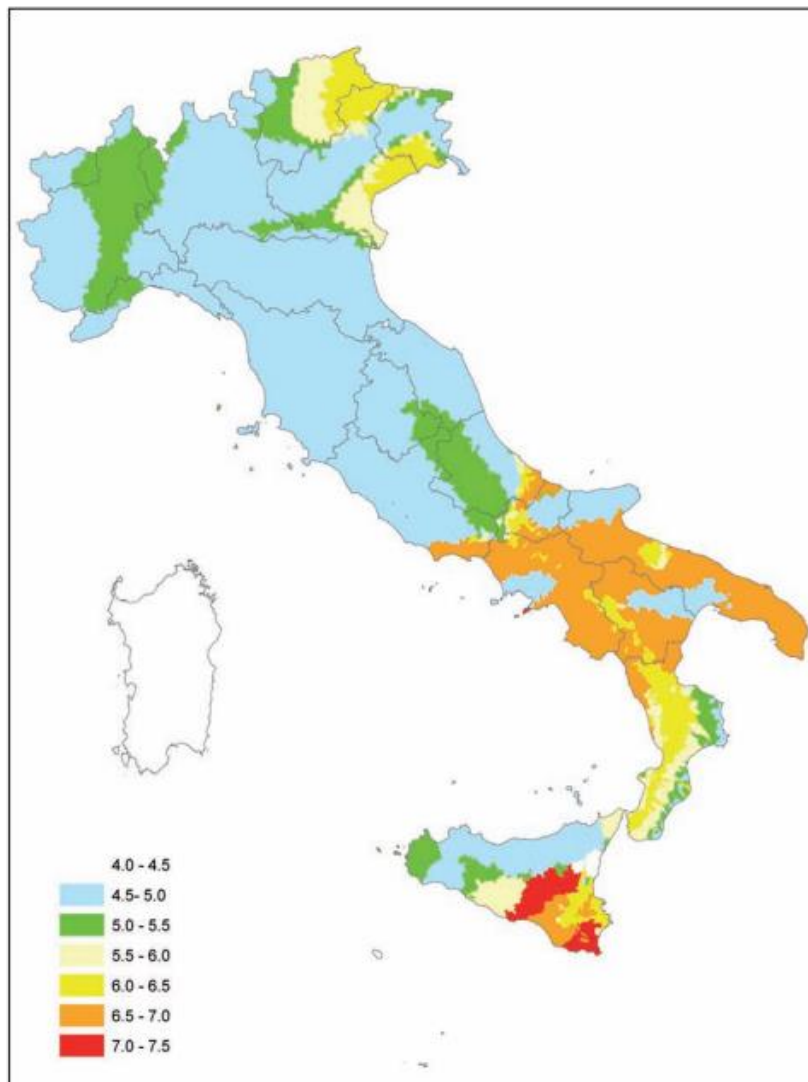


Figura 2.8-2 - Valori modali di M per comune, ottenuti a seguito della disaggregazione della pericolosità con periodi di ritorno di 475 anni (elaborazione su dati da Spallarossa e Barani, 2007).

Fig. 6 Carta dei valori modali di M .

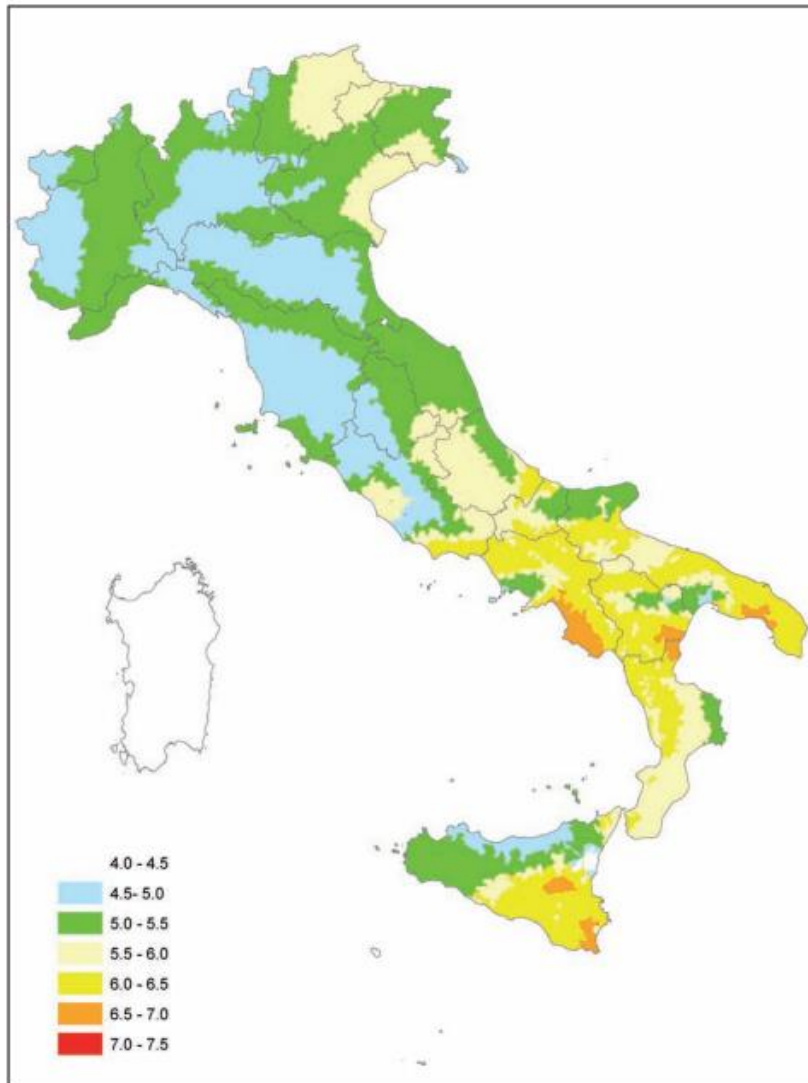


Figura 2.8-3 - Valori medi di M per comune, ottenuti a seguito della disaggregazione della pericolosità con periodi di ritorno di 475 anni (elaborazione su dati da Spallarossa e Barani, 2007).

Fig. 7 Carta dei valori medi di M .

4. ANALISI DEI DATI

Il rischio di liquefazione è stato valutato utilizzando tre metodi che sono stati concordati con la committenza (Boulanger e Idriss 2014, Robertson e Wride 1998, Juang et al. 2006). Questi metodi consentono di determinare il fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione con la profondità (FSL). Il rischio è stato invece valutato utilizzando l'indice LPI (Iwasaki et al. 1978) attenendosi alla formulazione originaria.

Tuttavia i metodi semplificati di analisi del potenziale di liquefazione sopra menzionati si basano sui risultati di prove CPTu. L'utilizzo di banche dati CPTm richiede quindi una correzione delle misure. L'attività di studio di UNIPI ha potuto verificare quanto segue:

- le resistenze alla punta (Q_c) della prova CPTm e CPTu differiscono di poco. Nel caso delle sabbie sciolte in genere risulta $Q_c(\text{CPTm}) > Q_c(\text{CPTu})$ (Figura 8);

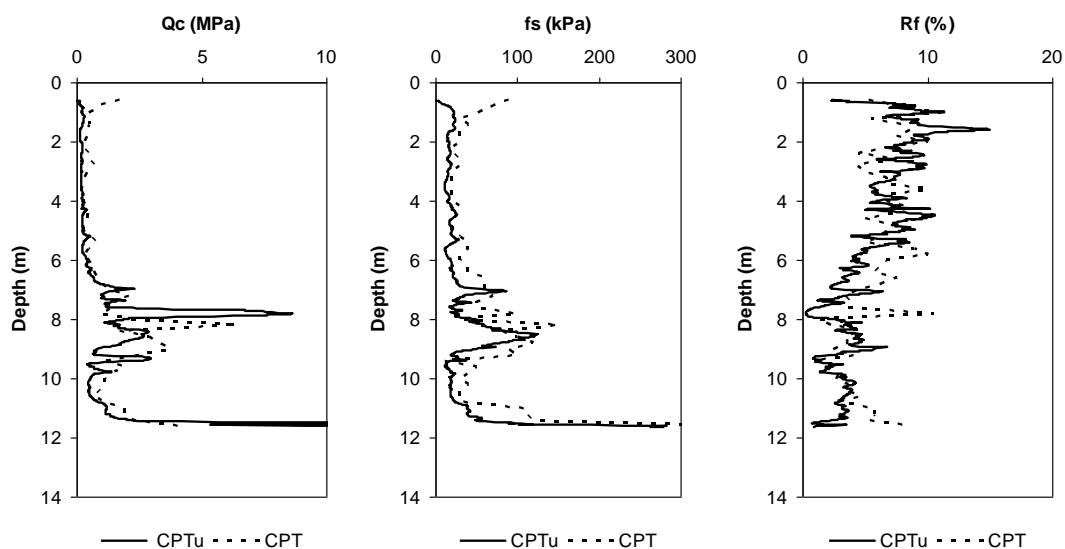


Fig. 8 Confronto di prove CPTm e CPTu ($R_f\% = f_s/Q_c$)

- l'attrito laterale (f_s) della prova CPTm è sistematicamente superiore a quello della prova CPTu (Figura 8);
- la classificazione dei terreni andrebbe fatta mediante la carta di Schmertmann (1978) nel caso di prove CPTm mentre nel caso di prove CPTu è possibile impiegare la carta di Robertson (1990);
- tutti i metodi di analisi del potenziale di liquefazione utilizzano la classificazione di Robertson (1990) ed in particolare l'indice I_c ;

- l'applicazione del metodo di Robertson (1990) ai risultati di prove CPTm conduce ad una sottostima di una o due classi della granulometria (Figure 9 e 10). Più semplicemente le sabbie e le sabbie limose vengono classificate come argille o limi argillosi sabbiosi. Questi ultimi sono materiali per cui il rischio di liquefazione non sussiste. L'errore nella direzione opposta riguarda unicamente le argille e non ha quindi influenza sull'analisi del potenziale di liquefazione;
- infine, vale la pena ricordare che le misure con la prova CPTm vengono effettuate ogni 20 cm, mentre la prova CPTu è quasi continua e fornisce misure ogni 2 cm. Questo aspetto non viene trattato nel presente accordo.

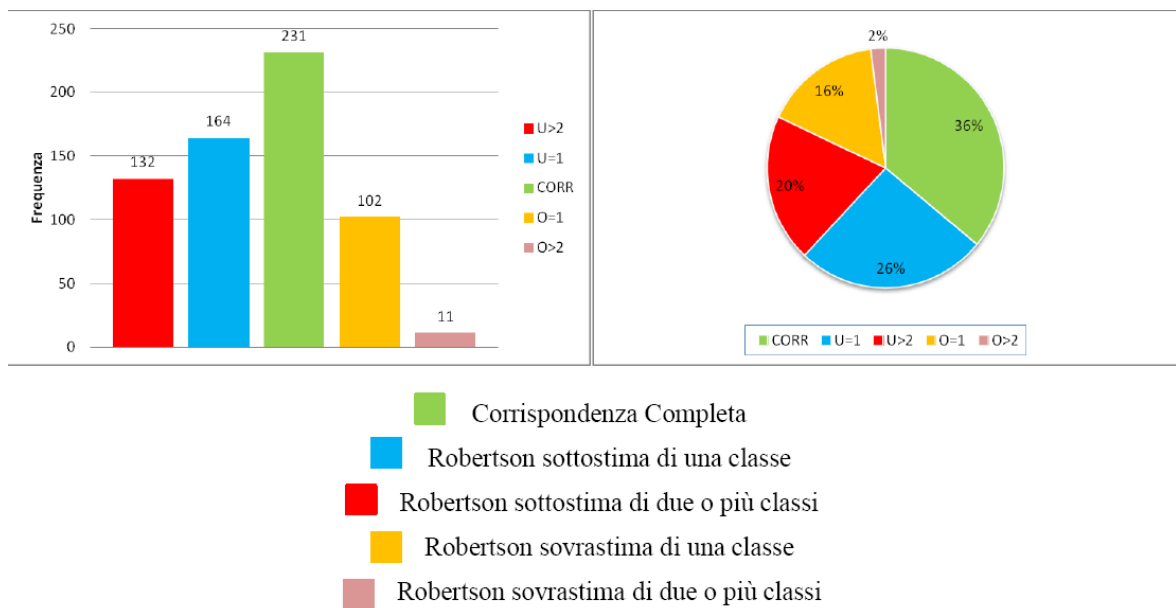


Fig. 9 Applicazione della carta di Robertson a prove CPTm provenienti dalla banca dati dell'Emilia Romagna

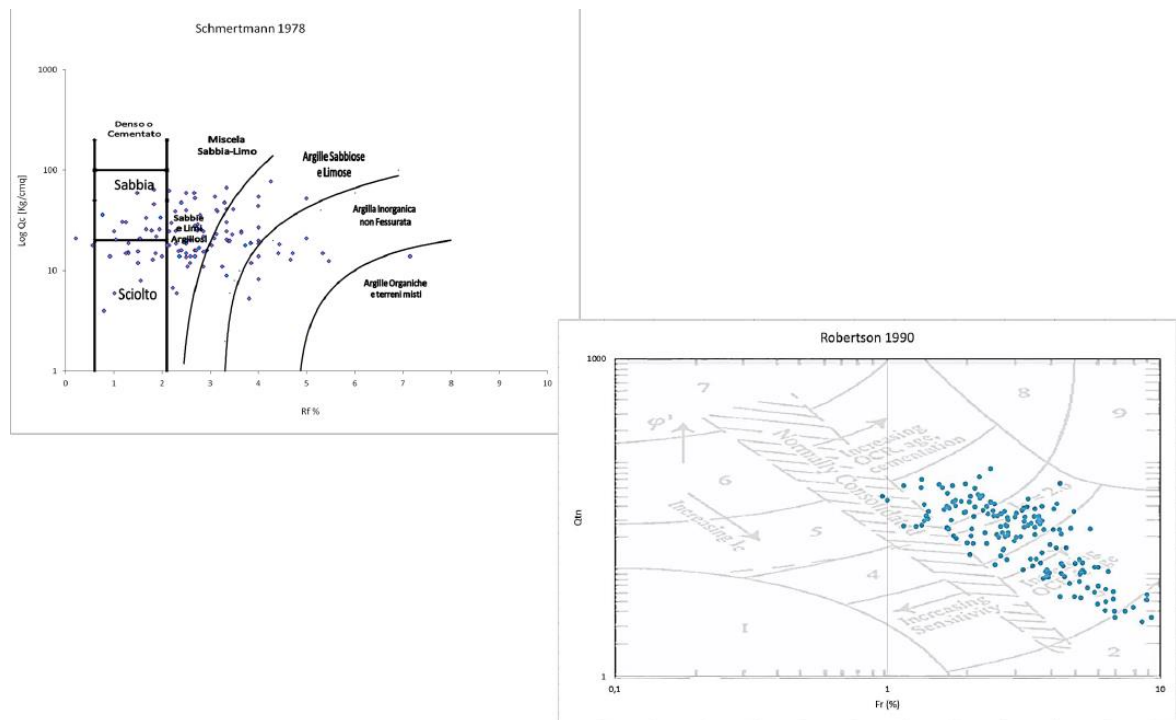


Fig. 10 Nella parte destra (Robertson) gli strati di sabbia sono assenti le miscele di sabbia e limo (classe 5) sono poco numerose e compaiono prevalentemente le tessiture di argille organiche, argille, limi (classi 2, 3, 4). Nella parte sinistra invece (Schmertmann) la presenza di livelli sabbiosi è ampiamente documentata.

Gli aspetti sopra menzionati conducono ad una sottostima del rischio di liquefazione nel caso in cui si utilizzino i risultati di prove CPTm. L'Università di Pisa ha deciso, in accordo con la committenza, di applicare un criterio empirico per correggere automaticamente i valori di f_s e di procedere alla correzione empirica del parametro I_c . Il metodo utilizzato è stato elaborato in collaborazione con l'Università di Pavia (Meisina et al. 2017, Lo Presti et al. 2017) ed è stato impiegato/validato utilizzando coppie di verticali penetrometriche in Emilia Romagna CPTm/CPTu nei siti soggetti a liquefazione a seguito della sequenza sismica del 2012 (Lo Presti et al. 2013).

La correzione del parametro f_s (Francesconi 2015) è stata proposta studiando dodici prove formanti un reticolo di tre file distanti 0,5 m (tre prove CPTu con diametro 38.8 mm, tre CPTu con diametro 35.9 mm, tre CPTu con diametro 36mm e tre prove CPTm distanti tra di loro 0,5 m), effettuate a Pisa per lo studio in questione, e utilizzando quattro coppie

d'indagini provenienti dal data base della Regione Emilia Romagna. La miglior correlazione è stata trovata ponendo in relazione il rapporto $f_{s\ CPTu} / f_{s\ CPTm}$ con $f_{s\ CPTu}$ (Figura 11).

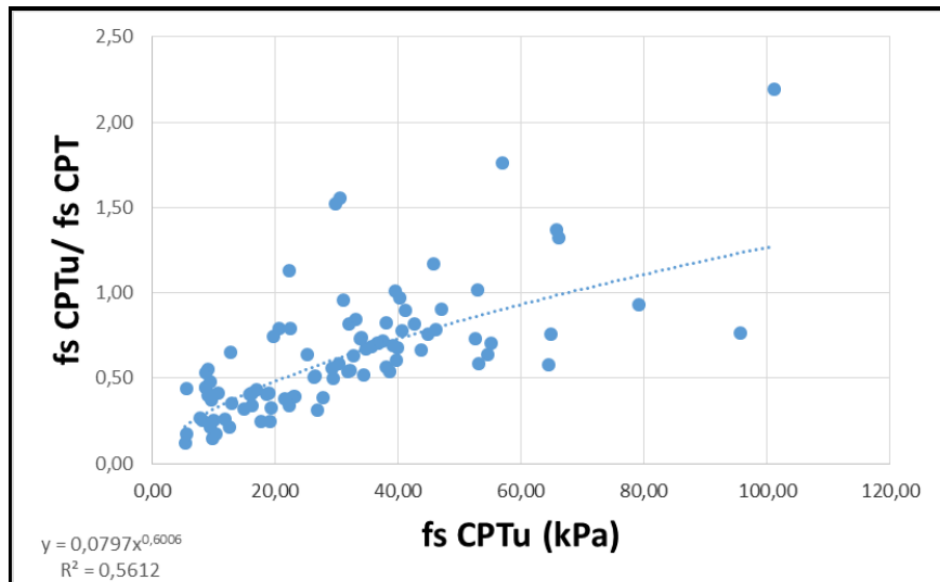


Fig. 11 Criterio per la correzione dell'attrito laterale (f_s) misurato con prove CPTm

Si è ottenuta così la seguente correlazione:

$$f_{s\ CPTu} = (0,0797 \times f_{s\ CPTm})^{2,504}$$

L'equazione ottenuta è applicabile per valori di f_s CPTm inferiori o uguali a 65 kPa. Oltre a tale valore di soglia fissato si assume f_s CPTm= f_s CPTu. Lo scopo originario di questa funzione di correlazione era quello di cercare di ottenere, dopo la correzione, valori di LPI e LSN simili per le prove CPTm e CPTu.

Tuttavia la correzione di f_s è risultata poco influente. Si è pensato, quindi, di correggere il parametro I_c .

Utilizzare dei grafici di classificazione basate su prove CPTu per l'interpretazione di CPTm porta ad una valutazione errata del rischio liquefazione. Infatti, l'utilizzo dell'approccio di Robertson(1990) per interpretare prove CPTm porta ad una sottostima delle dimensioni dei grani del terreno. Per confrontare i due approcci, che sono diversi in linea di principio, è stata proposta una corrispondenza tra i litotipi dell'approccio di Schmertmann (1978) e le classi SBTn di Robertson (1990). Si è deciso di calcolare il ΔI_c necessario per avere una corrispondenza corretta tra i due sistemi di classificazione.

$$\Delta I_c = -0.296 \ln(q_c) + 0.8568$$

$$I_c (\text{correct}) = I_c(\text{Robertson, 1990}) - \Delta I_c$$

La correzione proposta si applica solo quando la classificazione di Robertson (1990) sottovaluta quella di Schmertmann (1978b).

Di seguito si propone il grafico che mette in relazione la variazione del ΔI_c al variare della resistenza alla punta (MPa)

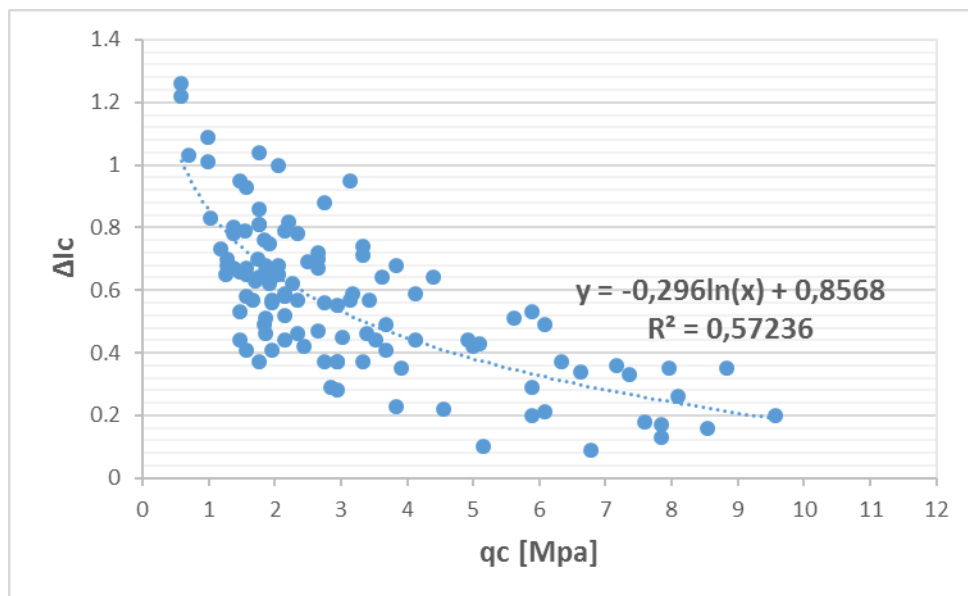


Fig. 12 Criterio per la correzione dell'Indice di classificazione (I_c) valutato secondo Robertson (1990) e Robertson & Wride (1998)

Nell'area oggetto di studio il metodo è stato validato considerando coppie CPTm/CPTu a Camaiore (siti sabbiosi), Pontedera (siti argillosi) e Vicchio (siti sabbiosi), ed i risultati ottenuti sono mostrati nelle Figure 13, 14 e 15. Ai fini di una migliore leggibilità di tali Figure, i profili del fattore di sicurezza (FS) ed i relativi profili dell'LPI fanno riferimento al metodo di valutazione del rischio di liquefazione proposto da Boulanger & Idriss (2014).

Nella Tabella 6 si riassumono le coppie corrispondenti CPTu-CPTm e le distanze che intercorrono tra le prove.

Tabella 6. Coppie di prove CPTu-CPTm confrontate

CPTu	CPTm	Distanza (m)	Comune
28000599_CPT_6688	28000599_CPT_6666	38.70	Pontedera
	28000599_CPT_6667	22.06	Pontedera
28000599_CPT_6690	28000599_CPT_6668	30.92	Pontedera
	28000599_CPT_6669	29.82	Pontedera
28000599_CPT_6689	28000599_CPT_9994	26.90	Pontedera
	28000599_CPT_9995	18.77	Pontedera
	28000599_CPT_6666	22.52	Pontedera
	28000599_CPT_6667	39.61	Pontedera
CPTU1	00405	159.58	Camaione
CPTU2	00225	135.58	Camaione
CPTU4	00225	128.50	Camaione
	00634	99.18	Camaione
CPTU7	00224	147.80	Camaione
CPTU9	00783	133.41	Camaione
CPTe11	CPT1	2.00	Vicchio
CPTe12	CPT3	2.00	Vicchio
CPTe13	CPT6	2.00	Vicchio
CPTe15	CPT4	2.00	Vicchio
	CPT9bis	10.00	Vicchio

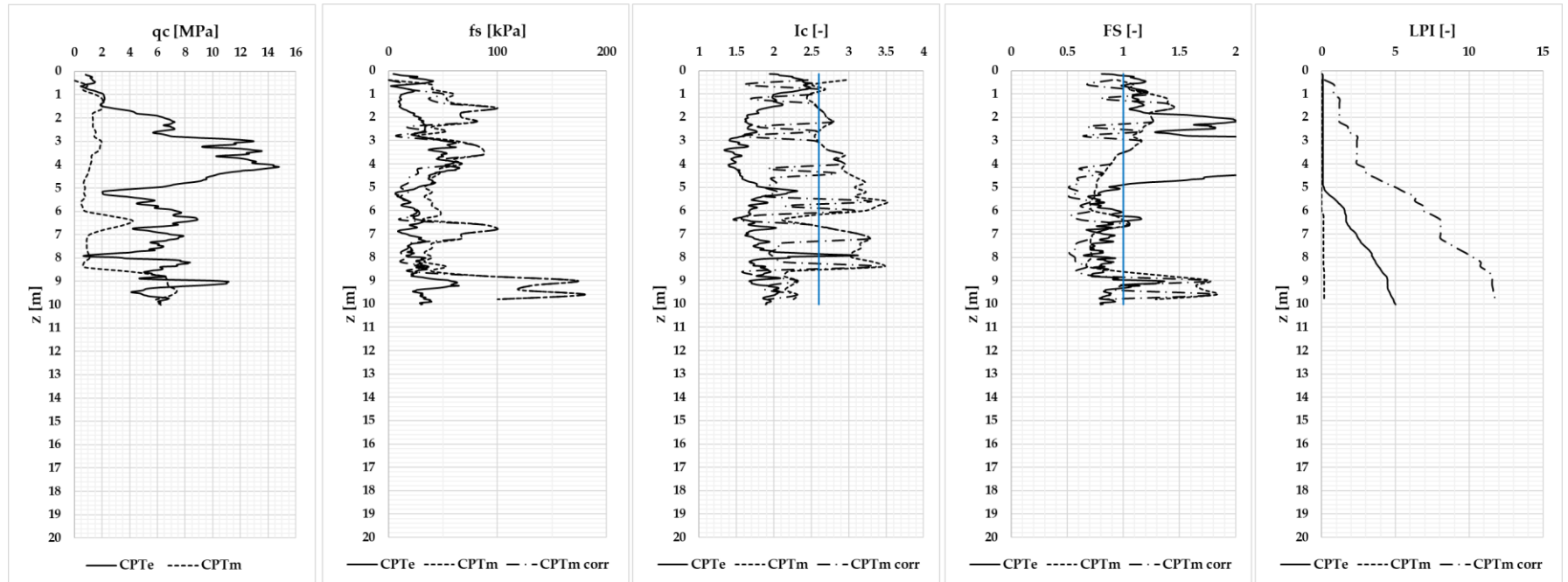


Fig.13a Applicazione del metodo per la coppia di prove 'CPTm (00405) – CPTu (1)' - Camaiore

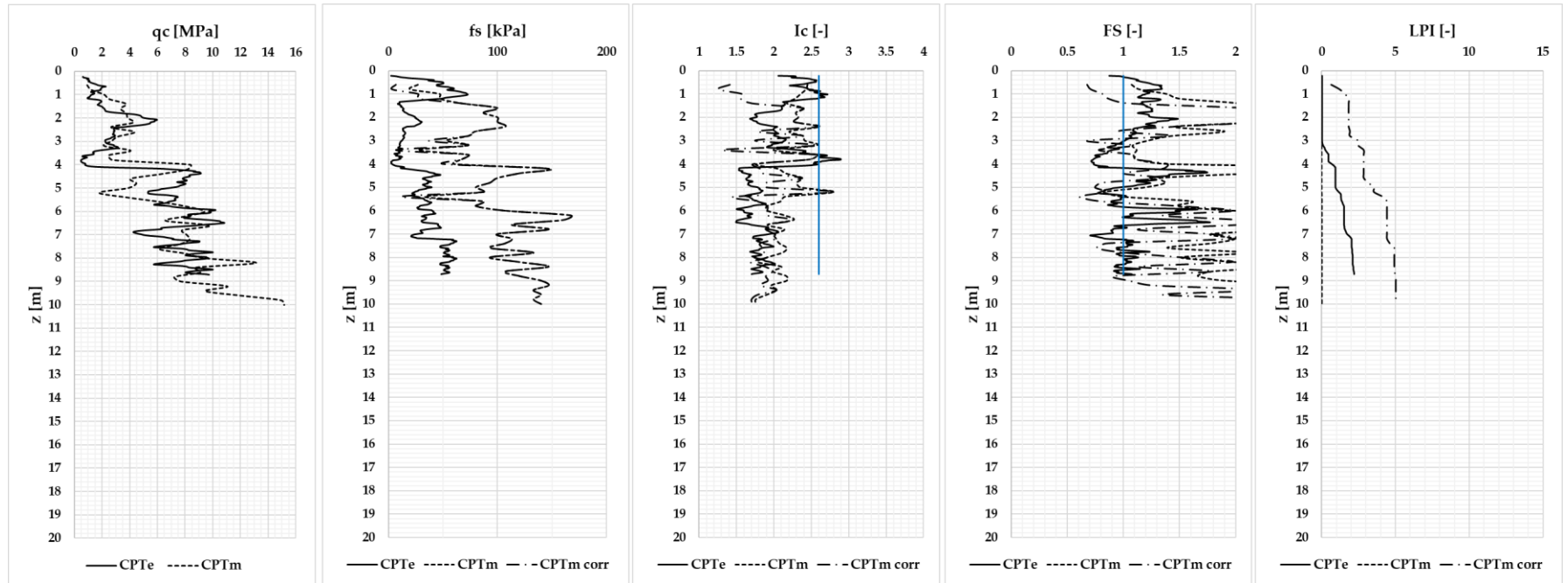


Fig.13b Applicazione del metodo per la coppia di prove 'CPTm (00634) – CPTu (4)' - Camaiore

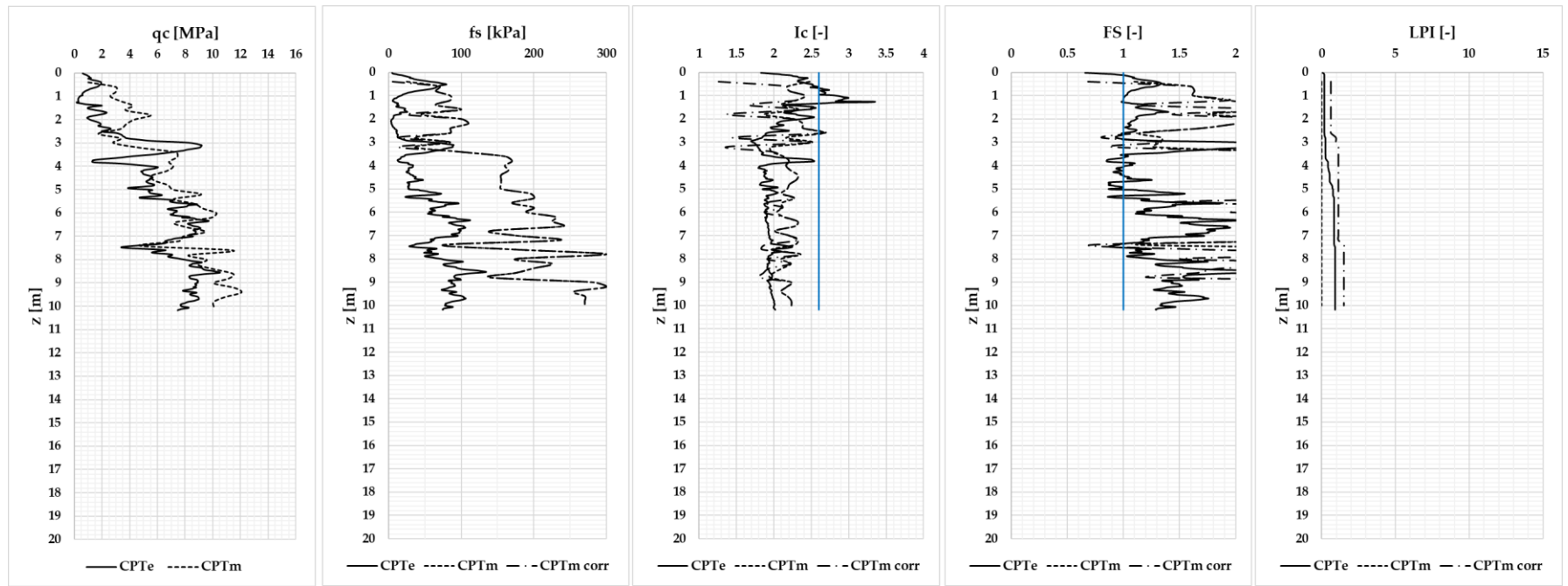


Fig.13c Applicazione del metodo per la coppia di prove 'CPTm (00224) – CPTu (7)' - Camaiore

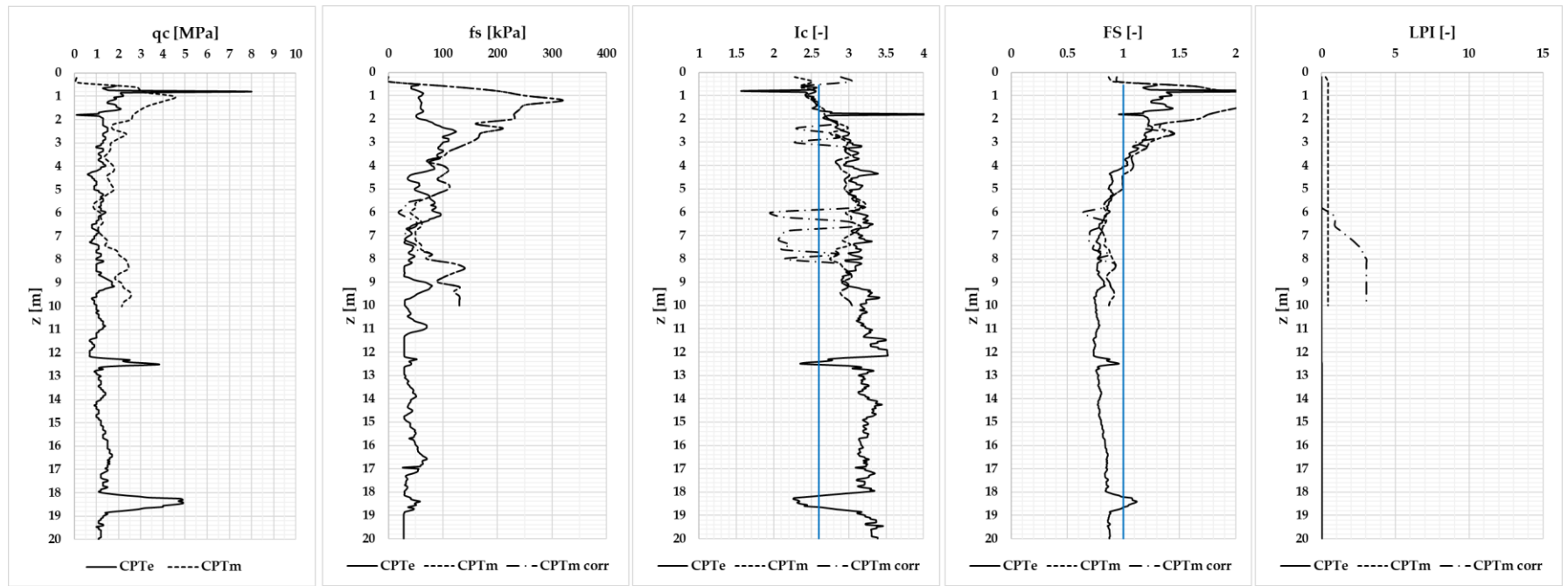


Fig.14a Applicazione del metodo per la coppia di prove 'CPTm (6666) – CPTu (6688)' - Pontedera

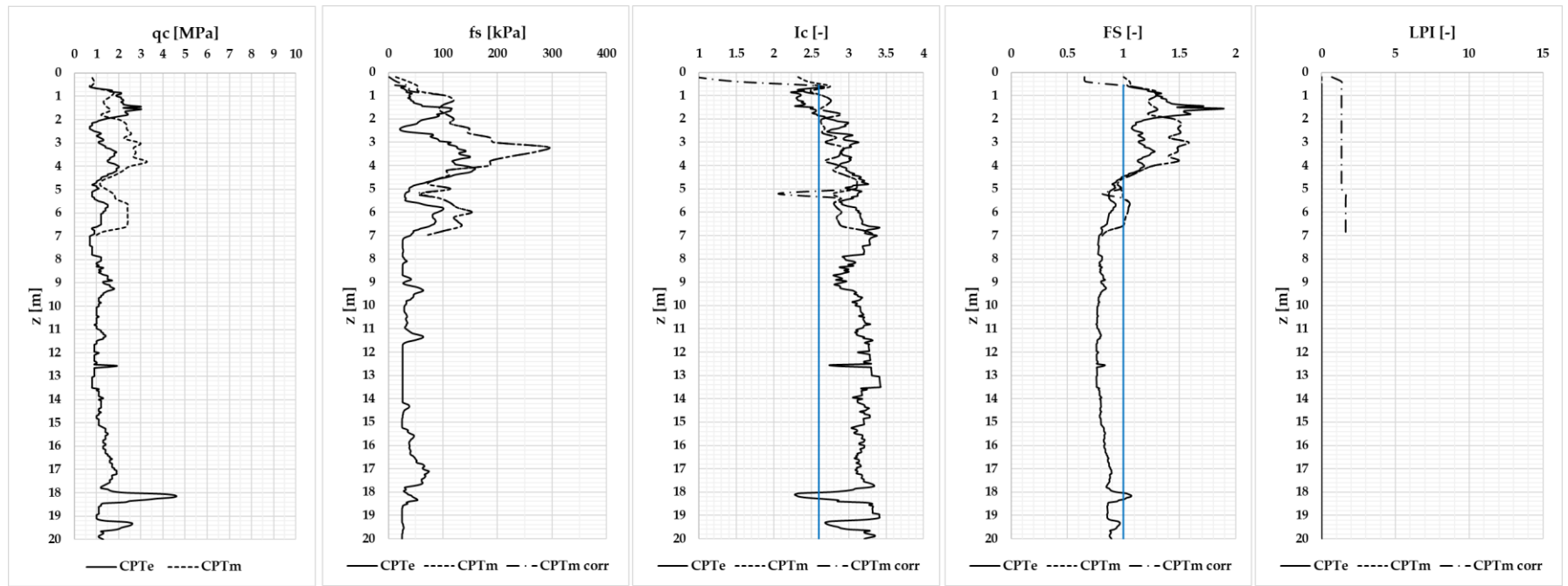


Fig. 14b Applicazione del metodo per la coppia di prove 'CPTm (9995) – CPTu (6689)' - Pontedera

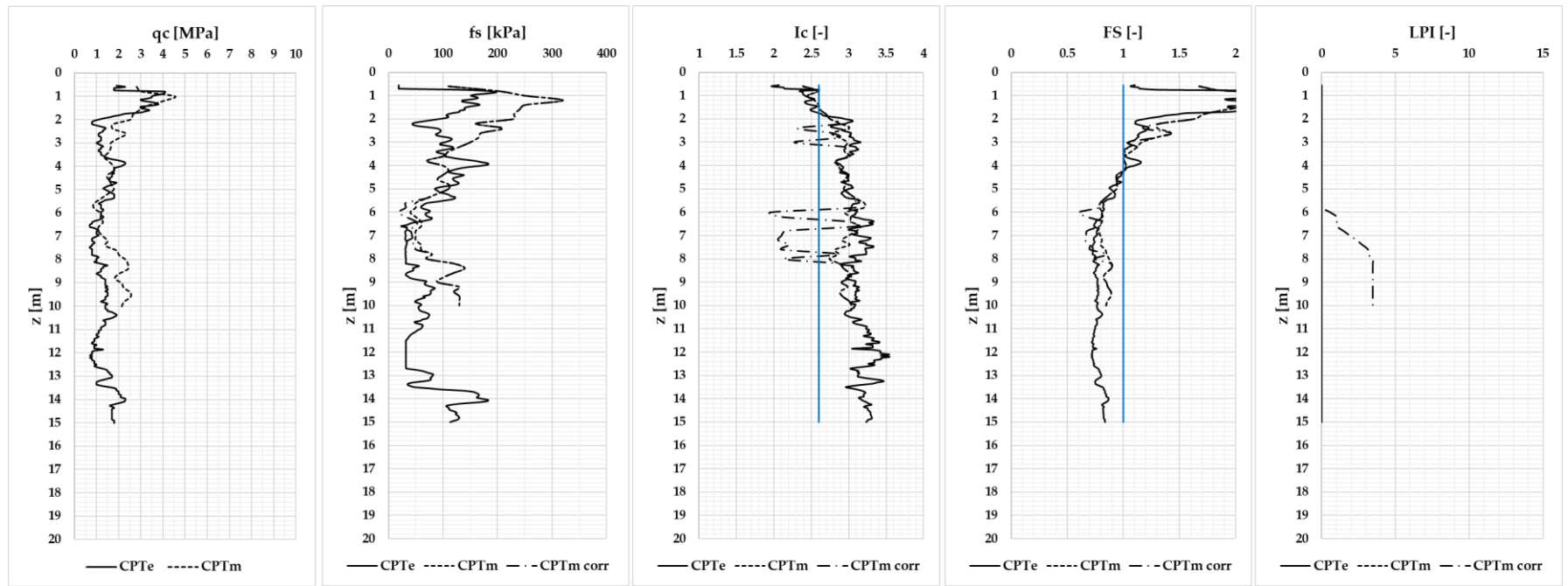


Fig.14c Applicazione del metodo per la coppia di prove 'CPTm (6669) – CPTu (6690)' - Pontedera

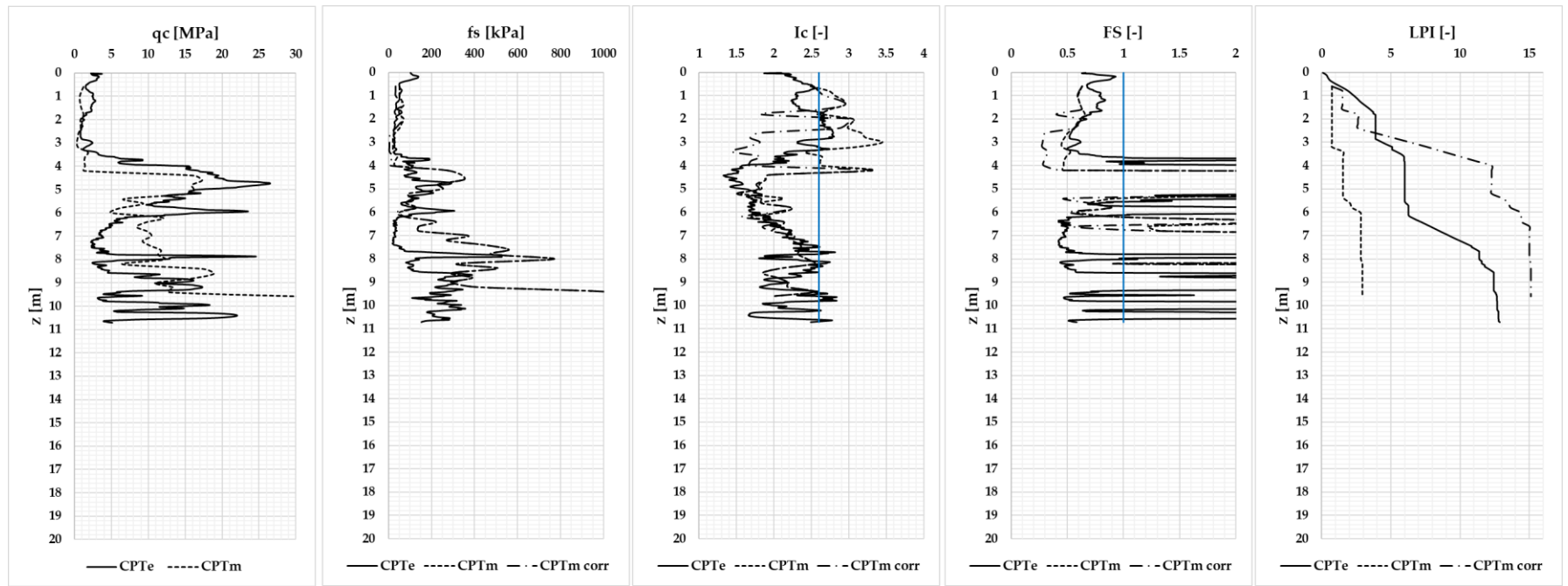


Fig.15a Applicazione del metodo per la coppia di prove 'CPTm (1) – CPTu (11)' - Vicchio

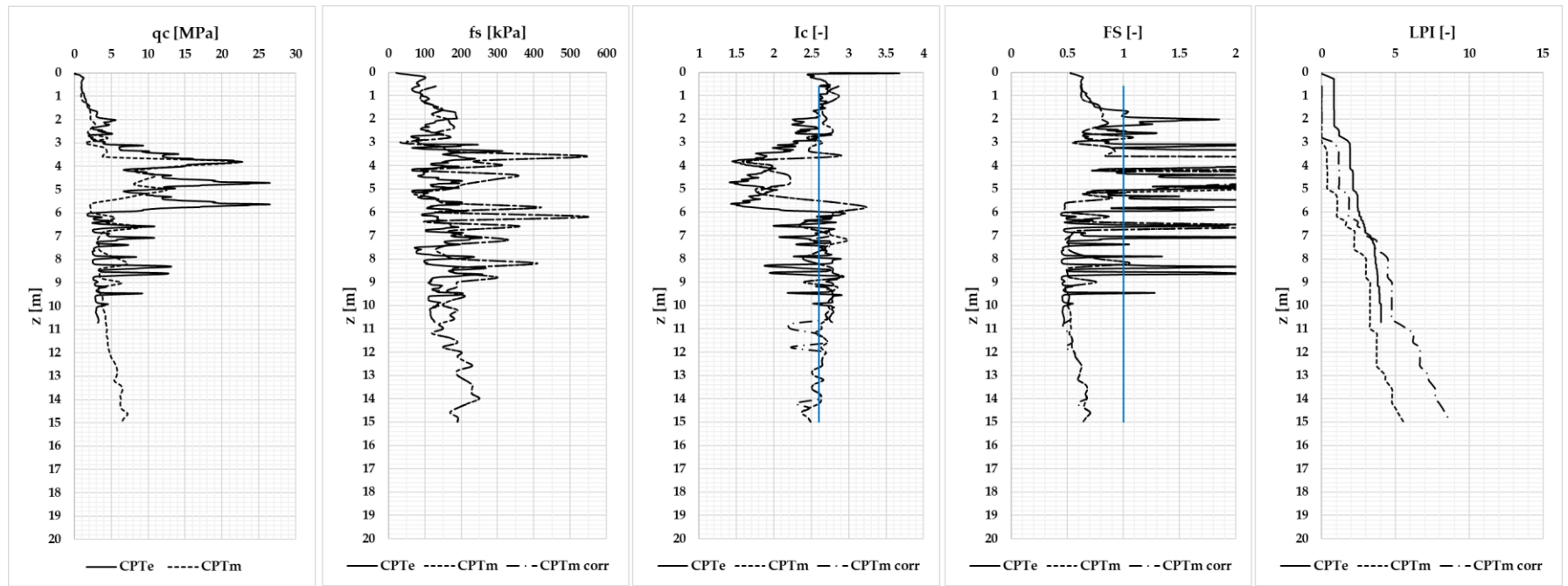


Fig.15b Applicazione del metodo per la coppia di prove 'CPTm (3) – CPTu (12)' - Vicchio

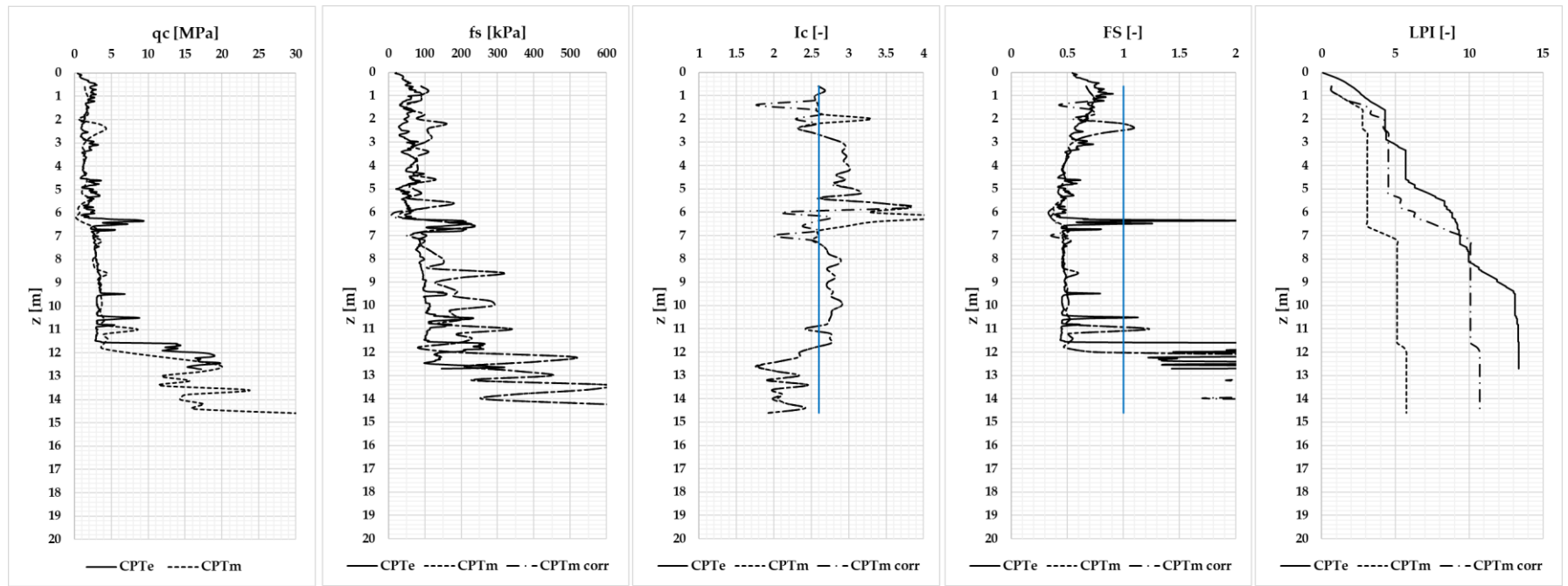


Fig.15c Applicazione del metodo per la coppia di prove 'CPTm (6) – CPTu (13)' - Vicchio

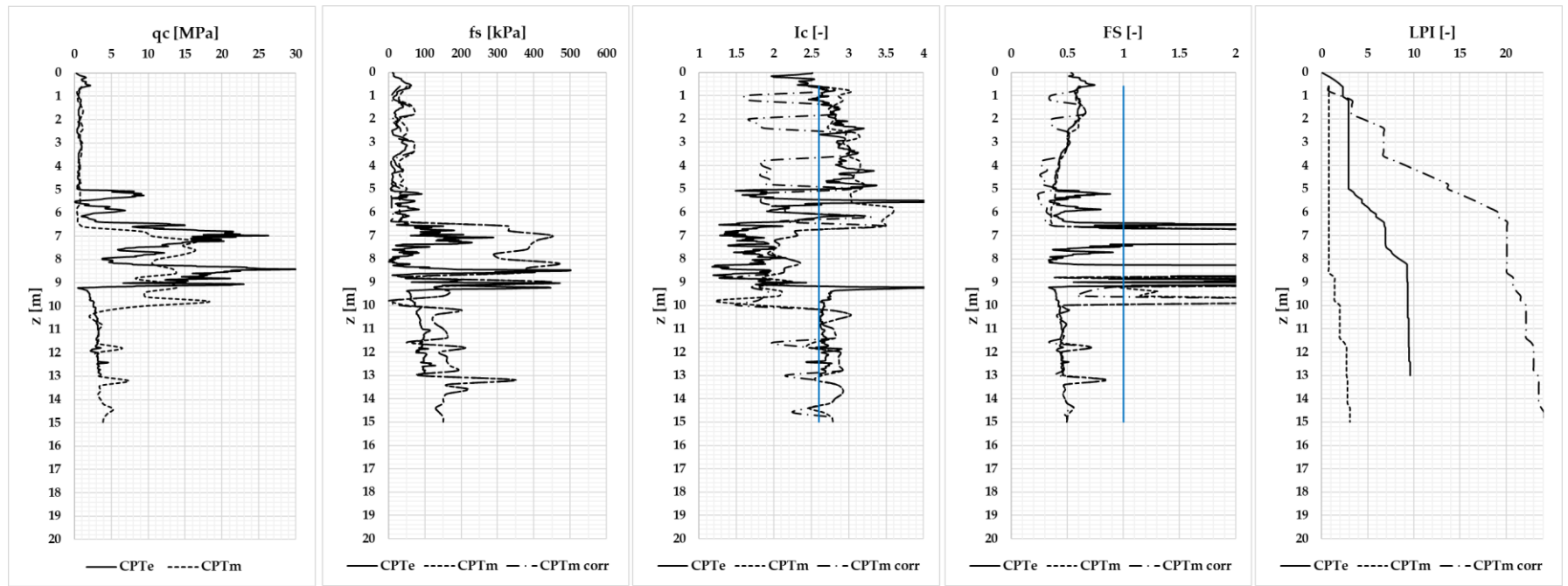


Fig.15d Applicazione del metodo per la coppia di prove 'CPTm (9bis) – CPTu (15)' – Vicchio

Ovviamente per questi confronti non esistono evidenze di fenomeni di liquefazione storicamente documentati. La Tabella 7 invece, riassume in dettaglio l'esito dell'applicazione del metodo (per le coppie CPTm-CPTu individuate nei precedenti comuni) mediante l'impiego di tutti e tre i metodi di valutazione del rischio di liquefazione concordati (Boulangier e Idriss 2014, Robertson e Wride 1998, Juang et al. 2006), in termini di LPI.

Tabella 7. Effetto della correzione sulle CPTm confrontate con le CPTu

Comune	# ID CPT	Falda (m)	a max (g)	Magnitudo	LPI B.I.	LPI B.I. Corr	LPI R.W.	LPI R.W. Corr	LPI J.	LPI J. Corr
Camaione	CPTU (1)	2.070	0.188	5.500	5.006	-	6.929	-	0.741	-
	CPTm (00405)	2.230	0.188	5.500	0.171	11.808	0.644	15.361	0.123	3.756
Coppia 2	CPTU (4)	1.840	0.188	5.500	2.201	-	4.718	-	0.821	-
	CPTm (00634)	1.760	0.188	5.500	0.016	5.025	0.612	4.594	0.002	0.164
Coppia 3	CPTU (7)	1.980	0.188	5.500	0.916	-	3.765	-	0.238	-
	CPTm (00224)	1.900	0.188	5.500	0.000	1.509	0.131	1.698	0.000	0.000
Pontedera	28000599_CPT_6688	3.120	0.190	5.500	0.024	-	0.087	-	0.005	-
	28000599_CPT_6666	3.120	0.190	5.500	0.435	3.029	1.947	5.298	0.000	1.140
Coppia 2	28000599_CPT_6689	3.430	0.190	5.500	0.000	-	0.117	-	0.000	-
	28000599_CPT_9995	3.430	0.190	5.500	0.000	1.629	0.801	2.111	0.000	0.000
Coppia 3	28000599_CPT_6690	2.620	0.190	5.500	0.000	-	0.118	-	0.000	-
	28000599_CPT_6669	2.620	0.190	5.500	0.000	3.463	0.000	5.763	0.000	1.590
Vicchio	CPTU (11)	2.000	0.320	6.370	12.860	-	9.600	-	15.457	-
	CPTm (1)	2.000	0.320	6.370	2.950	15.110	2.430	14.490	3.419	12.386
Coppia 2	CPTU (12)	2.000	0.320	6.370	4.020	-	1.130	-	5.459	-
	CPTm (3)	2.000	0.320	6.370	5.530	8.740	0.290	3.570	7.091	10.583
Coppia 3	CPTU (13)	2.000	0.320	6.370	13.360	-	7.040	-	16.500	-
	CPTm (6)	2.000	0.320	6.370	5.740	10.700	1.230	7.420	8.124	12.571
Coppia 4	CPTU (15)	2.000	0.320	6.370	9.610	-	8.820	-	8.792	-
	CPTm (9bis)	2.000	0.320	6.370	3.070	24.090	2.160	24.680	3.031	20.432

Le Figure 16 e 17 mostrano invece per l'area di studio (comune di Vicchio) i valori di LPI ottenuti con i tre metodi considerati sia nel caso in cui si sia applicata la correzione sia nel caso in cui non sia stata applicata nessuna correzione.

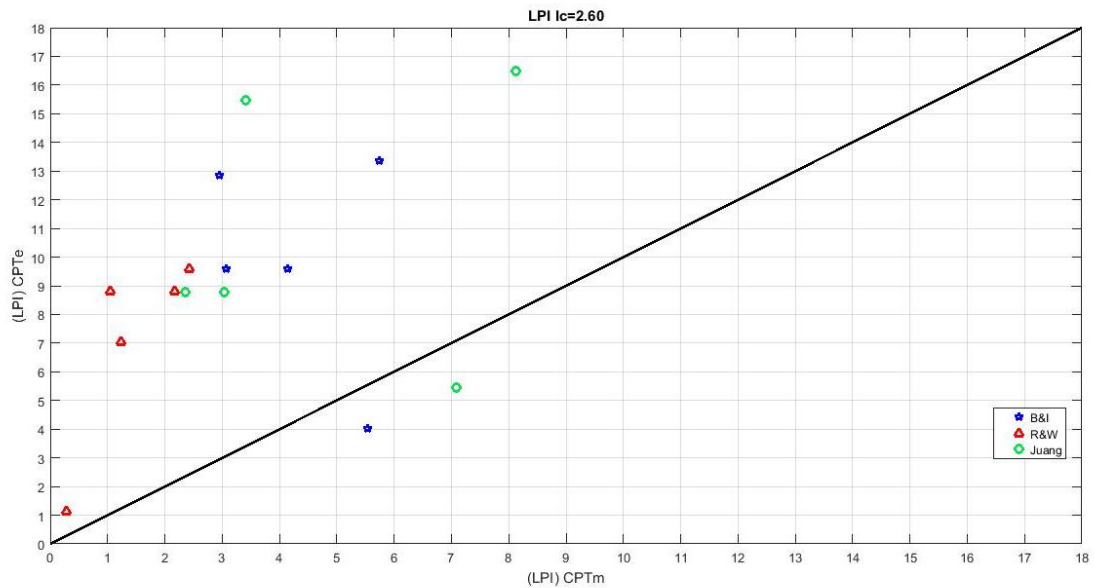


Fig.16 Confronto tra i valori dell'indice LPI ottenuti da CPTu e CPTm (senza correzione) mediante i tre metodi di valutazione del rischio di liquefazione considerati (B&I, R&W, Juang)- Comune di Vicchio

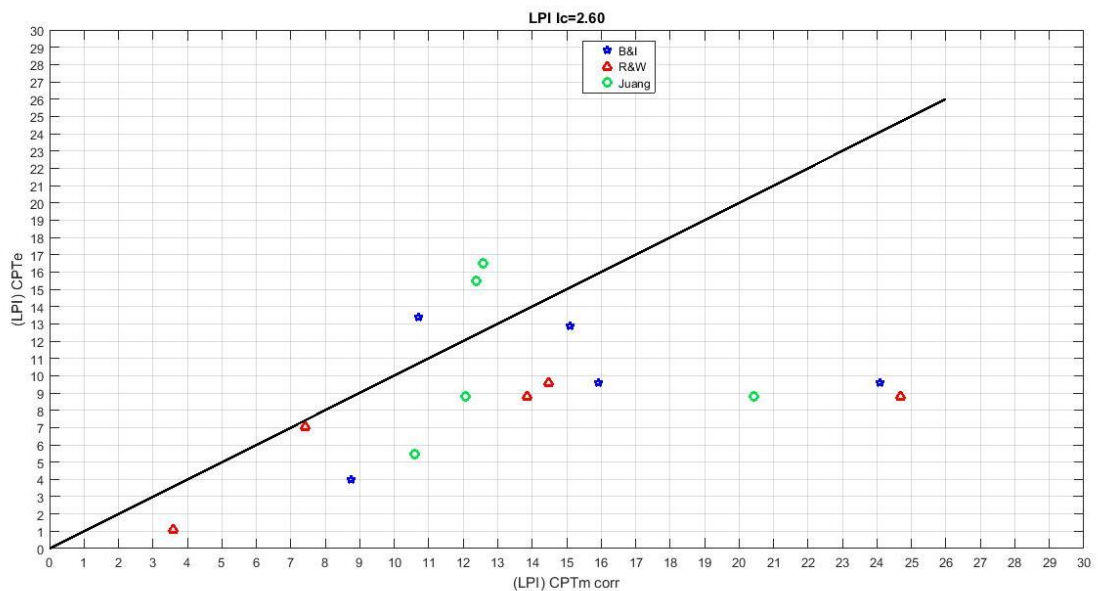


Fig.17 Confronto tra i valori dell'indice LPI ottenuti da CPTu e CPTm (con correzione) mediante i tre metodi di valutazione del rischio di liquefazione considerati (B&I, R&W, Juang)- Comune di Vicchio

5. CONCLUSIONI E FUTURI SVILUPPI

Dal confronto tra gli indici LPI ottenuti mediante CPT elettriche e CPT meccaniche, si evince in genere che:

- il metodo di correzione impiegato sembra portare a stime cautelative (sovrastime) dell'indice LPI rispetto ai valori ricavati dall'elaborazione delle prove CPTu;
- tali stime cautelative non portano comunque a significative discordanze tra CPT elettriche e meccaniche ai fini della definizione della classe di rischio di appartenenza. Questa considerazione e quella precedente si applica al confronto di coppie di prove meccaniche/elettriche;
- tra i tre metodi di valutazione del rischio di liquefazione concordati, quello proposto da Boulanger e Idriss (2014) e quello definito da Robertson e Wride (1998) portano a risultati molto simili tra loro, mentre quello suggerito da Juang (2006) porta a stime dell'LPI meno cautelative rispetto a quelli appena menzionati (tuttavia risultano essere stime più vicine a quelle ottenute mediante CPT elettrica, laddove sono disponibili coppie per il confronto).

I risultati ottenuti dall'elaborazione, mediante l'utilizzo dei tre metodi (Boulanger e Idriss 2014, Robertson e Wride 1998, Juang et al. 2006) e successivamente corretti, delle prove facenti parte della banca dati riguardante l'area di studio, suddivise per macroaree, dimostrano che (si vedano le Tabelle 8, 9 e 10; i diagrammi a torta delle Figure 18, 20 e 22; gli istogrammi delle Figure 19, 21 e 23 ed i confronti delle Figure 24 e 25):

- per la macroarea della Versilia, dove la maggior parte di prove si dispongono su intervalli di profondità 5-8m per il 31% e 8-10 m per il 24%, e solo l'1% supera i 20 m, i tre metodi non corretti sono concordi nel riconoscere per la maggior parte delle prove un rischio nullo o basso³. Solo il 6% (I.B. e J.) e il 4% (R.W.) ricade nell'alto rischio liquefazione. A seguito della correzione, i metodi di I.&B. e R.&W. continuano a rilevare soltanto un 3% a rischio nullo mentre il 34% (I.B.) e 32% (R.W) ricade nel rischio alto e ben il 29 % (I.B) e il 32% (R.W) nell'intervallo di

³ Classificazione in base al valore dell'indice LPI secondo *Iwasaki et al. (1978)*

- rischio molto alto. Al contrario dei metodi precedenti quello di Juang corretto continua a sottostimare il rischio liquefazione riscontrando ancora un 31% di prove con rischio nullo, il 21% a rischio alto e solo un 3% a rischio molto alto;
- per la macroarea della piana di Lucca, dove il 40% delle prove si colloca nell'intervallo di profondità 5-8m, il 24% in 8-10m e nessuna supera i 20m, i tre metodi non corretti concordano nel collocare tutte le prove negli intervalli di rischio nulli o bassi. Risultati ben diversi si ottengono dopo aver applicato la correzione. Solamente il 32% delle prove rimane nell'intervallo di basso rischio (I.B. e R.W.) mentre il 37% (I.B.) e il 29% (R.W.) ricade nell'intervallo alto e ben il 25% (I.B.) e 35% (R.W.) si dispongono nell'intervallo di rischio molto alto. Situazione completamente differente quando si analizza il metodo di Juang che continua a sottostimare il rischio liquefazione, per cui il 34% rimane a rischio basso, il 18% a rischio medio e solo 1% rientra nell'alto rischio liquefazione;
 - per la macroarea della piana di Pisa, dove il 49% delle prove ricade nell'intervallo di profondità 8-10m, il 17% in quello 10-15 m e solo un 6% delle prove presentano una profondità maggiore di 20m, i tre metodi non corretti collocano la maggior parte delle prove negli intervalli di rischio liquefazione nullo o basso. Solo l'1% ricade nell'alto rischio liquefazione. Dopo aver applicato la correzione, solo il 27% (I.B.) e il 20% (R.W.) delle prove continua a rientrare nell'intervallo di basso rischio. Al contrario, il 37% (I.B.) e il 32% (R.W.) si collocano nell'intervallo di alto rischio e ben il 34% (I.B.) e il 46% (R.W.) ricadono nel rischio molto alto di liquefazione. Anche in questo caso il metodo di Juang sottostima il rischio liquefazione rispetto agli altri due metodi riconoscendo solo il 5% di prove a rischio molto alto, il 28% a rischio alto mentre il 54% continua a rimanere nell'intervallo di basso rischio liquefazione.

Tabella 8. Classi di rischio per la Macroarea: Versilia

MACROAREA: VERSILIA						
LPI Iwasaki	B.I.	B.I. Corr	R.W.	R.W. Corr	J.	J. Corr
LPI=0	191	23	172	25	313	239
0<LPI≤5	542	270	574	258	425	349
5<LPI≤15	48	263	34	251	43	167
LPI>15	1	226	2	248	1	27

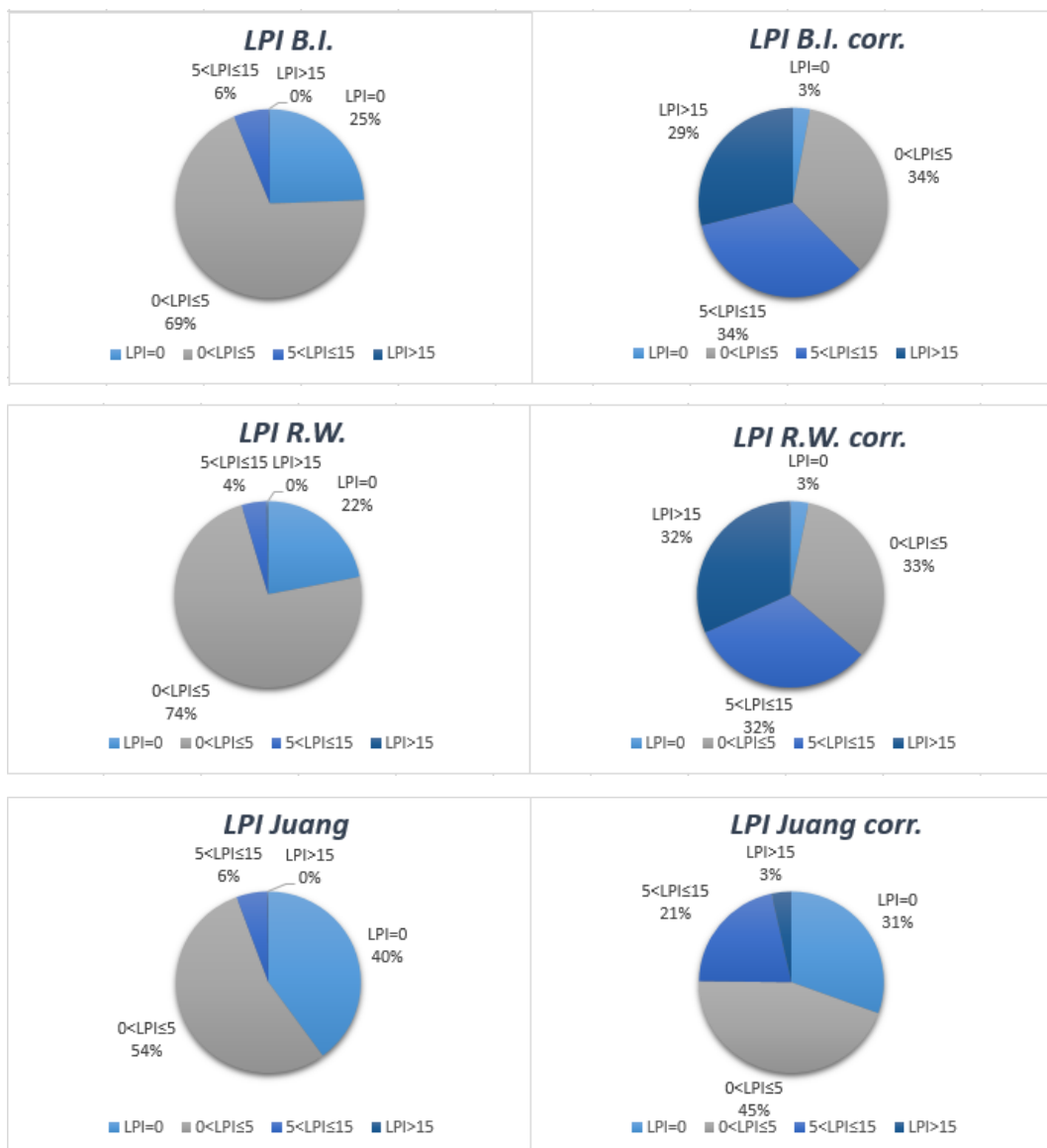


Fig. 18. Diagrammi a torta delle Classi di Rischio per la Macroarea: Versilia

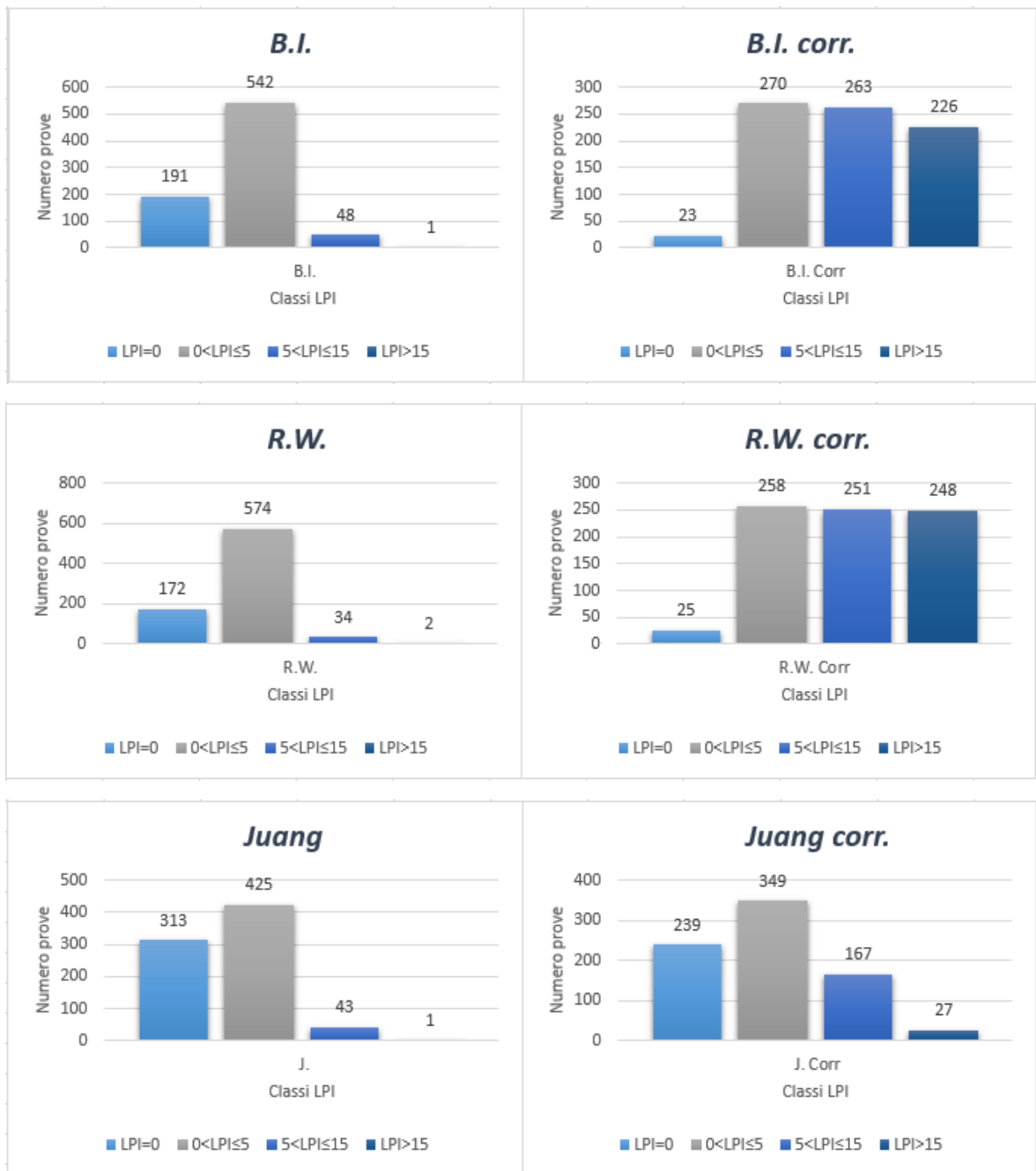


Fig. 19 Istogrammi delle Classi di Rischio per la Macroarea: Versilia

Tabella 9. Classi di rischio per la Macroarea: Piana di Lucca

MACROAREA: PIANA DI LUCCA						
LPI Iwasaki	B.I.	B.I. Corr	R.W.	R.W. Corr	J.	J. Corr
LPI=0	53	16	41	11	164	131
0<LPI≤5	224	89	236	88	113	95
5<LPI≤15	1	104	1	80	1	51
LPI>15	0	69	0	99	0	1

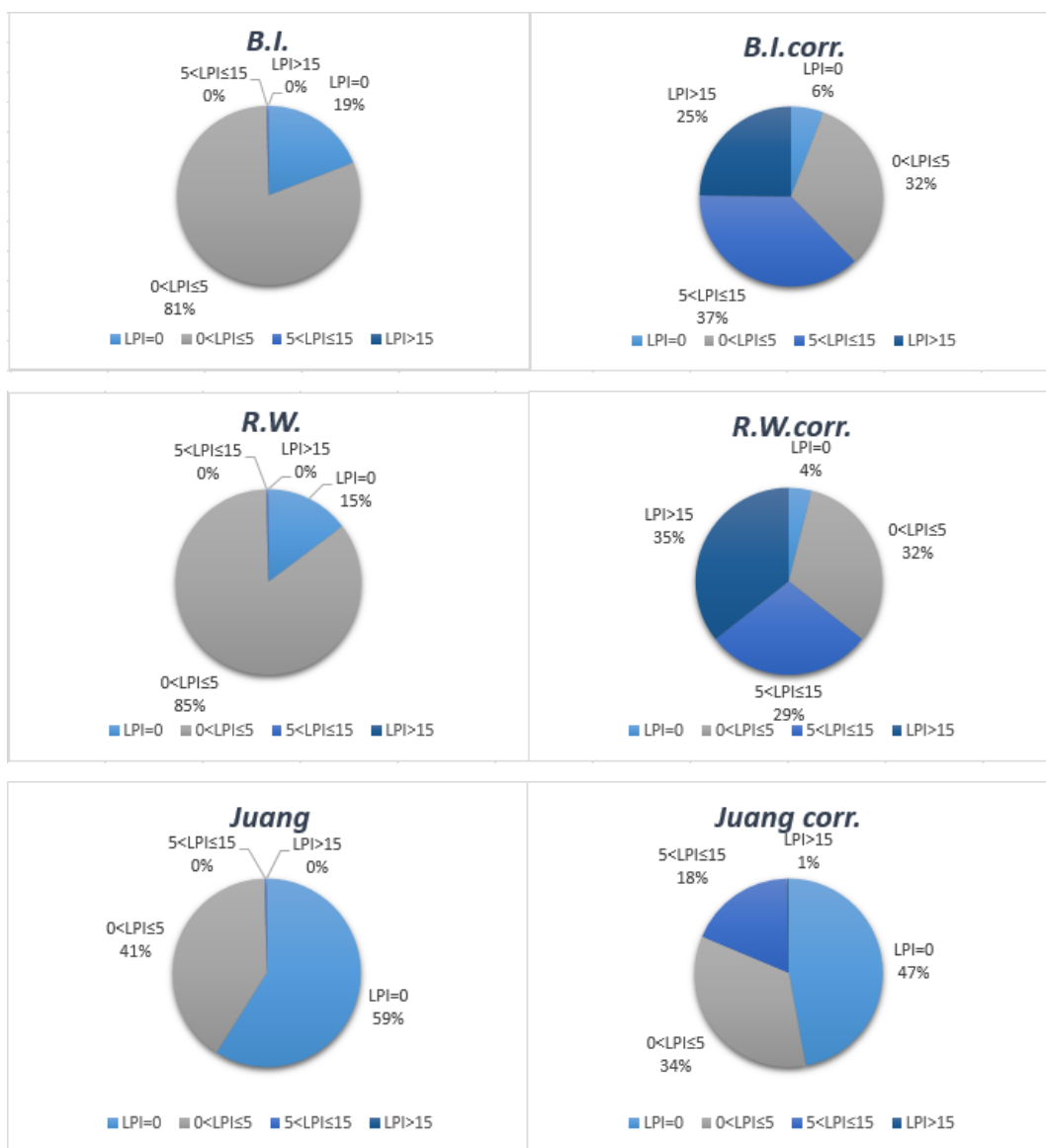


Fig. 20. Diagrammi a torta delle Classi di Rischio per la Macroarea: Piana di Lucca

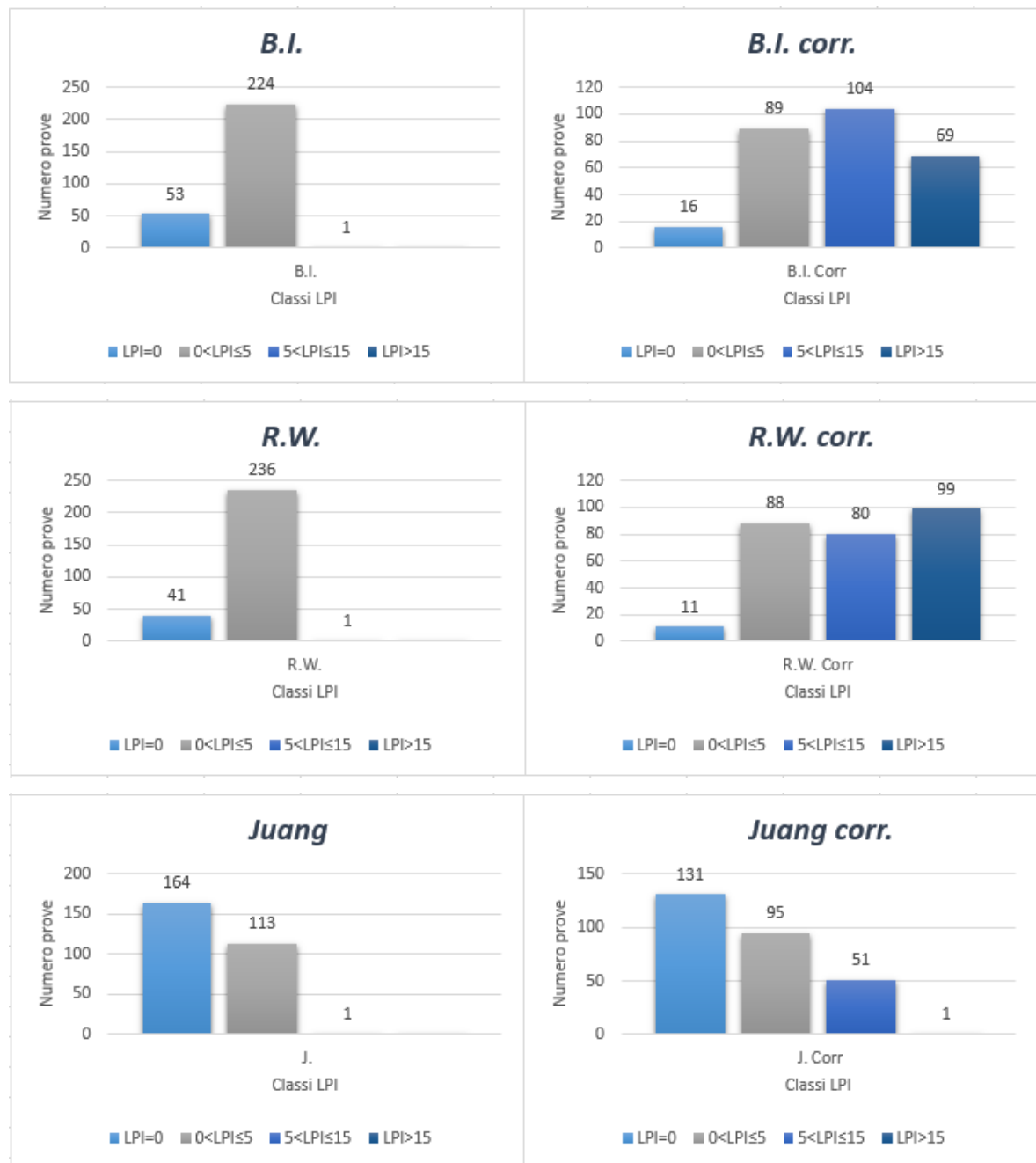


Fig. 21 Istogrammi delle Classi di Rischio per la Macroarea: Piana di Lucca

Tabella 10. Classi di rischio per la Macroarea: Piana di Pisa

MACROAREA: PIANA DI PISA						
LPI _{Iwasaki}	B.I.	B.I. Corr	R.W.	R.W. Corr	J.	J. Corr
LPI=0	1330	73	1007	57	1618	453
0<LPI≤5	2083	920	2389	701	1803	1856
5<LPI≤15	32	1277	35	1122	24	963
LPI>15	11	1186	25	1576	11	184

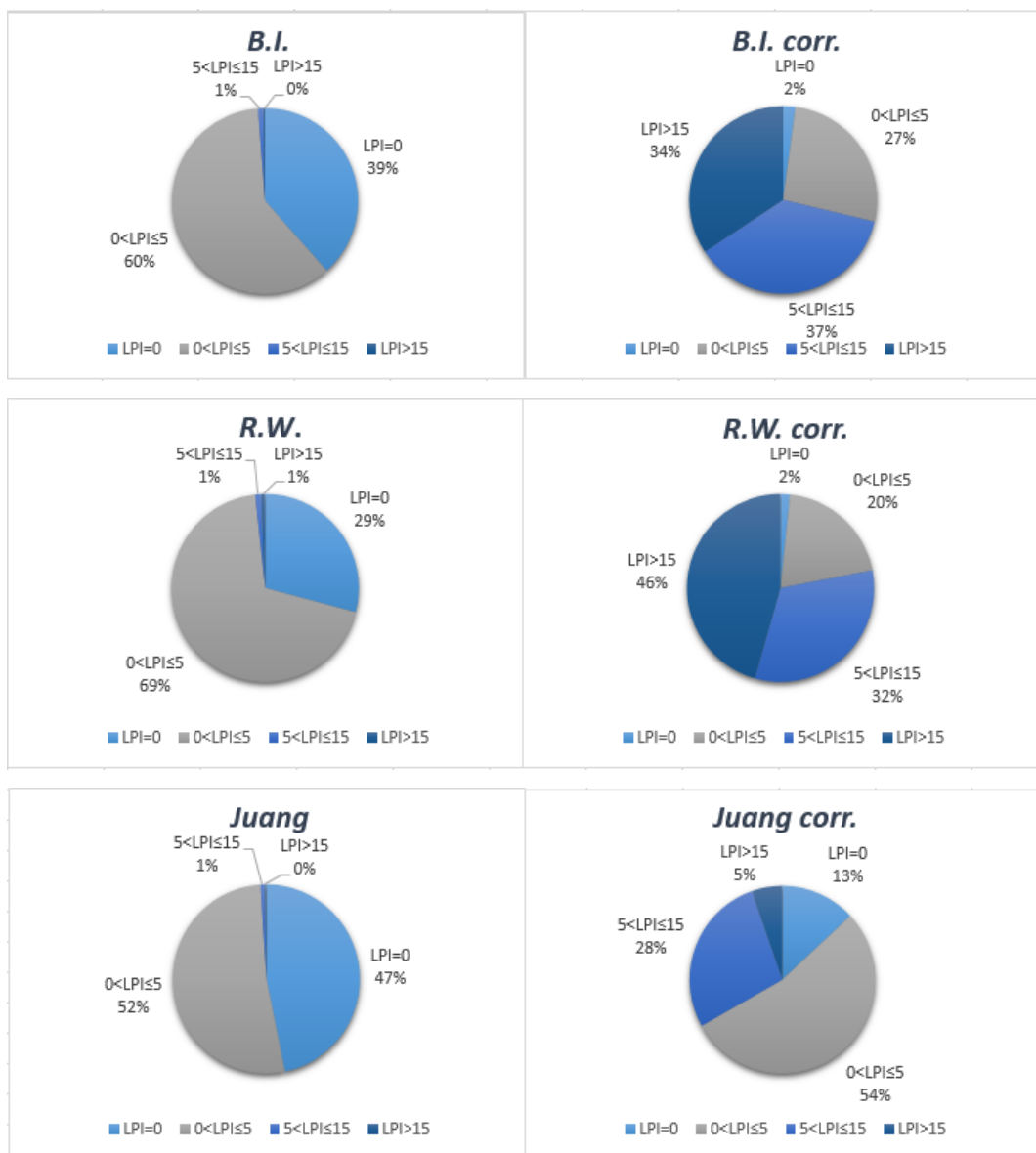


Fig. 22. Diagrammi a torta delle Classi di Rischio per la Macroarea: Piana di Pisa

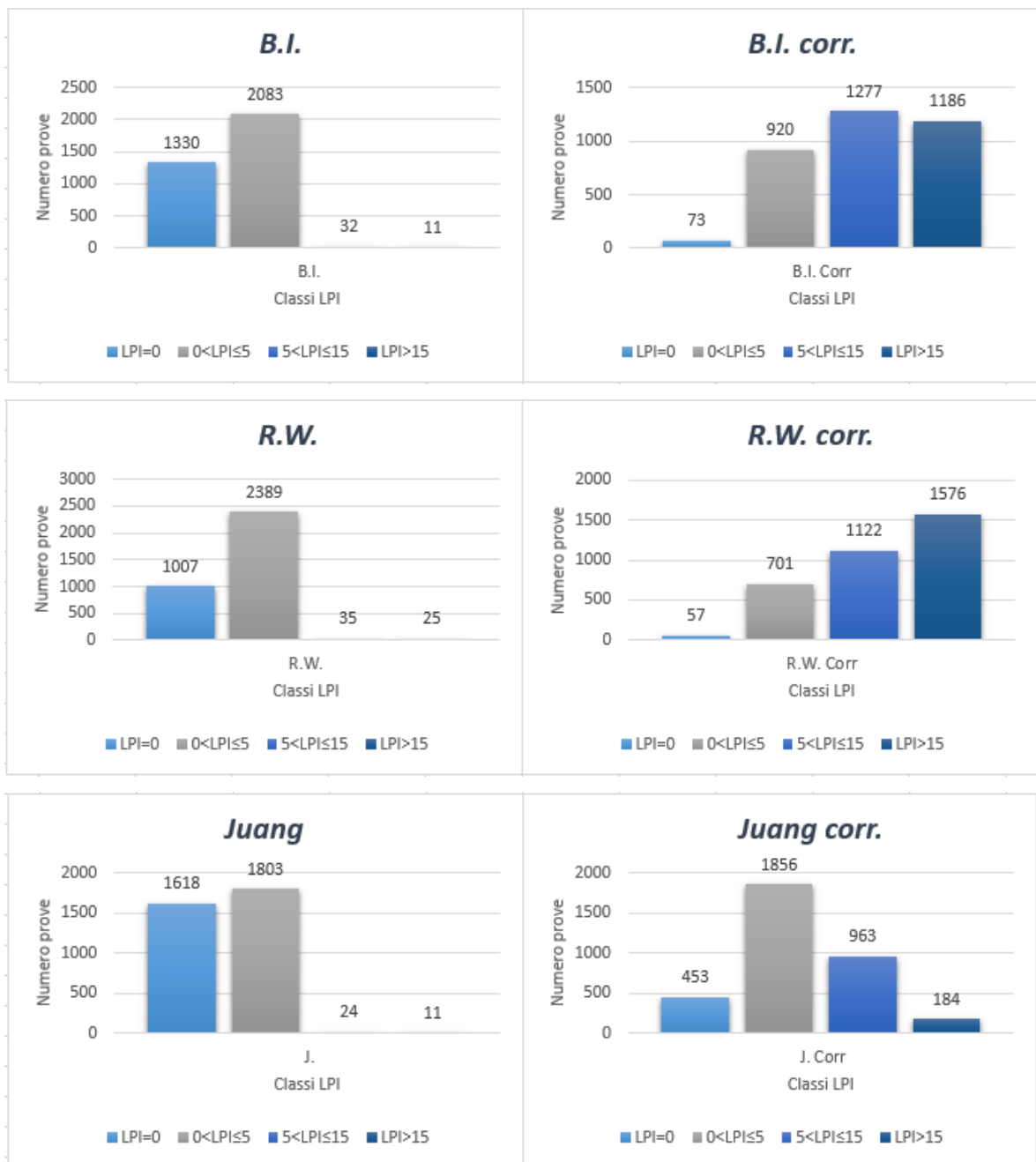
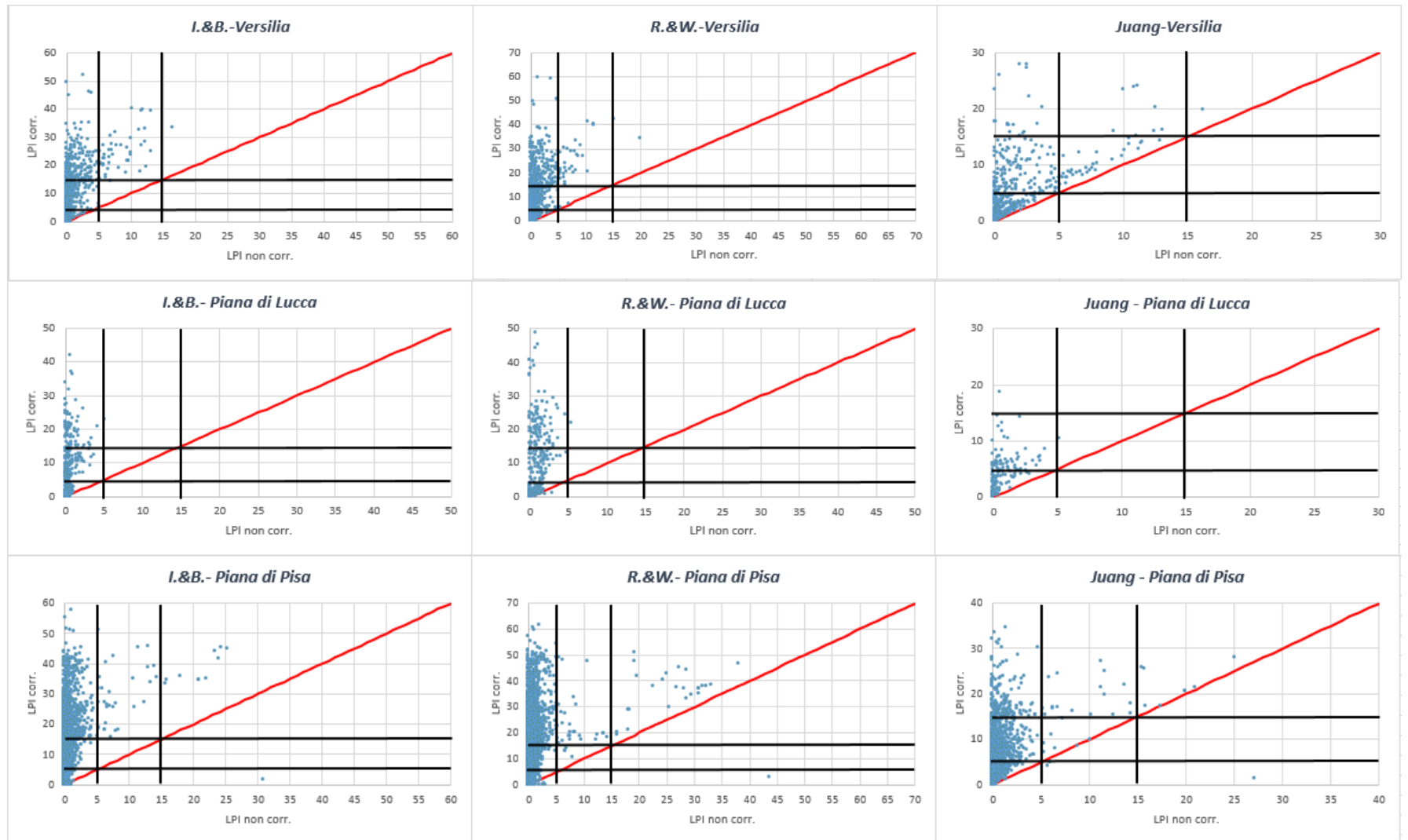


Fig. 23 Istogrammi delle Classi di Rischio per la Macroarea: Piana di Pisa



+ Fig. 24 LPI corretto in funzione dell'LPI non corretto per ciascuna macroarea e ciascun metodo

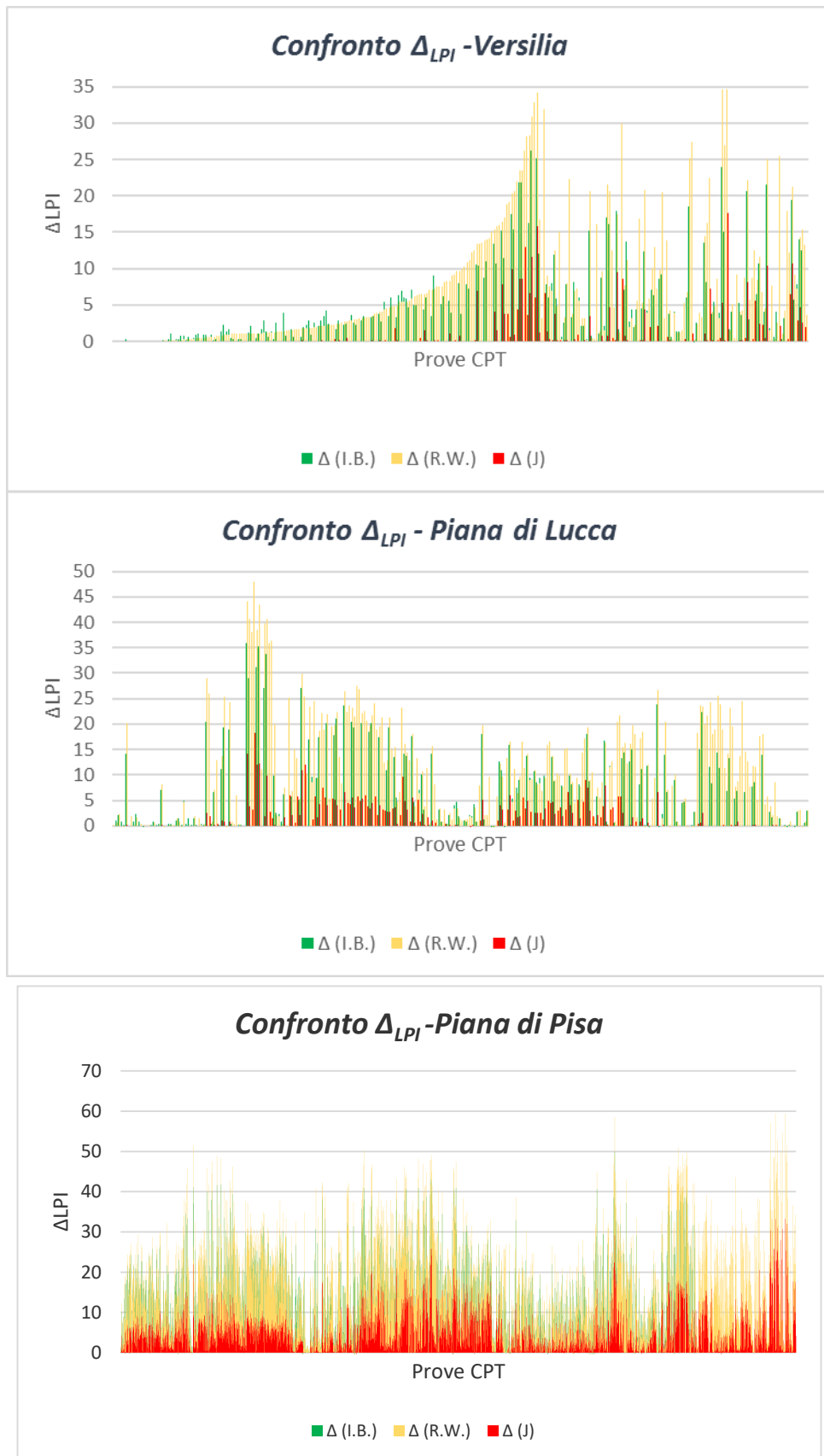


Fig.25 Istogrammi rappresentanti la differenza tra il valore corretto e non corretto dell'indice LPI.

In pratica, a conclusione dell'attività svolta, si forniscono le seguenti raccomandazioni:

- la correzione proposta, se applicata ai metodi I&B o R&W per l'analisi delle CPTm, conduce ad un incremento significativo dei valori di LPI e quindi della classe di rischio, evidenziando un rischio alto o molto alto in gran parte del territorio considerato. Tutto ciò appare in contrasto con le evidenze storiche che non hanno mai segnalato fenomeni particolarmente gravosi di liquefazione in Toscana;
- l'applicazione della correzione al metodo di Juang conduce invece ad un incremento più contenuto dei valori di LPI e della classe di rischio. Si raccomanda pertanto di applicare tale correzione nell'interpretazione delle prove CPTm;
- la correzione può essere applicata utilizzando il programma CPT PaGE scaricabile dal link (<http://www2.ing.unipi.it/geotecnica/08%20software.htm>);
- le mappe con l'ubicazione di tutte le prove e i risultati puntuali delle analisi possono essere scaricati dal link (<http://www.regione.toscana.it/speciali/rischio-sismico>);
- in ogni caso si raccomanda di procedere all'analisi del rischio di liquefazione utilizzando prove CPT elettriche o con piezocono spinte sino alla profondità di almeno 20 m.

Per quanto riguarda i possibili futuri sviluppi appare necessario procedere all'esecuzione di coppie di prove CPTm/CPTu al fine di poter meglio calibrare la correzione proposta. Inoltre, per i terreni stratificati sarebbe opportuno valutare i benefici che potrebbero derivare dall'impiego di un mini-piezocono. L'Università di Pisa ha acquisito la disponibilità della Pagani Geotechnical Equipment (PC – Italia) ad utilizzare il loro mini – piezocono. Nell'ambito di un progetto ambizioso si potrebbe valutare la possibilità di realizzare modelli di terreno stratificato all'interno della Camera di Calibrazione (CC) della Pagani. Si tratta di un modello di grosse dimensioni 1.5x1.5x1.5 m dove potrebbero eseguirsi sia le prove con la punta standard sia quelle con il mini – cono.

5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Boulanger, R. W., and Idriss, I. M. (2014). CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. *Report No. UCD/CGM-14/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, 134 pp*

Iwasaki, T, Tatsuoka, F., Tokida, K, and Yasuda, S. A Practical Method for Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies at Various Sites in Japan. *2nd International Conference on Microzonation for Safer Construction Research and Application*, pp. 885-896, 1978.

Juang C.H., Fang S.Y., Khor E.H., *First-Order reliability method for probabilistic liquefaction triggering analysis using CPT*, «Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering», 132, 3, 2006, pp.337-350

GdL MS, 2008. *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*. Conferenza delle regioni e delle Province autonome-Dipartimento della protezione civile, Roma, 3 vol.

Lo Presti D., Francesconi M., Persichillo G. e Meisina C. (2017) Assessment of the liquefaction susceptibility by means of different damage severity indices: A case study of 2012 Emilia Romagna earthquake 5th International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation (5th GEDMAR)

Lo Presti D. and Sassu M., Luzzi L. and Pacor F., Castaldini D. and Tosatti G., Meisina C., Zizioli D. and Zucca F., Rossi G., Saccorotti G. and Piccinini D. A report on the 2012 seismic sequence in Emilia (Northern Italy)”. *7th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 29 April – 4 May, 2013, Chicago, 2013.

Meisina C., Persichillo G., Francesconi M. Creatini M. e Lo Presti D. (2017) Differences between mechanical and electrical cone penetration test in the liquefaction hazard assessment and soil profile reconstruction International Conference of Civil Engineering, 2017-ICCE, 12-14 October 2017, Polytechnic University of Tirana, Albania

Robertson P.K. Soil Classification Using the Cone Penetration Test. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 27, p. 151-158, 1990.

Robertson P.K. and Wride C.E. (1998). Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using the Cone Penetration Test, *Canadian Geotechnical Journal*, 35: 442-459.

Schmertmann J.H. (1978). *Guidelines for Cone Penetration Test. Performance and Design*, U.S. Department of Transportation, Washington.

Prof. Diego C. F. Lo Presti (Responsabile Scientifico)



Prof. Leonardo Tognotti (Direttore del Dipartimento)



Pisa, 05 Novembre 2018