



Analisi di dettaglio finalizzata alla valutazione della pericolosità di liquefazione: il caso della costa Emiliano-Romagnola

BOLOGNA, 19 APRILE 2012



DI REZIONE GENERALE AMBIENTE E DI FESA DEL SUOLO E
SERVIZIO GEOLOGICO, SISMICO E DEI SUOLI



Liquefazione dei depositi sabbiosi saturi

- Ø **In senso stretto** il termine **'liquefazione'** è lo *"stato fisico in cui può venire a trovarsi un terreno sabbioso saturo quando la sua resistenza al taglio si riduce drasticamente per effetto dell'incremento e dell'accumulo delle pressioni interstiziali"*
- Ø **In senso ampio** con il termine **'liquefazione'** si indicano **differenti fenomeni fisici** molto diversi tra loro, osservati nei materiali granulari poco compatti saturi durante l'applicazione di carichi dinamici e ciclici in condizioni non drenate :
 - **liquefazione ciclica** (non produce danni)
 - **mobilità ciclica** (deformazioni permanenti)
 - **fluidificazione** (danni elevati e collassi)



(Niigata, Japan, 1964)



Motagua River
(Guatemala, 1976)



Turnagain Heights landslide
(Anchorage, 1964)



Fattori predisponenti e scatenanti

La liquefazione generalmente avviene quando sono verificate simultaneamente determinate condizioni:

Condizioni del terreno

Fattori predisponenti
(falda, granulometria, FC, PI,
 $(N_1)_{60}$, q_{c1N} , ...)



SUSCETTIBILITÀ
LIQUEFAZIONE

DI



Condizioni sismiche

Fattori scatenanti
(M_w , PGA, durata..)



PERICOLOSITÀ
LIQUEFAZIONE

DI



Metodi di analisi

La liquefazione può essere prevista ricorrendo a tre categorie di metodi:

Metodi empirici (*qualitativi o semiquantitativi*)

Metodi semplificati (*semi-empirici o ingegneristici*)

Metodi dinamici (*semplici e avanzati*)

↓ Risorse impegnate

che possono essere utilizzati in relazione alla finalità dell'indagine (microzonazione sismica o progettazione) ed al livello di dettaglio che si intende realizzare (livello di MS o importanza, classe d'uso e categoria della struttura)

I metodi empirici forniscono un giudizio qualitativo sulla suscettibilità di liquefazione del sito o dell'area in esame, i metodi semplificati e dinamici forniscono una stima quantitativa della domanda sismica (L) e della resistenza a liquefazione dei terreni (R), dal cui confronto si stima il potenziale di liquefazione, $LP = f(L,R)$, e quindi la pericolosità di liquefazione.

N.B. Tutti i metodi sopra indicati si riferiscono a condizioni free field (liquefazione ciclica), anche se forniscono, rispetto alle condizioni near field o di pendio, risultati in genere conservativi.



Livelli di analisi

I tre livelli di approfondimento previsti dalla MS per la liquefazione, secondo gli indirizzi regionali, sono:

Metodi empirici

I LIVELLO:  **Carta delle aree suscettibili di effetti locali (1:10000 o superiore)**
Identificazione delle aree suscettibili di liquefazione su grande scala

Metodi empirici/semplificati

II LIVELLO:  **Carta delle aree suscettibili di effetti locali (1:2000/5000)**
Ridefinizione delle aree suscettibili di liquefazione sulla base anche di dati sismici (M_w , PGA da analisi di II livello della RSL)

III LIVELLO: *Metodi semplificati/dinamici*
Calcolo di LP per le aree suscettibili di liquefazione e/o per opere di rilevante interesse pubblico)  **Carta di microzonazione**



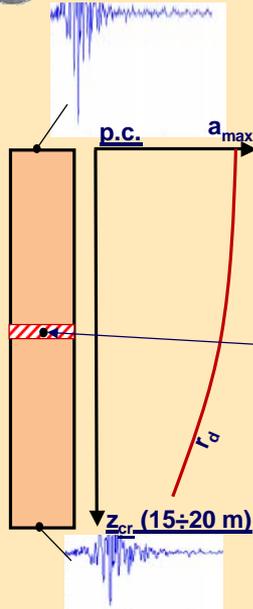
I dati richiesti e il risultato finale che è possibile ottenere in relazione al livello di indagine previsto, sono:

Livello	Grado conoscenza proprietà sottosuolo	Moto sismico di riferimento	Metodi d'analisi	Prodotto finale
I/II Metodi empirici	Caratteri generali (geologia superficiale, stratigrafia, litologia, valori medi V_s , N_{SPT} , C_u)	Accelerazioni max $a_{max,r}$ Spettri empirici $S_{a,r}(T)$	Abachi Leggi di attenuazione Correlazioni empiriche	Accelerazioni max di sito $a_{max,s}$ Spettri empirici di sito $S_{a,s}(T)$
II/III Metodi semplificati	Caratterizzazione geotecnica speditiva (profili di V_s)		Calcolo parametri di sintesi con metodi semplificati	Profilo $a_{max}(z)$ Periodo naturale T Fattore amplificazione A Spettri analitici di sito $S_{a,s}(T)$
III Metodi dinamici	Caratterizzazione geotecnica dettagliata (legame tensio-deformativo)	Accelerogrammi $a_r(t)$	Modellazione numerica	Profili $a_{max}(z)$, $\gamma_{max}(z)$, $\tau_{max}(z)$ Storie temporali $a(t)$, $\gamma(t)$, $\tau(t)$

N.B. Per una MS di III livello si applicano in genere i metodi semplificati, e tra questi, quelli basati sulle prove in sito; per maggiori approfondimenti sulle aree a maggiore pericolosità o destinate ad ospitare opere di rilevante interesse pubblico si possono applicare anche i metodi dinamici.



Metodi semplificati



Permettono di stimare, mediante correlazioni empiriche e a partire dai risultati di prove in sito, la **resistenza alla liquefazione** dei singoli strati di un deposito e di confrontarla con la **domanda sismica**, desunta da analisi di pericolosità sismica di base.

↓

Potenziale di liquefazione = $LP(x,y,z) = f(L,R,MSF)$

Carico sismico, $L(CSR) = f(a_{max}, \sigma_{v0}, \sigma'_{v0}, r_d)$

Resistenza, $R(CRR_{7.5}) = f(N_{SPT}, q_c, V_s, \text{coeff. norm.,...})$

Fattore di scala, $MSF = f(M_w) = CSR/CSR_{7.5}$

N.B. Analisi 1-D, free field, p.c. orizzontale (liquefazione ciclica).

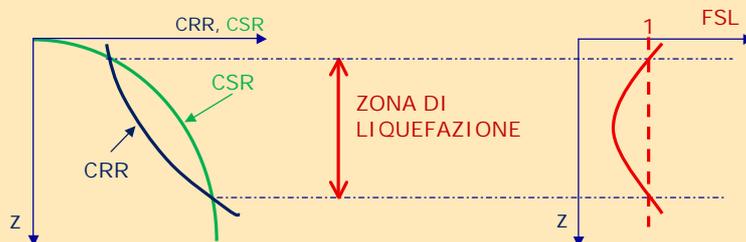


$$LP(x,y,z) = \begin{cases} 1-FSL & (FSL < 1) \\ 0 & (FSL > 1) \end{cases} \quad \text{con } FSL = \frac{CRR_{7.5}}{CSR_{7.5}}$$

dove:

$\emptyset CSR_{7.5}$ = sforzo di taglio indotto dal terremoto di magnitudo 7.5 ad una data profondità (normalizzato rispetto alla pressione di confinamento σ'_0 ed espresso come rapporto di tensione di taglio ciclica)

$\emptyset CRR_{7.5}$ = resistenza al taglio del terreno alla stessa profondità (normalizzata rispetto a σ'_0 ed espressa come rapporto di tensione di taglio ciclica) per un terremoto di magnitudo 7.5





Mappe di pericolosità di liquefazione

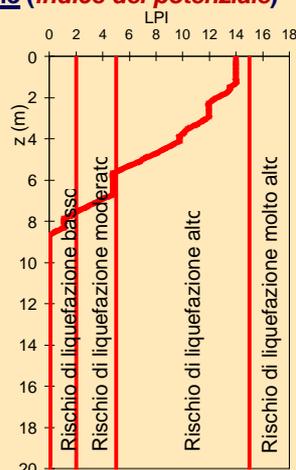
Per una zonazione sismica del territorio, finalizzata alla valutazione della pericolosità di liquefazione, occorre fornire, per ciascuna delle verticali per le quali sono disponibili i risultati di prove geotecniche in sito o in laboratorio, una misura integrale del potenziale di liquefazione (indice del potenziale)

che si estenda fino ad una profondità significativa ($z_{cr}=20$ m), e attribuisca un peso progressivamente crescente agli strati più superficiali ($W(z)$):

$$LPI(x, y) = \int_{z_{cr}=20}^0 P_L(x, y, z) \cdot W(z) dz \quad \text{con } W(z) = 10-z/2$$

(Iwasaki et al., 1982)

LPI	Classi di pericolosità di liquefazione
LPI = 0	Nulla
$0 < LPI \leq 2$	Bassa
$2 < LPI \leq 5$	Moderata
$5 < LPI \leq 15$	Alta
LPI > 15	Molto alta



9



Le mappe di pericolosità di liquefazione vengono realizzate a partire dai valori puntuali dell'indice del potenziale di liquefazione, LPI (x,y).

Le mappe possono essere restituite in forma puntuale oppure come interpretazione areale mediante:

- elaborazione deterministica dei valori puntuali (interpolazione, "distanza inversa pesata");
- elaborazione statistica dei valori puntuali ("zonazione statistica");
- elaborazione geostatistica dei valori puntuali ("kriging bayesiano").

N.B.

1. Le mappe fornite in forma "puntuale" sono più oggettive e evidenziano le aree scarsamente coperte dalle prove che meritano ulteriori approfondimenti. Sono però di difficile utilizzo (pianificazione del territorio, ecc.).

2. Le mappe "areali" sono fortemente influenzate dal criterio di interpolazione adottato, dalla densità e dalla distribuzione areale dei dati; vanno perciò integrate sulla base di considerazioni geologiche e con criteri conservativi.

10



Riassumendo, i metodi semplificati per l'analisi della pericolosità di liquefazione richiedono quindi:

1. definizione dei **parametri di pericolosità sismica di base** (a_g , M_w)
2. **profilo verticale** di un parametro rappresentativo **della resistenza del terreno** (q_c , N_{SPT} , V_S , ecc.) da prove in sito
3. **accelerazione massima attesa in superficie, a_{max}** per il periodo di ritorno considerato e per ciascuna verticale investigata
4. **modello empirico** per il calcolo della resistenza a liquefazione

11

Il caso della Costa Adriatica Romagnola

Data-base prove CPT utilizzate

- 1082 CPT meccaniche (CPTM)
- 203 CPT con piezocono (CPTU)
- 18 CPT elettriche (CPTE)
- 22 CPT con cono sismico (SCPT)

1325 TOTALE PROVE CPT

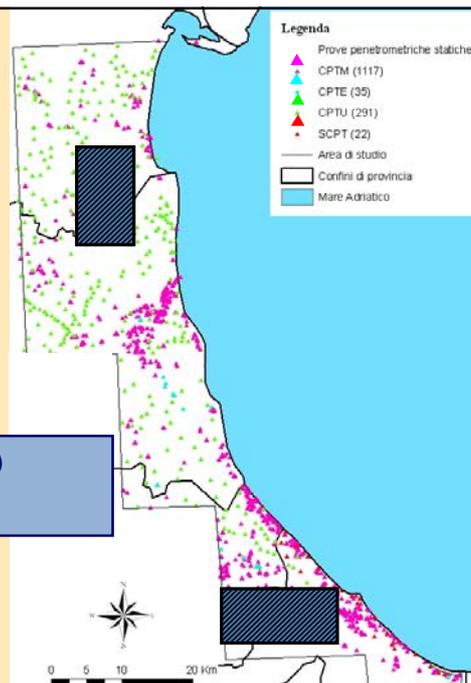
Prove con misura della falda: 797(58.3%)

Area di studio = 1300 km²

Zone non coperte: Valli di Comacchio

Densità media, $d_m = 1.1$ CPT/km²

Densità massima, $d_{max} = 15$ CPT/km² fascia costiera di 1 km)



12

Aspetti litologici

- **Zona interna settentrionale**
prevalenza di limi argillosi torbosi
- **Zona interna meridionale**
prevalenza di limi argilloso sabbiosi e ghiaie
- **Zona interna centrale**
prevalenza di sabbie e argille limose con vaste aree di piana alluvionale
- **Fascia costiera**
prevalenza di sabbie nella parte centro-meridionale e di argille limose e sabbiose nella parte settentrionale)



13

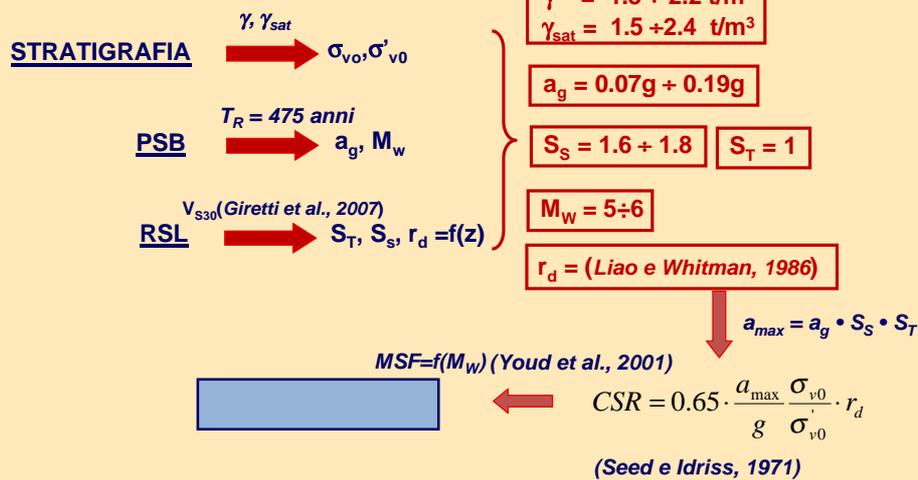


"Analisi di dettaglio finalizzata alla valutazione della pericolosità di liquefazione"

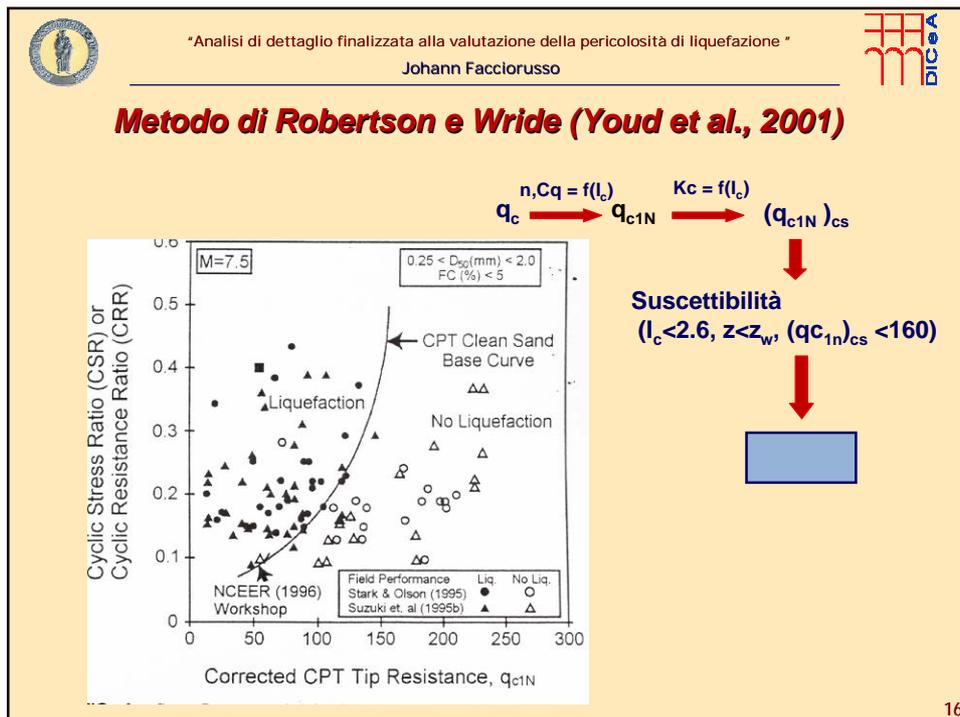
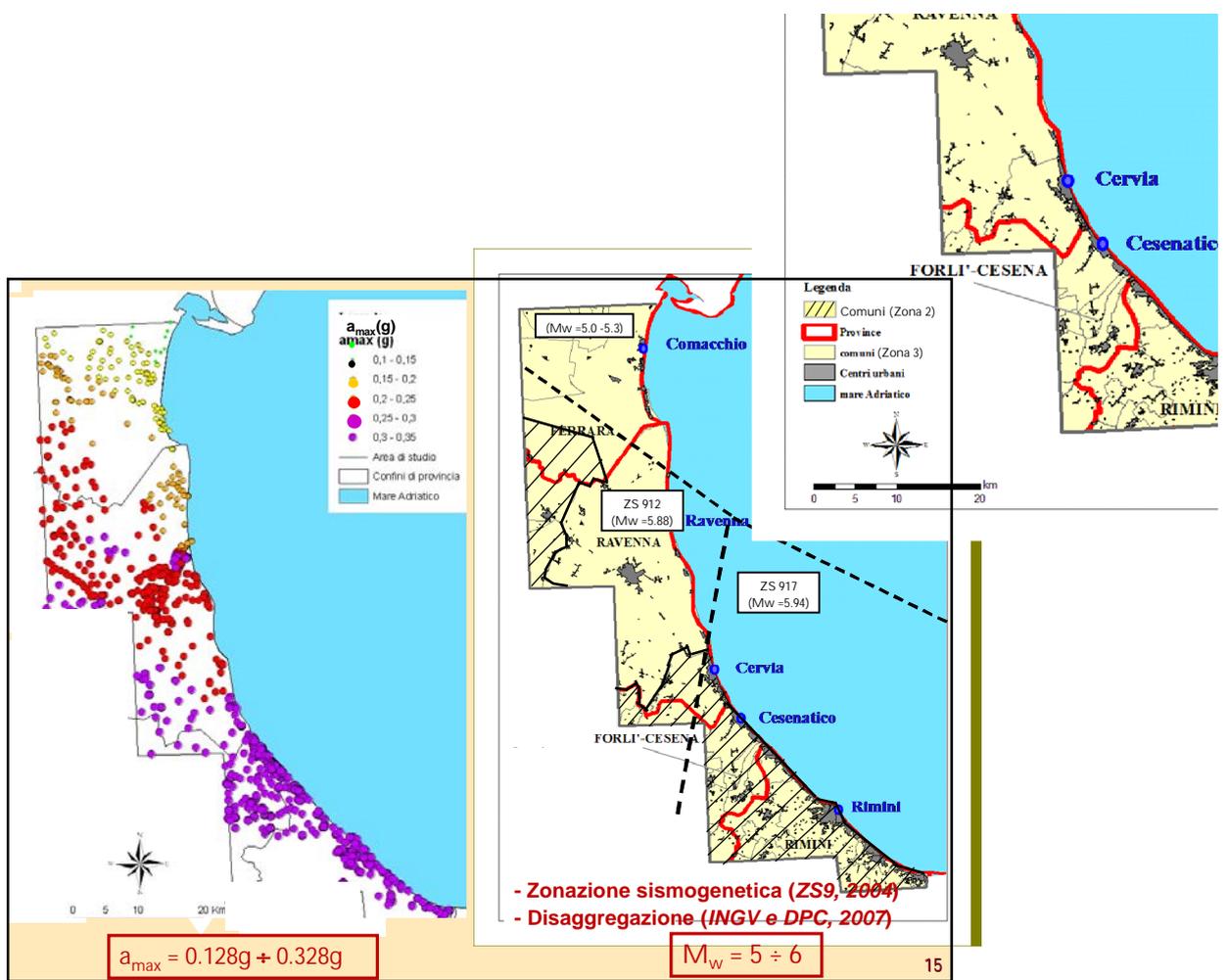
Johann Facciorusso



Azione sismica attesa (DAL 112/2007 e NTC2008)

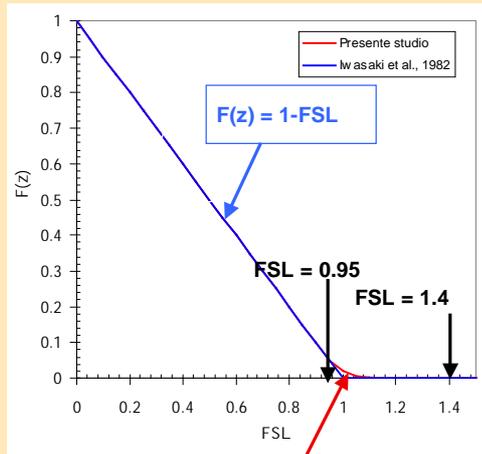


14





Indice del potenziale di liquefazione (LPI)



$$LPI(x, y) = \int_{z_{cr}=20}^0 LP(x, y, z) \cdot W(z) dz$$

con:

$$LP = F(z)$$

$$W(z) = 10 - z/2$$

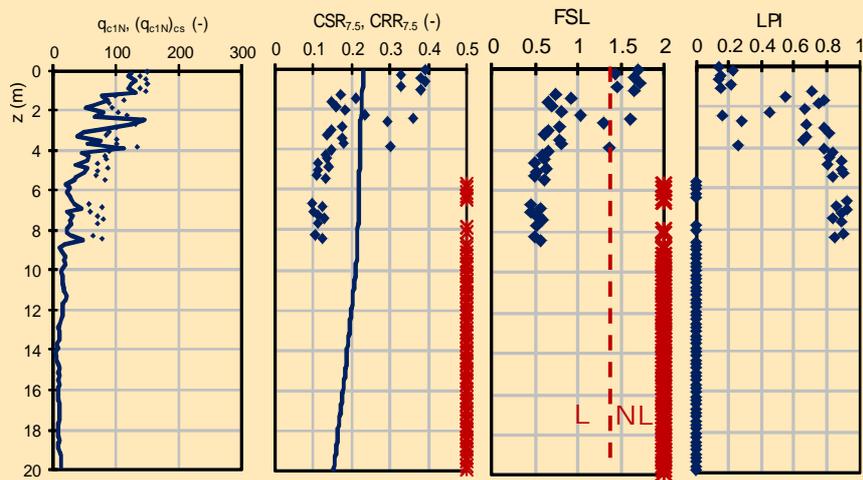
(da Sonmez, 2003)

LPI	Classi di pericolosità di liquefazione
LPI = 0	Nulla
0 < LPI • 2	Bassa
2 < LPI • 5	Moderata
5 < LPI • 15	Alta
LPI > 15	Molto alta

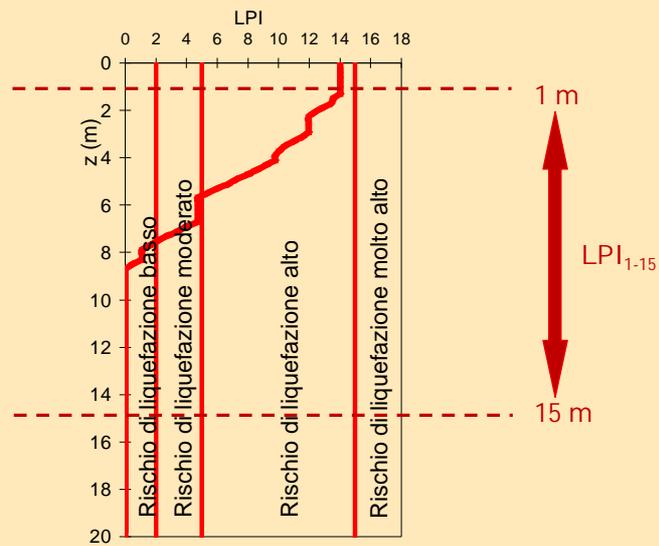
$$2 \cdot 10^6 e^{-18.427 \cdot FSL}$$



Risultati



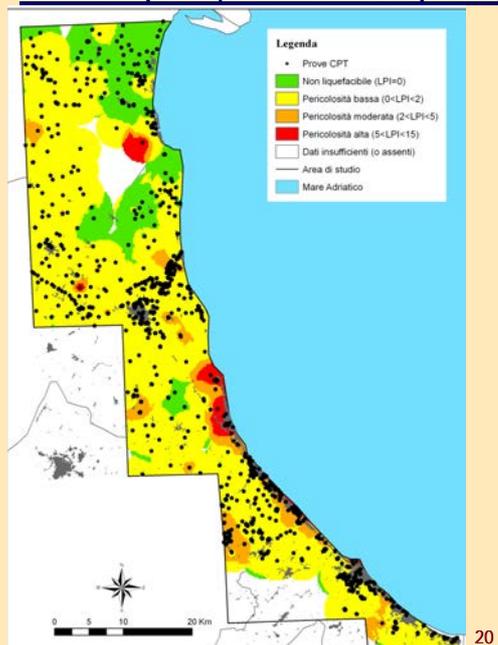
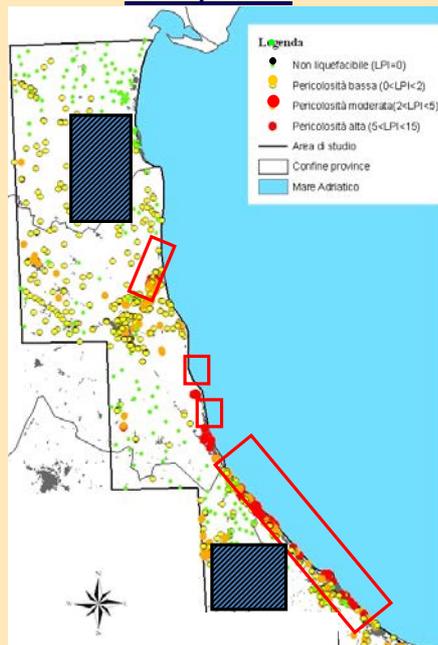
FSL = 1.4



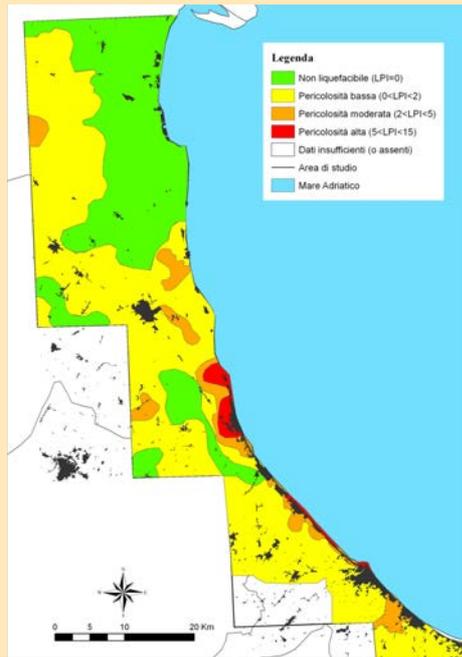
Mappe di pericolosità di liquefazione

Valori puntuali

Valori interpolati (distanza inversa pesata)



Mappa areale finale



21



"Analisi di dettaglio finalizzata alla valutazione della pericolosità di liquefazione "

Johann Facciorusso



Grazie per l'attenzione!