



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE  
**DICEA**  
DIPARTIMENTO  
DI INGEGNERIA CIVILE  
E AMBIENTALE

# Gli effetti di liquefazione osservati e i metodi di valutazione del rischio

Giovanni Vannucchi

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale  
Università degli Studi di Firenze

Bologna, 21 maggio 2013



**Effetto SISMA 2012**



## Sommario:

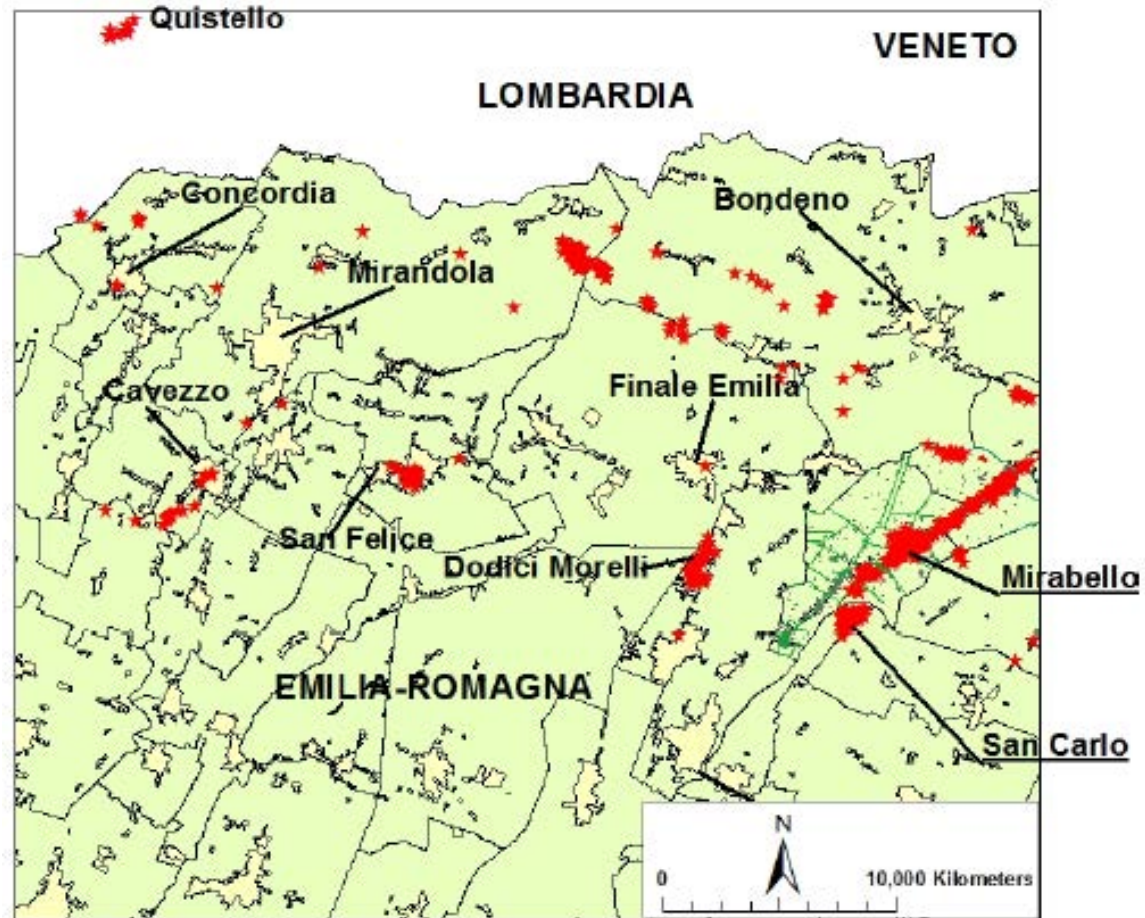
1. Che cosa è successo
2. Che cosa è la liquefazione
3. Quando si verifica la liquefazione
4. Metodi di valutazione del rischio di liquefazione



1. Che cosa è successo

Il terremoto che ha colpito la pianura padana-emiliana il 20 maggio 2012 ha prodotto diffusi ed estesi fenomeni di liquefazione

Localizzazione  
dei casi di  
liquefazione  
osservati



1. Che cosa è  
successo

## Manifestazioni di liquefazione osservate in Emilia

### Crateri e vulcanelli







1. Che cosa è  
successo

Manifestazioni di liquefazione osservate in Emilia



Fuoriuscite di acqua e sabbia





1. Che cosa è  
successo

## Manifestazioni di liquefazione osservate in Emilia



Crepe, rotture nel terreno e dislocazioni





1. Che cosa è  
successo

## Manifestazioni di liquefazione osservate in Emilia



### Abbassamenti e sollevamenti del terreno







UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE  
**DICEA**  
DIPARTIMENTO  
DI INGEGNERIA CIVILE  
E AMBIENTALE

Giovanni Vannucchi - Gli effetti di liquefazione osservati e i metodi di valutazione del rischio

1. Che cosa è  
successo

## Manifestazioni di liquefazione osservate in Emilia

### Movimenti orizzontali (lateral spreading)



Effetto SISMA 2012 – Suolo e Strutture Bologna, 21 maggio 2013

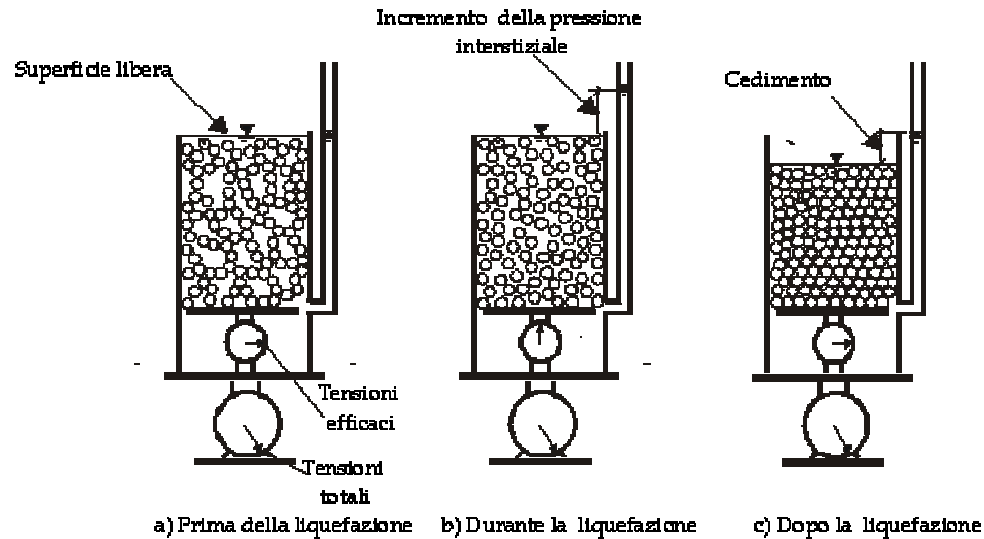


2. Che cosa è la liquefazione

Definizioni:

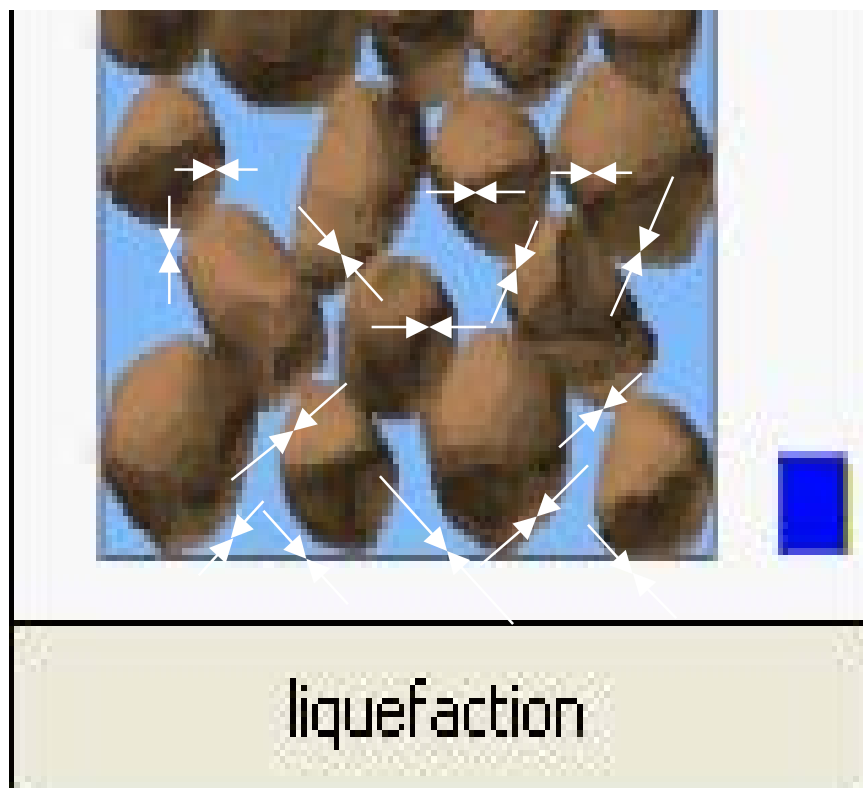
Liquefazione è lo stato fisico in cui si può venire a trovare un terreno sabbioso saturo allorquando perde la sua resistenza al taglio per effetto dell'incremento e dell'accumulo delle pressioni interstiziali.

Con il termine liquefazione si indicano differenti fenomeni fisici (liquefazione ciclica, mobilità ciclica, fluidificazione) osservati nei materiali granulari poco addensati saturi durante l'applicazione rapida di carichi dinamici e ciclici in condizioni non drenate.





## 2. Che cosa è la liquefazione



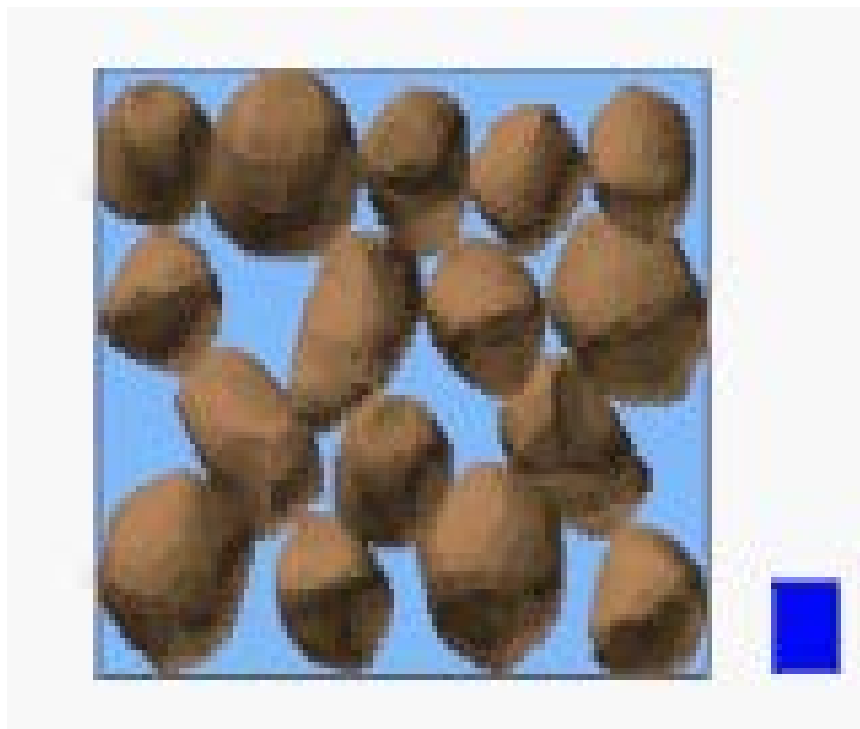
Un terreno granulare saturo è costituito da un insieme di grani a contatto immersi in acqua.

Il peso efficace delle particelle produce degli sforzi che si trasmettono nei punti di contatto conferendo resistenza al taglio.

La resistenza è di tipo frizionale ed è espressa dalla legge di Mohr-Coulomb

$$\tau_f = \sigma' \cdot \tan \phi' = (\sigma - u) \cdot \tan \phi'$$

## 2. Che cosa è la liquefazione



Durante lo scuotimento ciclico si realizzano condizioni non drenate.

L'acqua rimane intrappolata e si ha un incremento delle pressioni interstiziali  $\bullet u$  che provoca un decremento della resistenza al taglio.

Quando la resistenza al taglio si annulla il terreno si comporta come un fluido

La resistenza al taglio si annulla quando:

$r_u$  = rapporto di sovra-pressione interstiziale

$$r_u = \frac{\Delta u}{\sigma_0} = 1$$





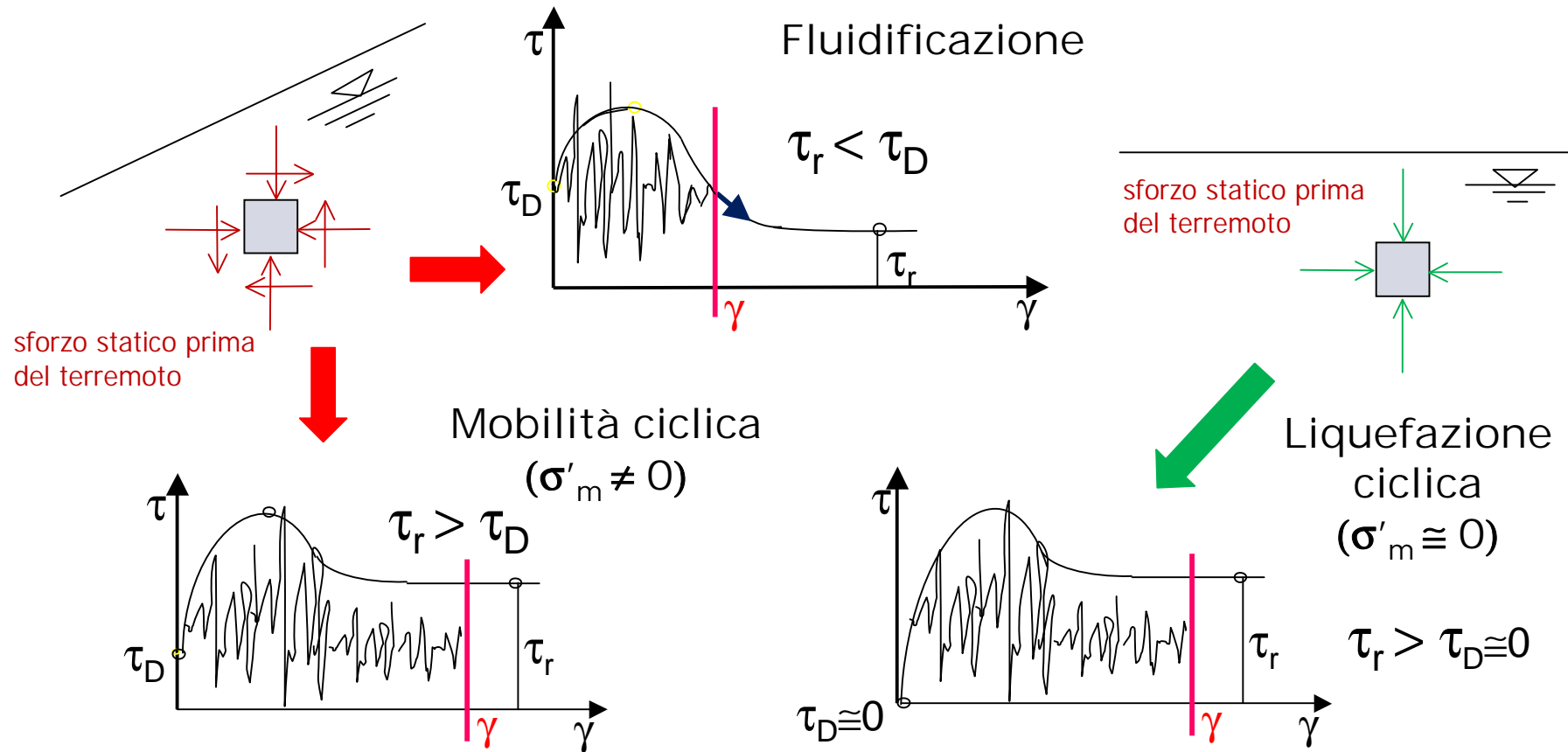
2. Che cosa è la liquefazione

Fenomeni inclusi nel termine liquefazione:

$\tau_D$  = sforzo di taglio statico prima del terremoto

$\tau_r$  = resistenza al taglio non drenata residua

$\sigma'_m$  = tensione efficace media





## Fenomeni inclusi nel termine liquefazione:

### Liquefazione ciclica

Condizioni: Assenza di sforzi di taglio necessari per l'equilibrio statico (superfici piane e orizzontali, assenza di carichi in superficie)

Manifestazioni: crateri e vulcanelli di sabbia, fratture, ondulazioni e cedimenti del piano campagna

Danneggiamenti: assenti (vulnerabilità ed esposizione nulle o trascurabili)

Per il terremoto della pianura padana-emiliana: fenomeni di liquefazione ciclica diffusissimi e molto estesi

### Mobilità ciclica

Condizioni: Sforzi di taglio necessari per l'equilibrio statico **inferiori** alla resistenza al taglio dopo il terremoto

Manifestazioni: deformazioni permanenti limitate, spostamenti laterali, cedimenti assoluti e differenziali, smottamenti

Danneggiamenti: da modesti a gravi a strutture, infrastrutture e sotto-servizi

Per il terremoto della pianura padana-emiliana: fenomeni di mobilità ciclica diffusi

### Fluidificazione

Condizioni: Sforzi di taglio necessari per l'equilibrio statico **superiori** alla resistenza al taglio dopo il terremoto

Manifestazioni: grandi deformazioni permanenti, collassi di fondazioni e opere di sostegno, frane

Danneggiamenti: gravissimi

Per il terremoto della pianura padana-emiliana: fenomeni di fluidificazione assenti (per fortuna!!!)



### 3. Quando si verifica

La liquefazione generalmente avviene quando sono **verificate simultaneamente** le condizioni predisponenti e scatenanti

#### Condizioni del terreno (fattori predisponenti)

- Depositi sabbiosi ( $0.02 \text{ mm} < D_{50} < 2 \text{ mm}$ ,  $CF < 15\%$ ),  
sedimentari recenti (olocene, pleistocene),  
sciolti ( $D_R < 60\%$ ),  
saturi sotto falda ( $Z_w < 5 \text{ m}$  da p.c.).

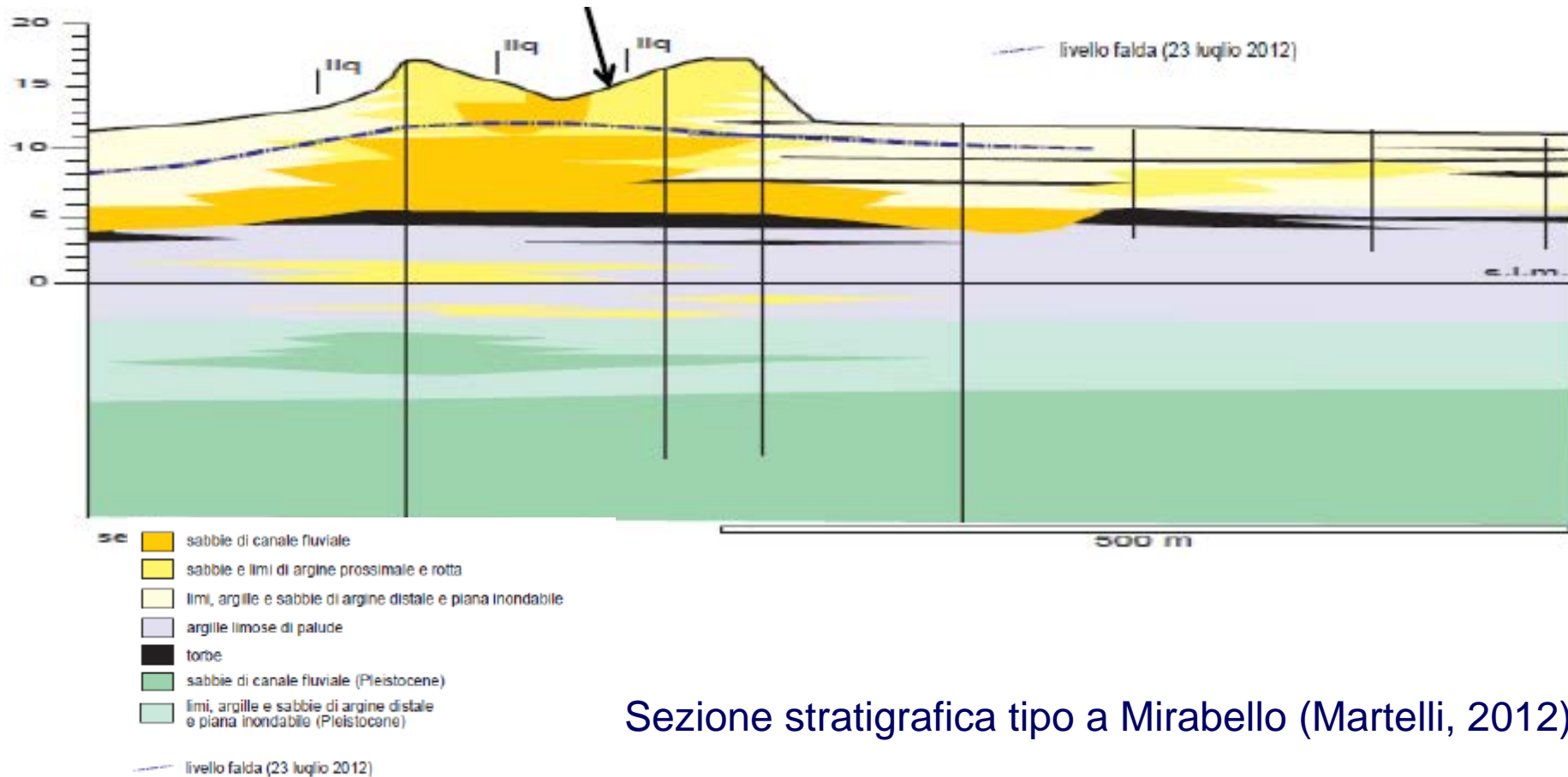
Nella pianura padana-emiliana le condizioni predisponenti si verificano tutte





3. Quando si verifica

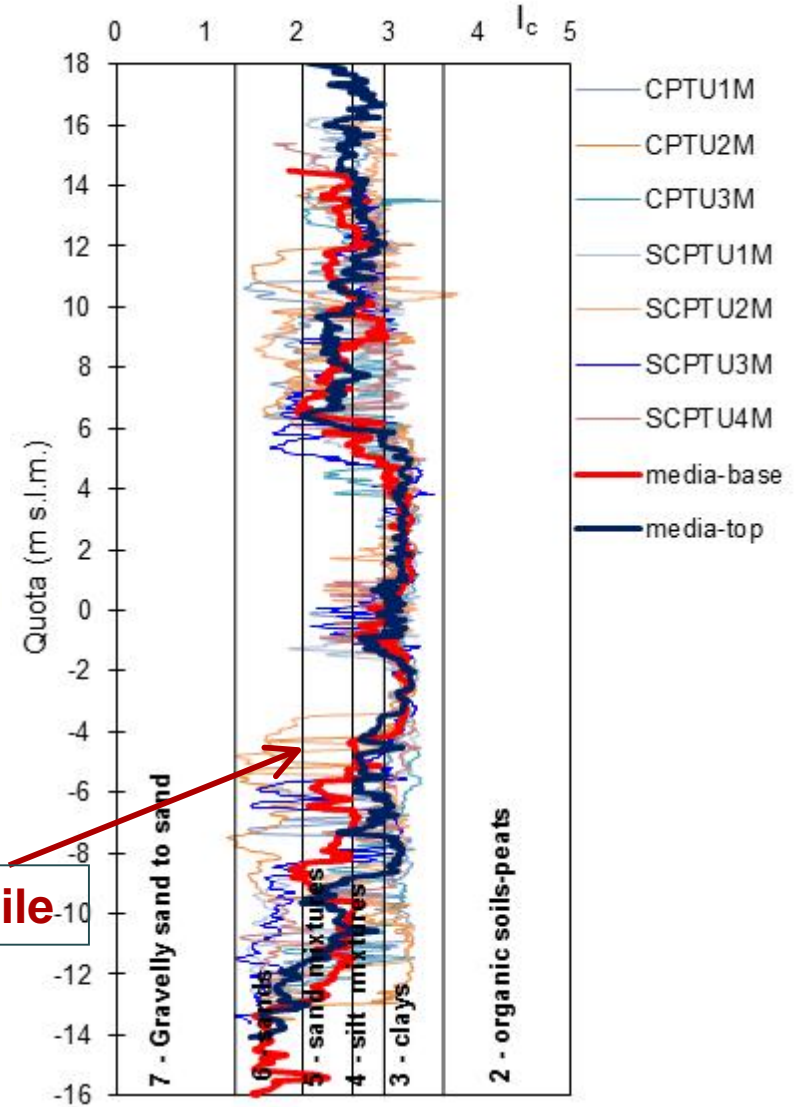
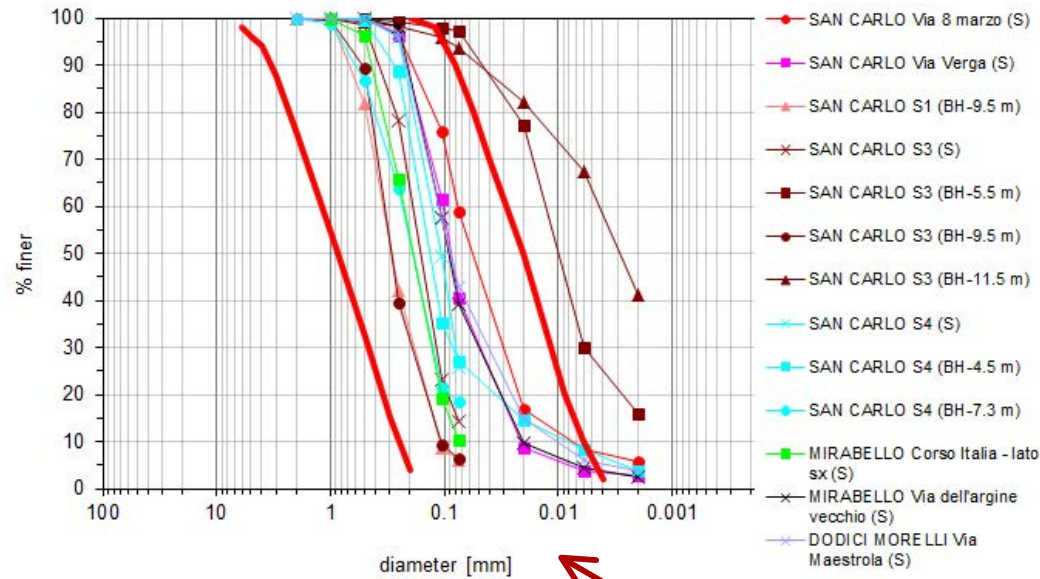
Fattori predisponenti la liquefazione nella pianura padana-emiliana



Sezione stratigrafica tipo a Mirabello (Martelli, 2012)



3. Quando si verifica



**Liquefacibile**

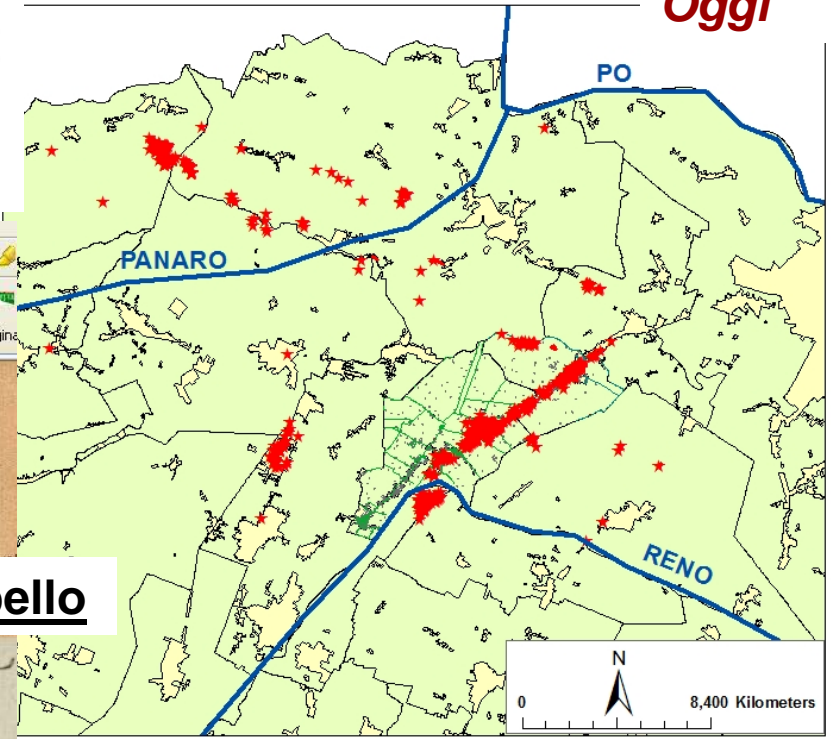
Fattori predisponenti la liquefazione  
nella pianura padana-emiliana



## Fattori predisponenti la liquefazione nella pianura padana-emiliana

### 3. Quando si verifica

**Oggi**



[442] 1570. Settembre 17.

Ferrara.

Fra gli effetti prodotti da questo terremoto devono notare i rombi sotterranei, i bagliori repentini nell'atmosfera, il gonfiamento improvviso delle acque del Po, certe elevazioni ed avallamenti del suolo fuori Porta S. Pietro e S. Paolo, alla torre della Fossa ed altrove nei Polesini di S. Giorgio e di S. Giovanni Battista, ove avvennero pure emissioni violente di acqua nerastra e di arena.



**PANARO**

**RENO**

territorio di Bologna

vanni Antonio, 1555-1617

gnagna Agli Illmi. SSR. proni colmi. li SSR. Senatori di Bologna ; Hauendo io migliorato aBai il discano del contando di Bologna non solo et accrescendolo di molti luoghi mancati ma anco riducendolo in miglior positura et continuatione cotilli stati uicini di modo di questa citta et de tutti i studiosi darifuori in maggior forma et dedicarlo alle SS. VV. Illme. a quali sono tanto Bolog. li 10 Genario. 1599 DVV. SS. Illme. DiuetiGo. Serre. Gio Ant. Magini

**Mirabello**



**1599**

La liquefazione tende a riprodursi  
ove si è già verificata in passato



## Fattori scatenanti la liquefazione nella pianura padana-emiliana

### Azione sismica (fattori scatenanti)

Evento del 20/05/12  
ore 02:03:53

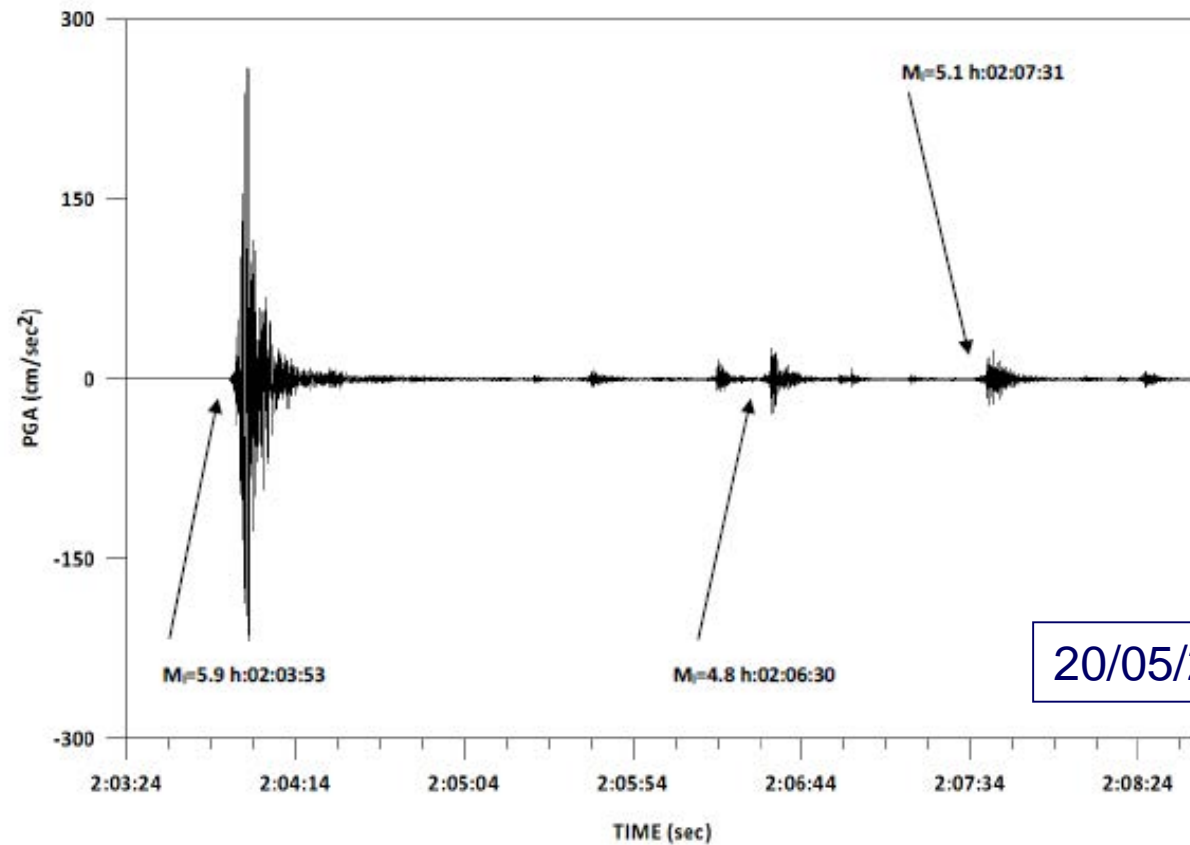
1) Magnitudo	$M > 5.5$	$M = 5.9$
2) Accelerazione orizz. max.	$PGA > 0.15g$	$PGA = 0.264g$ (a Mirandola)
3) Durata	$d > 15-20 \text{ sec}$	$d = 8.1 \text{ sec}$

Il fattore durata non è verificato, ma . . . .



3. Quando si verifica

Fattori scatenanti la liquefazione nella pianura padana-emiliana  
aftershocks di intensità poco inferiore alla scossa principale, e molto ravvicinati



20/05/2012



#### 4. Come si stima il rischio

Il Rischio di liquefazione può essere valutato ricorrendo a tre categorie di metodi, in ordine di risorse impegnate crescenti:

- Metodi empirici (qualitativi o semi-quantitativi)
- **Metodi semplificati** (ingegneristici, quantitativi)
- Metodi dinamici (avanzati)

La scelta del metodo dipende dalle finalità dell'indagine (microzonazione sismica o progettazione) e dal livello di dettaglio che è richiesto





## Metodi semplificati di stima del rischio di liquefazione

Analisi 1-D, condizioni free field (liquefazione ciclica)

Stima del fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione (FSL) al variare della profondità (z):

$$FSL(z) = \frac{CRR(z)}{CSR(z)}$$

CRR (z) = resistenza normalizzata del terreno alla liquefazione a profondità z  
(**Cyclic Resistance Ratio**)

CSR (z) = tensione ciclica normalizzata indotta dal terremoto a profondità z  
(**Cyclic Stress Ratio**)

Il calcolo di FSL è limitato agli strati potenzialmente liquefacibili

$$z < 20 \text{ m,}$$

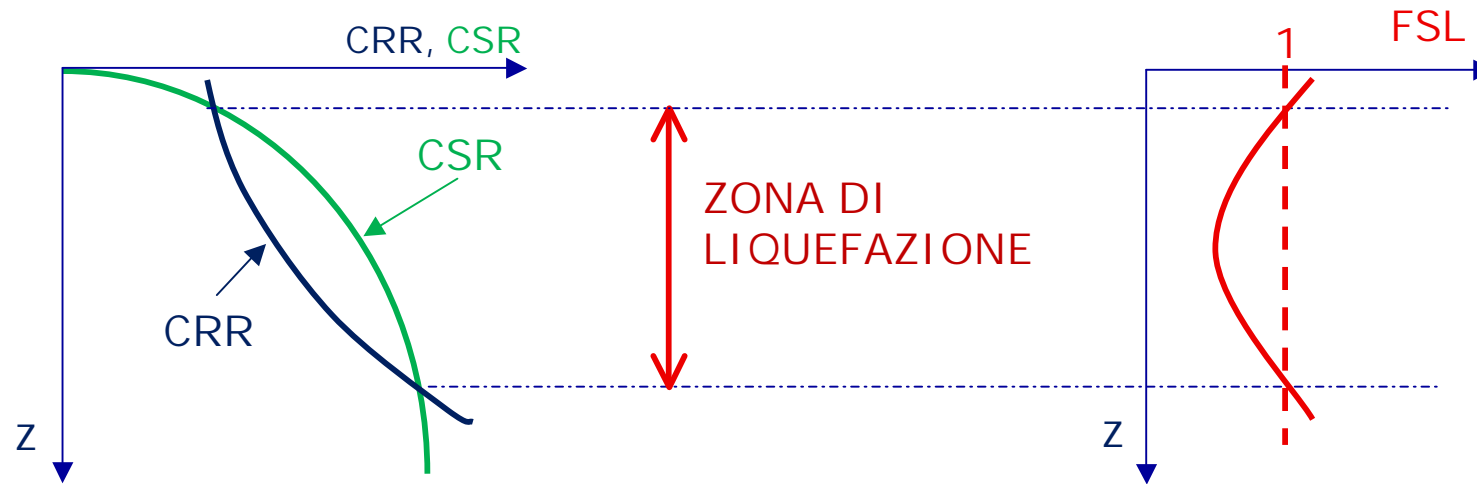
$$z > z_w,$$

$$I_c < 2.6,$$

$$(q_{c1n})_{cs} < 160$$



4. Come si stima il rischio



Nei metodi semplificati che utilizzano prove CPT

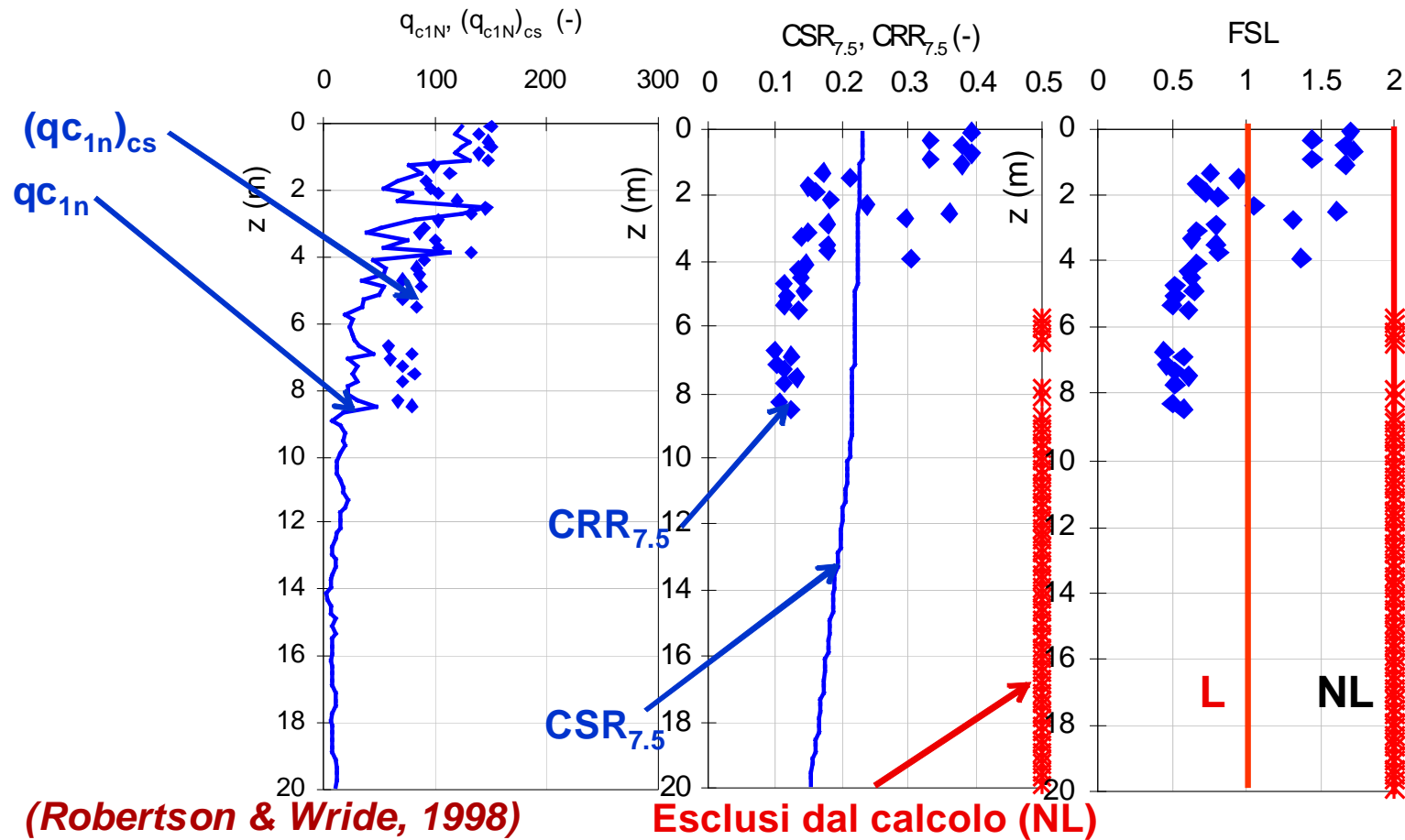
$$\text{CRR} = f(q_c, f_s, \sigma_{v0}, \sigma'_{v0})$$

$$\text{CSR} = f(M, a_{\max}/g, \sigma_{v0}, \sigma'_{v0}, r_d, \text{MSF}, K_\sigma)$$



4. Come si stima il rischio

Il calcolo di FSL è escluso per gli strati giudicati non liquefacibili da un punto di vista fisico ( $z > z_{cr}$ ,  $z < z_w$ ), litologico (ad es.  $I_c > 2.6$ ) o meccanico (ad es.  $(q_{c1N})_{cs} > 160$ ).





## Metodi semplificati

### Rischio di liquefazione in corrispondenza di una verticale

Una volta valutato il fattore di sicurezza FSL nei confronti della liquefazione a varie profondità lungo una verticale è opportuno introdurre un indice sintetico per quantificare il rischio di liquefazione in corrispondenza dell'intera verticale

A tale scopo viene di norma utilizzato un:

Indice del potenziale di liquefazione  $P_L$  (Iwasaki, 1978) :

$$P_L = \int_0^{z_{crit}} F(z) \cdot w(z) \cdot dz$$

dove :

$F(z)=0$  per  $FSL > 1$  ;  $F(z) = 1 - FSL$  per  $FSL < 1$

$w(z) = 10 - 10 \cdot (z/z_{crit})$  ;

$z_{crit}$  = profondità oltre la quale possono escludersi fenomeni di liquefazione (20m)

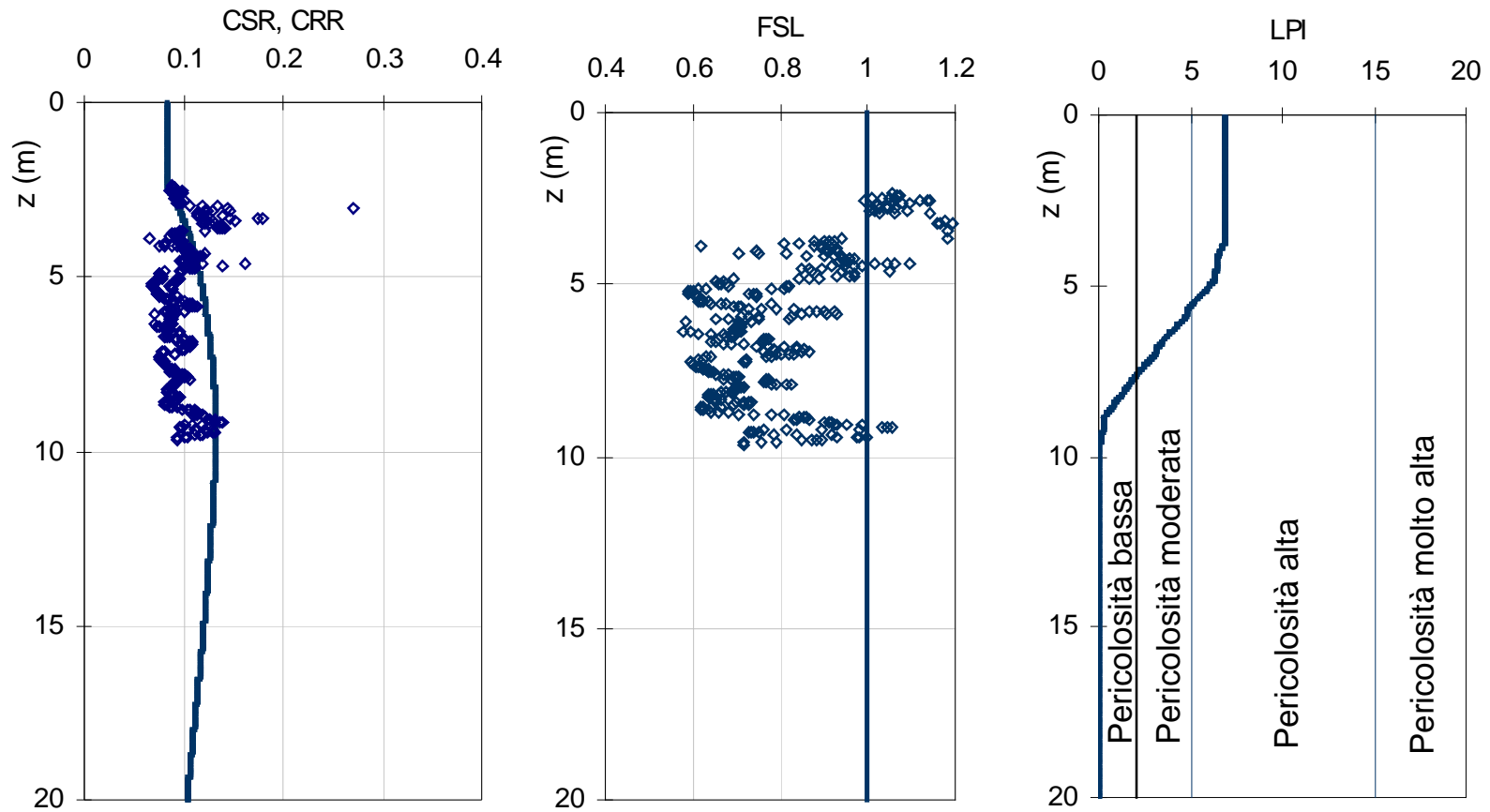
*Indice del potenziale di liquefazione e livello di rischio associato*

$P_L$	Rischio
0	nullo
$0 < P_L \cdot 2$	basso
$2 < P_L \cdot 5$	moderato
$5 < P_L \cdot 15$	alto
$P_L > 15$	molto alto



4. Come si stima il rischio

Con riferimento ad una prova CPTu a San Carlo di esempio:







4. Come si stima il rischio

Numerosità, tipologia e provenienza delle indagini geotecniche in sito disponibili per i Comuni di Sant'Agostino e di Mirabello

	BH / Pozzi	CPT	DH
RER-DPC	28	22	10
RER-DB	152	182	
CIS	34	28	5

Legenda:

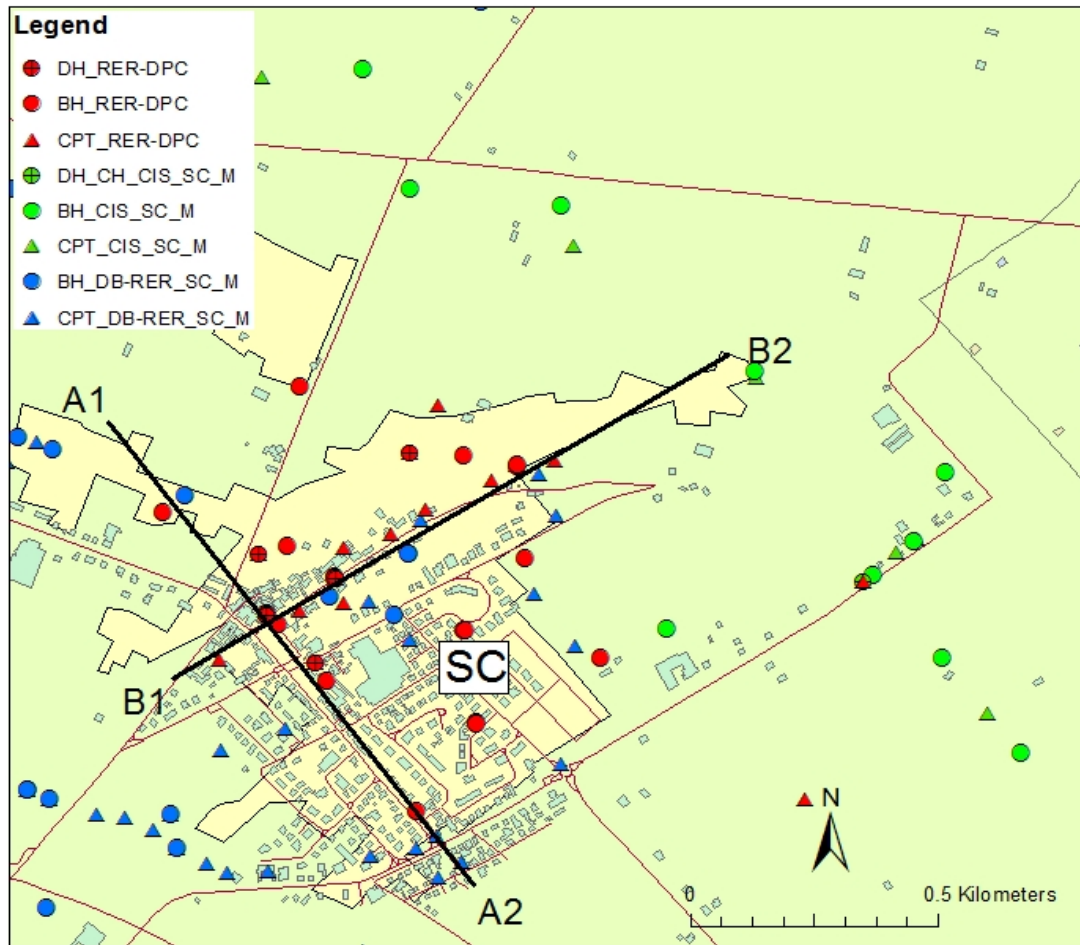
BH = Sondaggi stratigrafici e/o geotecnici

CPT = Prove penetrometriche statiche meccaniche, elettriche e con punta piezometrica

DH = Prove Down Hole e prove con cono sismico



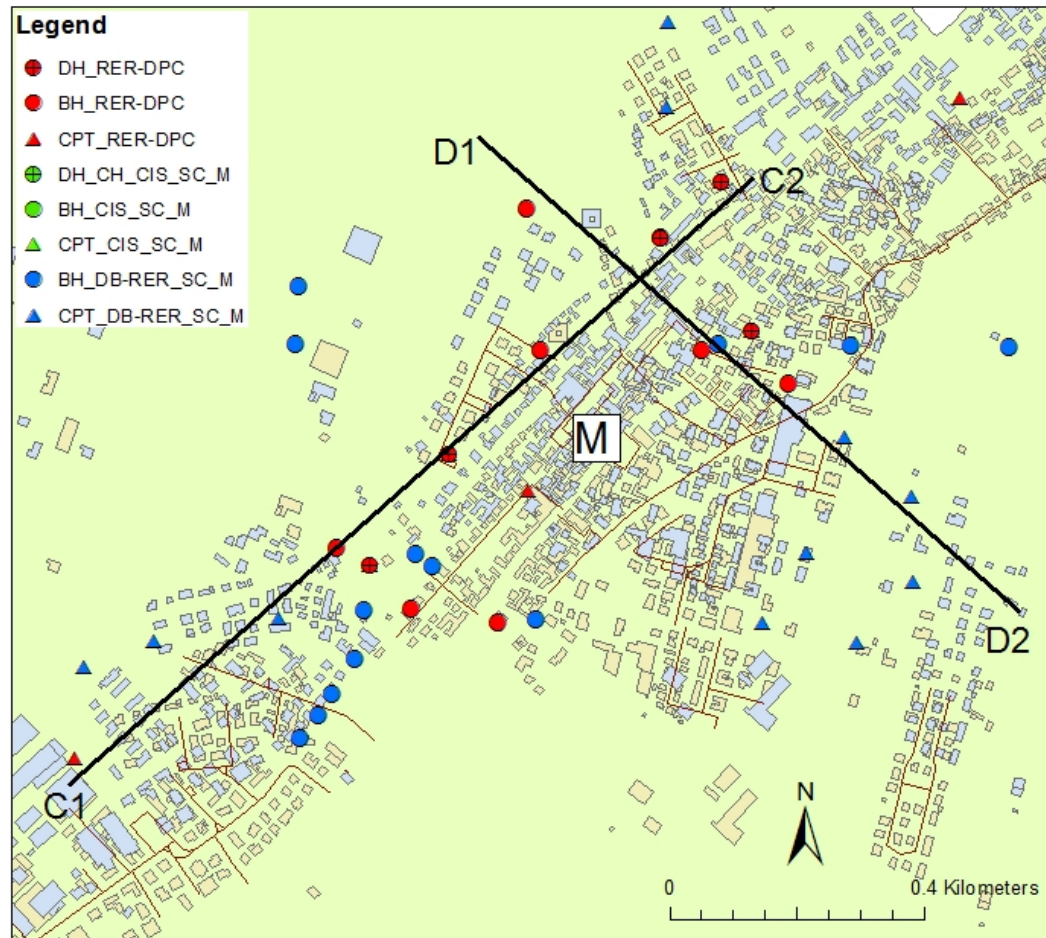
4. Come si stima il rischio



Ubicazione delle  
prove e delle  
sezioni di indagine  
per l'area di San  
Carlo



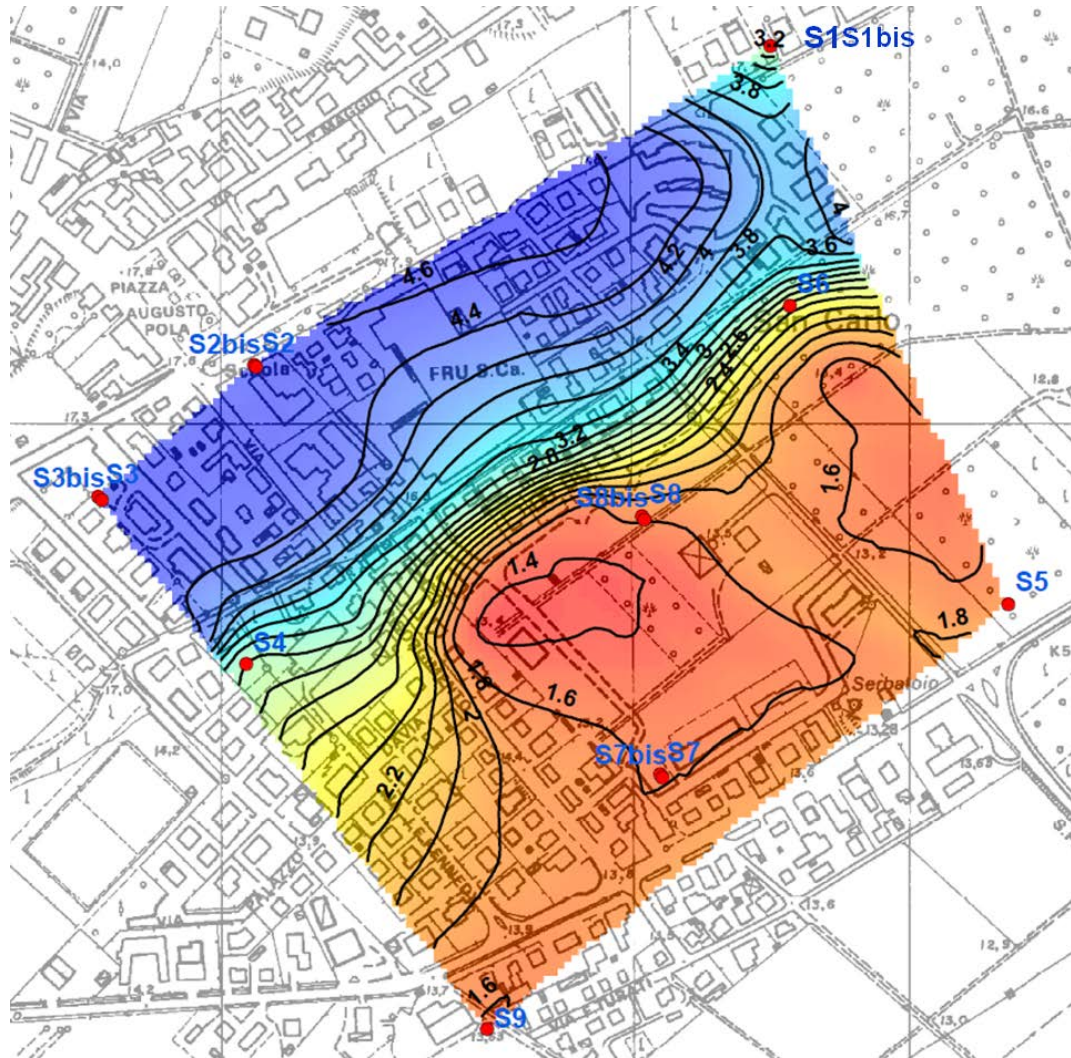
4. Come si stima il rischio



Ubicazione delle  
prove e delle sezioni  
di indagine per l'area  
di Mirabello



4. Come si stima il rischio



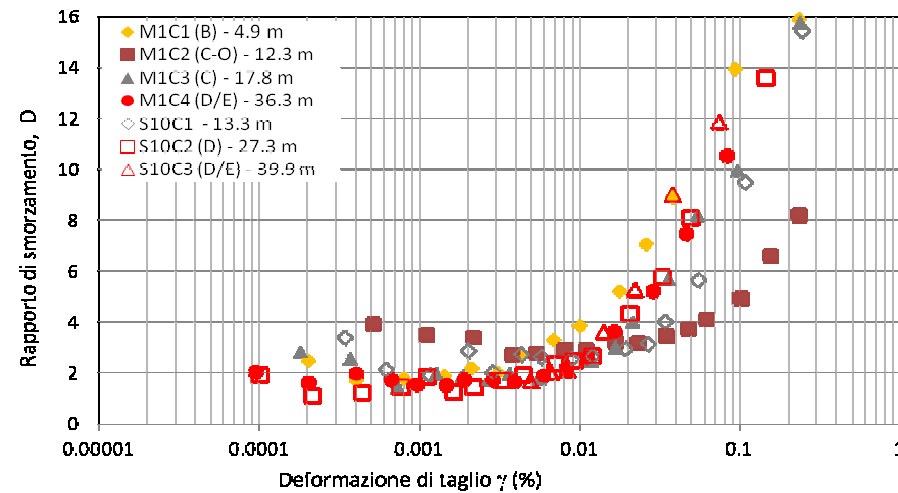
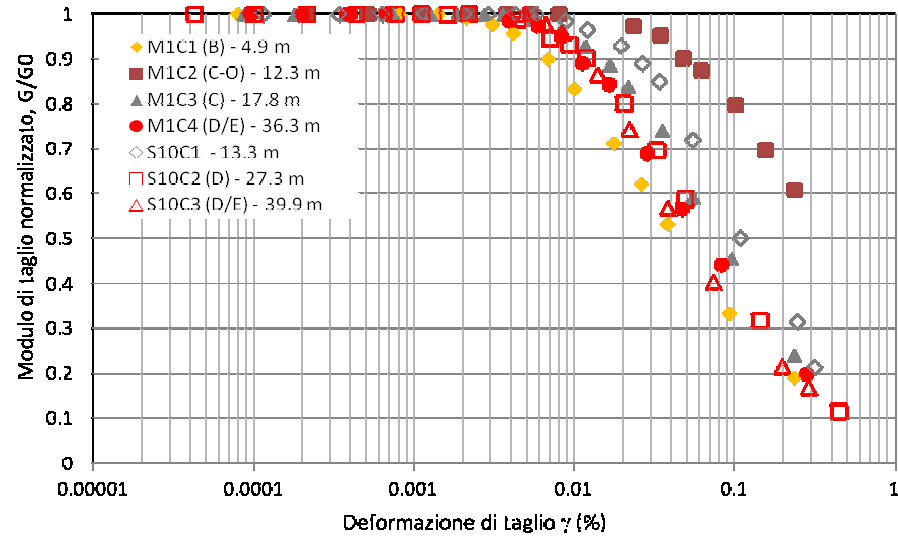
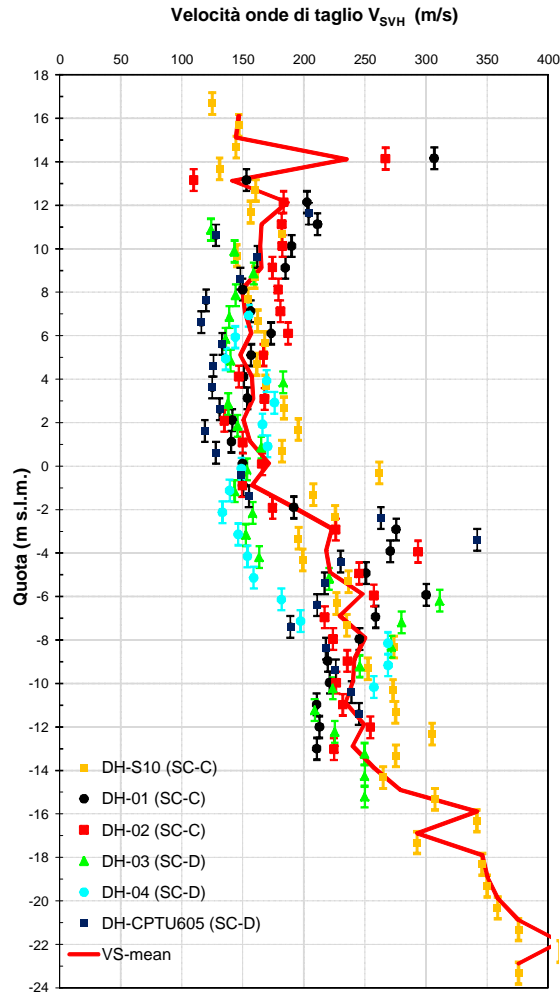
Monitoraggio della  
falda a San Carlo

Profondità da p.c.  
(8 giugno 2012)



4. Come si stima il rischio

Per l'analisi della risposta sismica locale

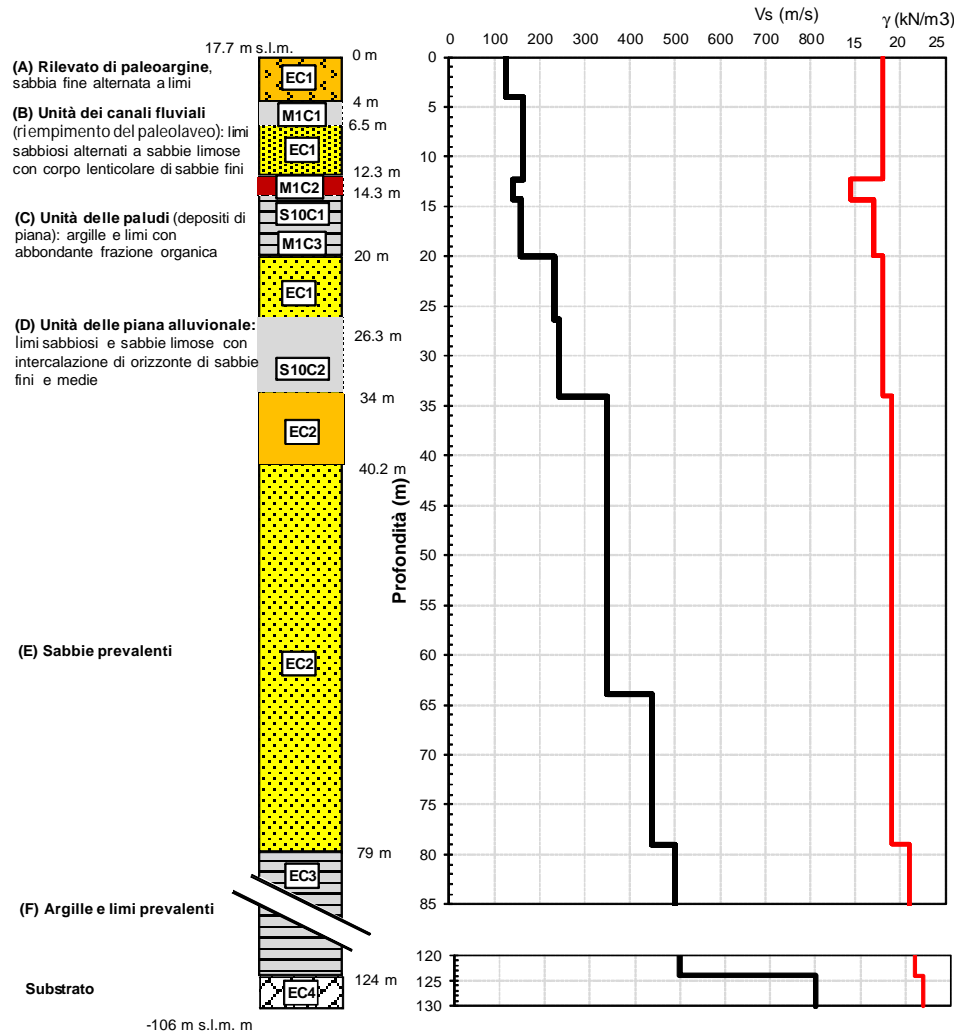






4. Come si stima il rischio

Per l'analisi della risposta sismica locale



$$a_g = 0.153 g$$

$$V_{S,30} = 180 \text{ m/s}$$

$$\text{CAT.} = \text{C/D}$$

$$S_S = 1.4/1.8$$

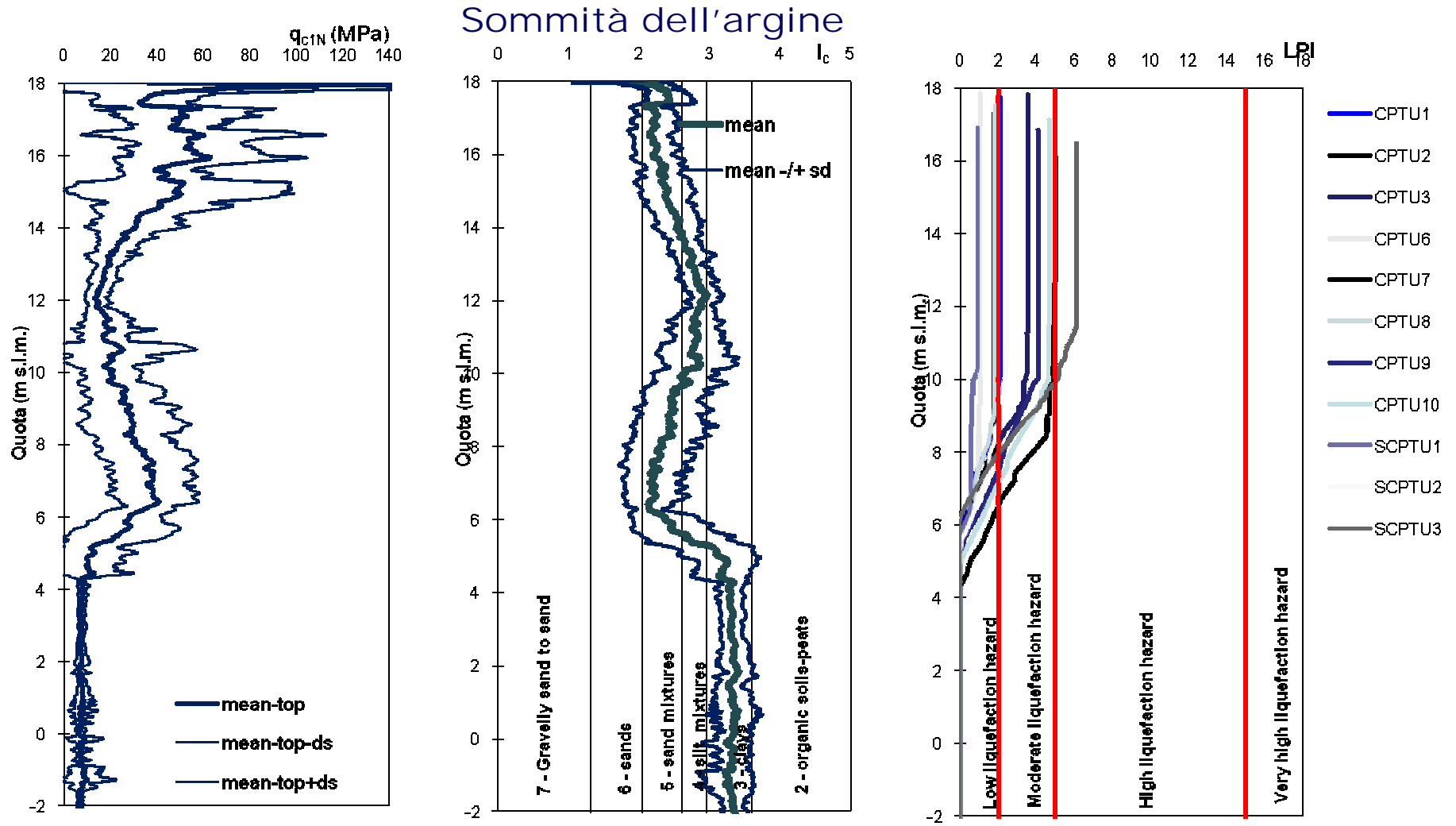
$$FA_{(PGA)} = 1.4$$

$$FA_{(HI)} = 2.6$$



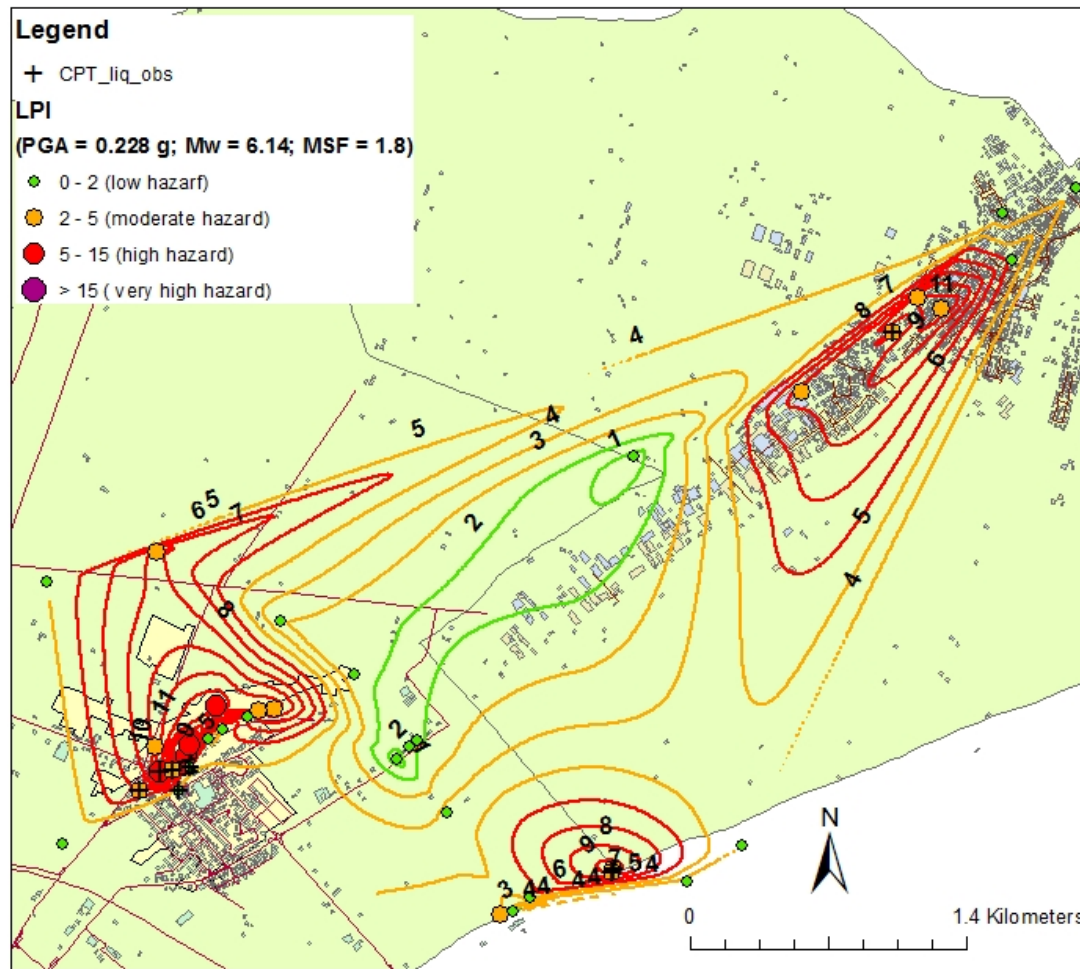
4. Come si stima il rischio

PGA=0.228 g; M=6.14; MSF=1.8





#### 4. Come si stima il rischio



Carta di pericolosità di liquefazione ottenuta applicando il metodo di Robertson e Wride (PGA=0.228g;  $M_w=6.14$ ; MSF=1.8) alle prove CPTu e SCPTu per l'area di San Carlo - Mirabello.



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE  
**DICEA**  
DIPARTIMENTO  
DI INGEGNERIA CIVILE  
E AMBIENTALE

Giovanni Vannucchi - Gli effetti di liquefazione osservati e i metodi di valutazione del rischio

# Grazie per l'attenzione