

Sorgente sismica e moto del suolo: modellazione diretta e inversa

Alessio Piatanesi

In collaborazione con A. Cirella, G. Cultrera, A. Herrero, E. Spagnuolo, R. Basili, F. Romano e S. Lorito

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Schema della presentazione

- modelli di sorgente sismica
- dati utilizzati per ricostruire la sorgente sismica
- Applicazione 1: *problema inverso per la sorgente sismica*
 - un esempio
 - dettagli dell'algoritmo di inversione
- Applicazione 2: *previsione del moto del suolo (Shaking_Chain)*
 - un esempio
 - dettagli dell'algoritmo
- Rilevanza delle applicazioni presentate

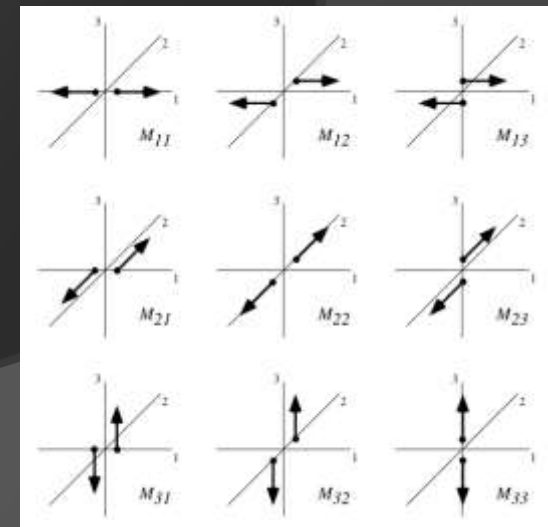
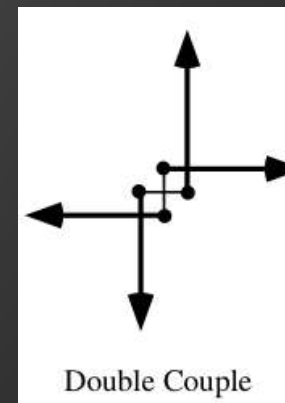
Sorgente sismica: rappresentazione puntiforme (1)

A seguito del terremoto di San Francisco del 1906, Reid interpretò il fenomeno come dovuto allo spostamento istantaneo (**dislocazione**) di due porzioni di crosta terrestre lungo una superficie di discontinuità (**faglia**).

A partire da questa evidenza osservativa e nell'ambito della teoria classica dell'elasticità, vennero successivamente formulati diversi modelli di sorgente sismica, con lo scopo di poterne determinare i parametri fondamentali dall'analisi dei dati disponibili.

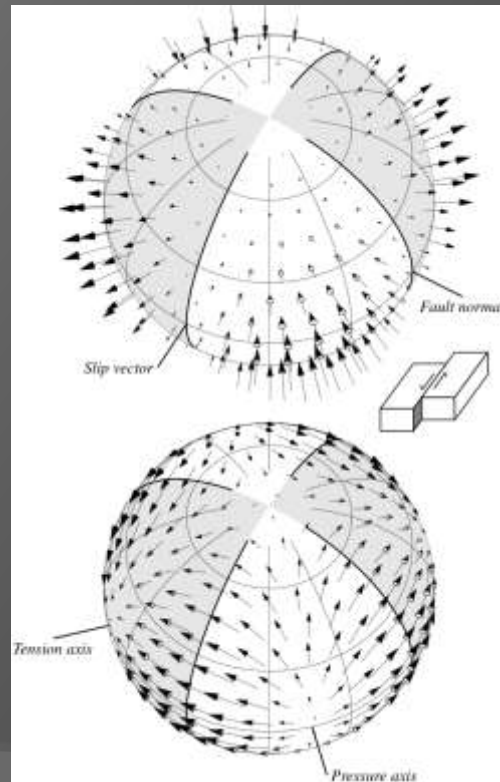


Uno dei modelli più semplici di sorgente sismica è la **sorgente puntiforme doppia coppia**: si basa sull'equivalenza, in termini di onde elastiche emesse, tra una dislocazione su una superficie interna e una doppia coppia di forze a momento torcente nullo. Naturale generalizzazione al **momento tensore** (tensore simmetrico 3x3, 6 componenti indipendenti).

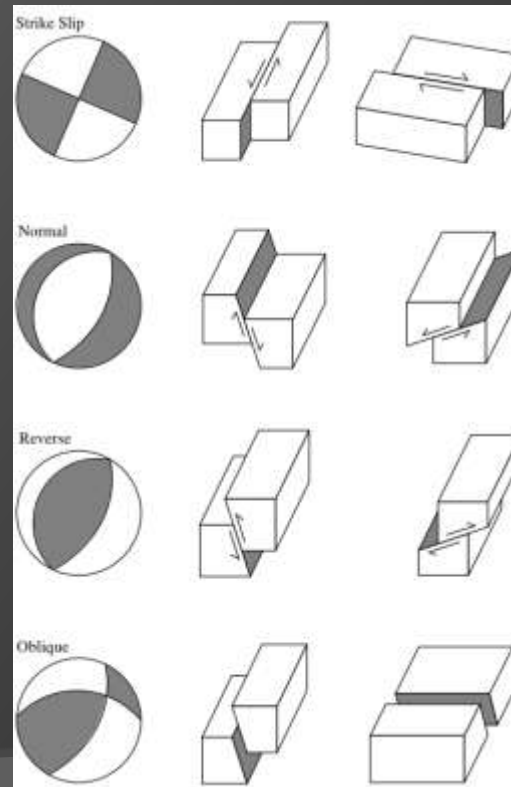


Sorgente sismica: rappresentazione puntiforme (2)

Pattern di radiazione e determinazione dei meccanismi focali

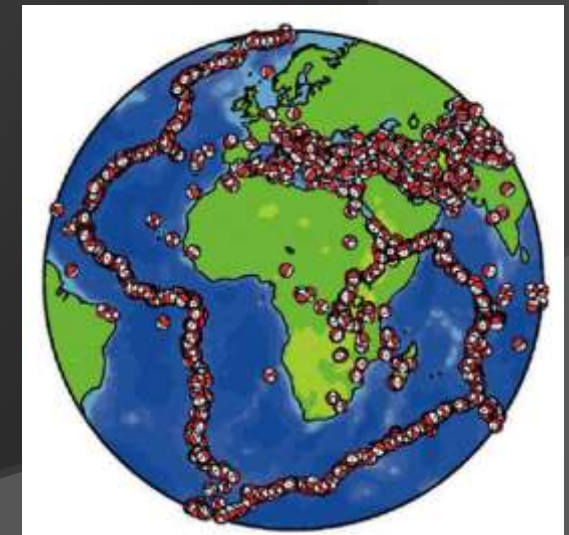


Meccanismo focale e geometria di fagliazione



Catalogo dei meccanismi focali (CMT Harvard)

Regime tettonico (distensivo, compressivo, trascorrente)



Sorgente sismica: rappresentazione faglia estesa (1)

Generalmente le faglie geologiche sono strutture multiscala geometricamente complesse. Sono caratterizzate da una o più faglie principali, dalle quali si possono diramare segmenti secondari a formare reti 3D.

Hollywood-Santa Monica-Malibu Coast fault

Santa Ynez fault

San Andreas fault



Palos Verdes fault

Newport-Inglewood fault

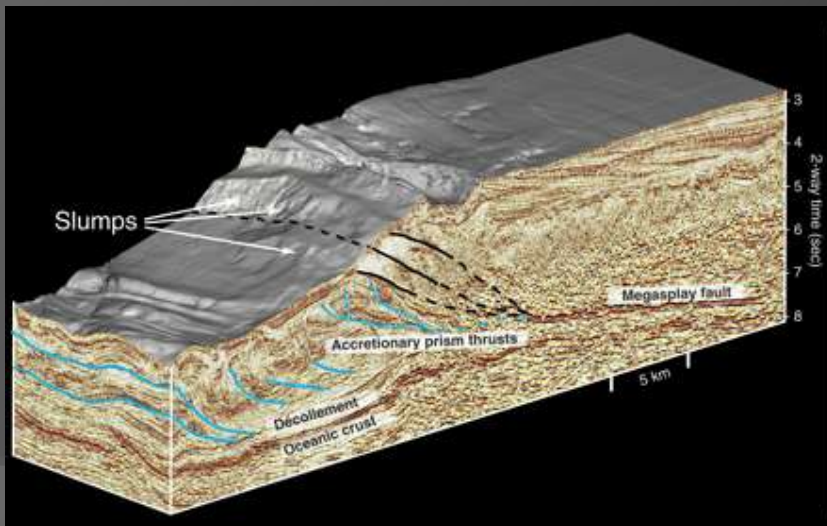
Raymond fault

Whittier fault

Sierra Madre fault

Los Angeles basin

R. Crippen, JPL

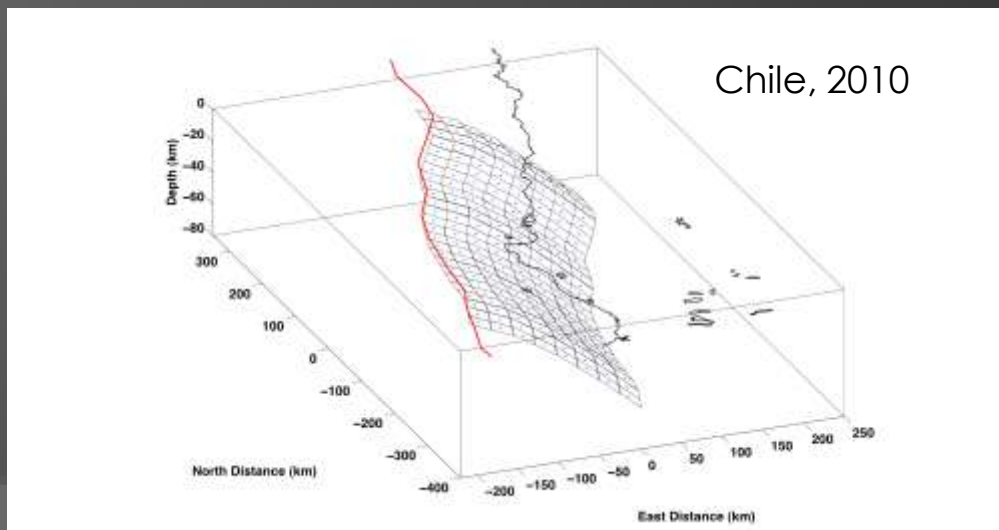
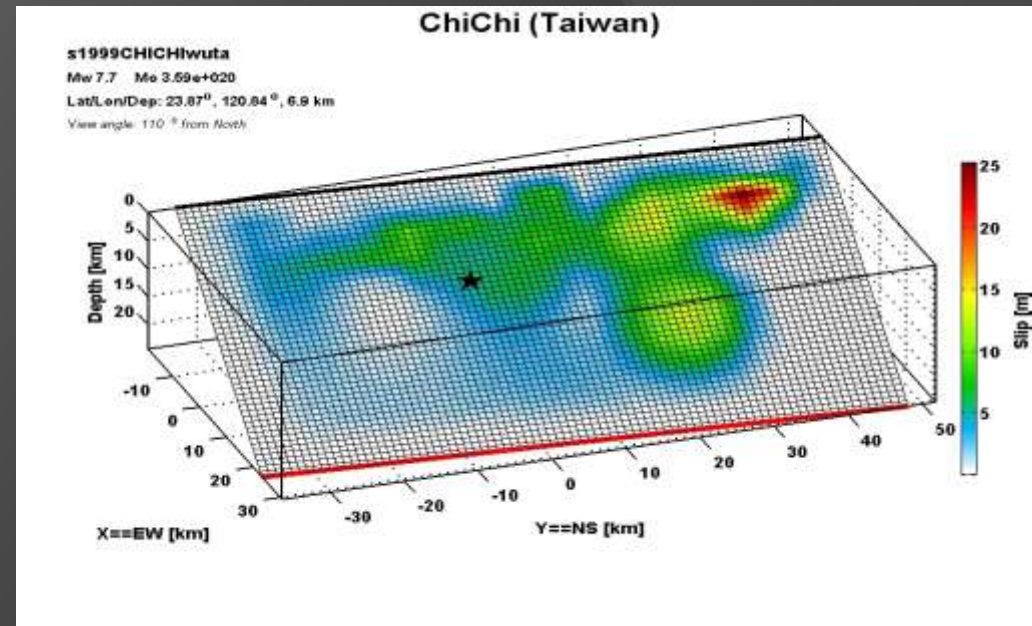


Kumano basin, Nankai trough, Japan

Moore et al., 2007

Sorgente sismica: rappresentazione faglia estesa (2)

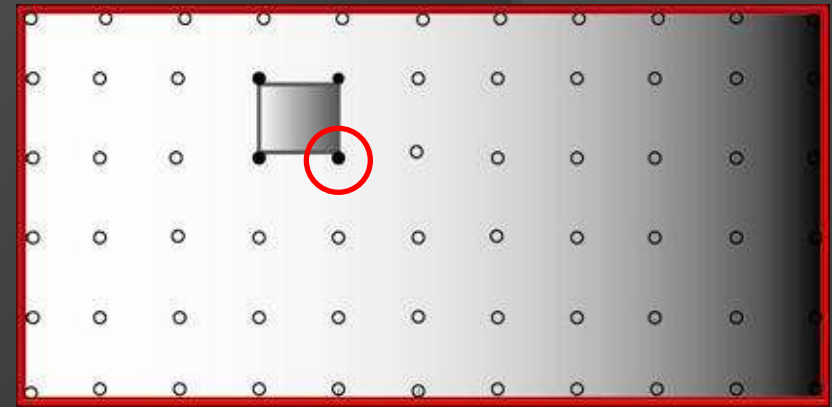
Tuttavia, in molti casi e per quasi tutti gli scopi pratici, le faglie sono approssimate da superfici piane o comunque semplici.



Sorgente sismica: rappresentazione faglia estesa (3)

Per ottenere una descrizione cinematica completa del processo di rottura, è necessario definire, su ogni punto della superficie di faglia i seguenti parametri:

- tempo di inizio della dislocazione: t_r
- durata della dislocazione
(rise time): τ
- dislocazione totale: D_{tot}
- direzione della dislocazione
(angolo di rake): λ
- dipendenza temporale
della dislocazione: $f(t)$



Velocità di dislocazione Dislocazione

D_{tot}
QuickTime™ and a
decompressor
are needed to see this picture.

τ

Sorgente sismica: rappresentazione faglia estesa (4)

Esempio di un modello cinematico di sorgente sismica su faglia estesa:

Niigata, Giappone, 2007 Mw=6.6.



QuickTime™ and a
decompressor
are needed to see this picture.



Il terremoto come sorgente di onde

Una sorgente sismica può generare campi d'onda di varia natura.

-) **onde elastiche** nella **terra solida**:

onde di volume (P, S)

onde superficiali (Rayleigh e Love)

-) quando la sorgente sismica è localizzata al di sotto dei fondali oceanici, l'accoppiamento terra solida-terra liquida genera onde di pressione (**onde T**) e di gravità (**tsunamis**) che si propagano negli **oceani**

-) inoltre, l'accoppiamento terra solida-atmosfera e oceano-atmosfera può generare **infrasuoni in atmosfera** e **perturbazioni della ionosfera**.

Dati utilizzati

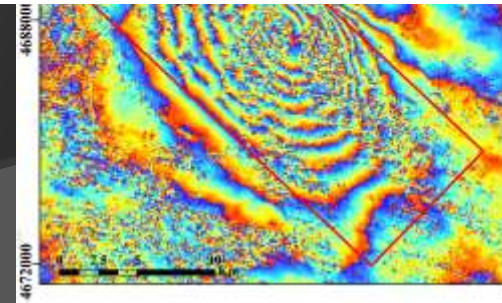
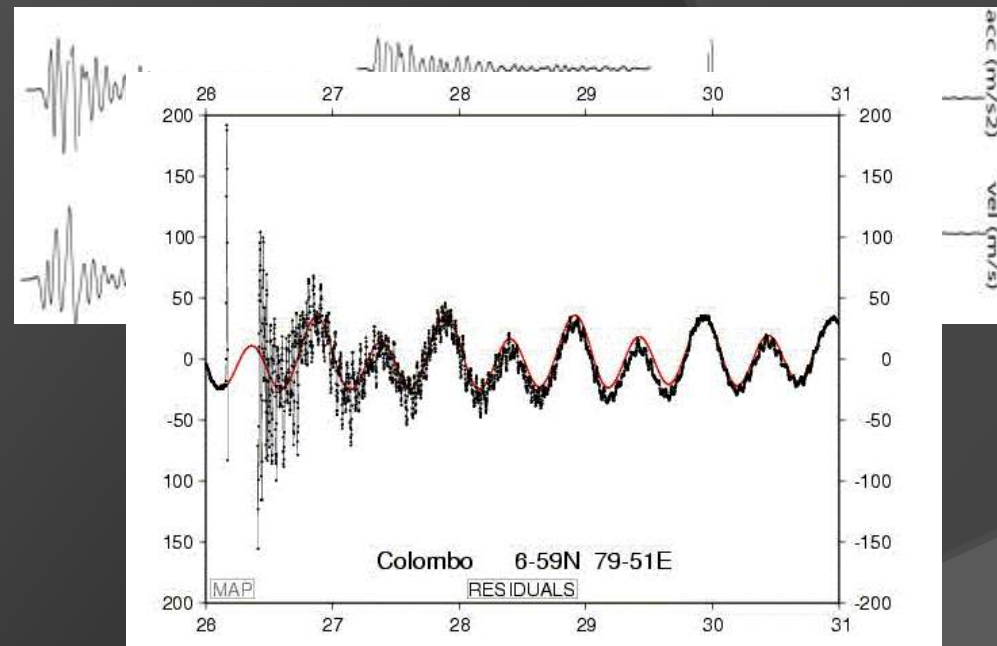
In linea di principio, tutta la radiazione emessa durante un terremoto può essere utilizzata per studiare le caratteristiche della sorgente sismica

-) Sismogrammi = registrazioni del moto del suolo: accelerometri e sismometri larga banda

-) Misure statiche dello spostamento del suolo: sensori GPS

-) Misure statiche del campo di spostamento: interferometria radar da satellite (InSAR)

-) Mareogrammi = registrazioni delle variazioni di livello marino: mareografi, sensori di pressione oceanici, boe GPS)



Problema inverso per la sorgente sismica (1)

d: dati (sismogrammi, mareogrammi,)

m: parametri che caratterizzano la sorgente sismica (dislocazione, velocità di rottura, ...)

G: operatore che lega lo spazio dei parametri ai dati osservati

Il problema diretto si può scrivere in tutta generalità come:

$$\mathbf{d} = \mathbf{G}(\mathbf{m})$$

Solo in alcuni casi **G** dipende linearmente dai parametri, ma in generale ciò non è vero: il problema inverso per la sorgente sismica è un **problema inverso non lineare**.

Problema inverso per la sorgente sismica (2)

- Il problema inverso non lineare per la sorgente sismica viene oggi affrontato come un problema di ottimizzazione globale.
- Definire la parametrizzazione della sorgente e quindi i parametri da invertire. Il problema è spesso ad alta dimensionalità ($N > 100$)
- Occorre definire la funzione da ottimizzare. In genere si minimizza una norma L2 o funzione di correlazione tra forme d'onda
- Svariate tecniche di ottimizzazione (soprattutto di tipo “global search”):
 - simulated annealing (più spesso simulated quenching)
 - algoritmi genetici

Problema inverso per la sorgente sismica (3)

Punti cruciali dell'inversione non lineare per la sorgente sismica

- carico computazionale

ma le risorse computazionali sono in crescita costante

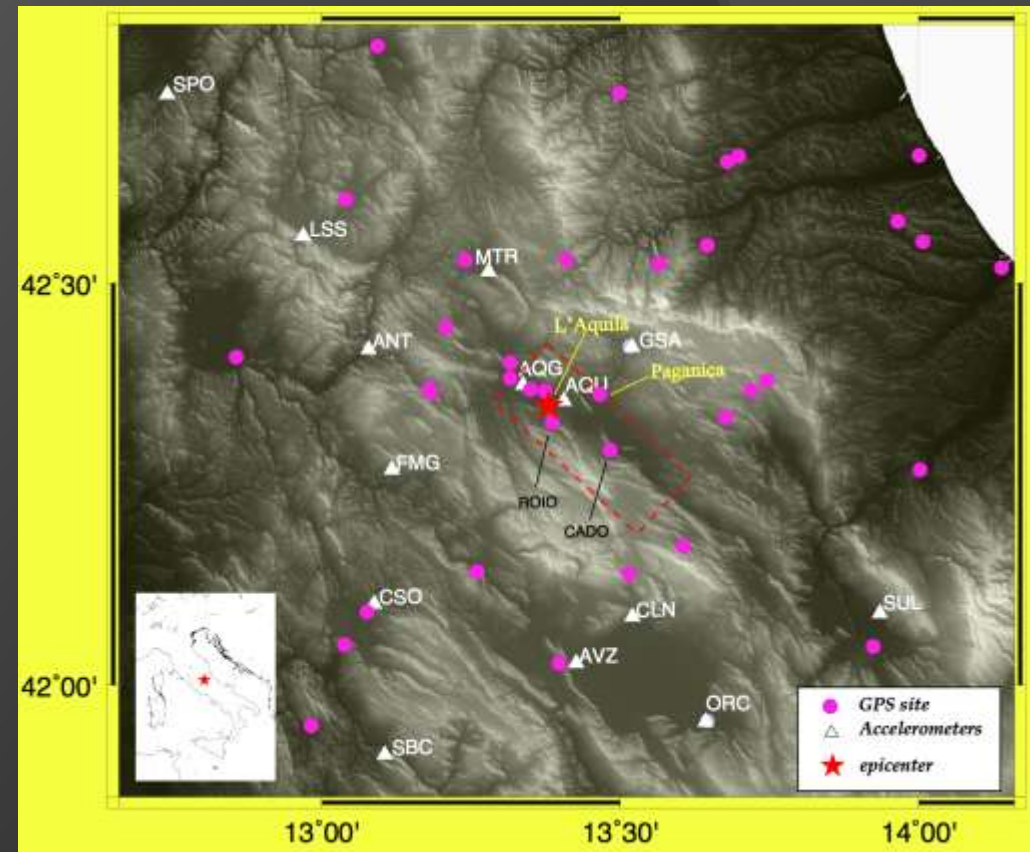
- analisi degli errori sul modello

appraisal statistico sull'ensemble dei modelli esplorati
approccio Bayesiano

L'Aquila, Italia centrale 2009, Mw=6.2 (1)

Terremoto ottimamente registrato

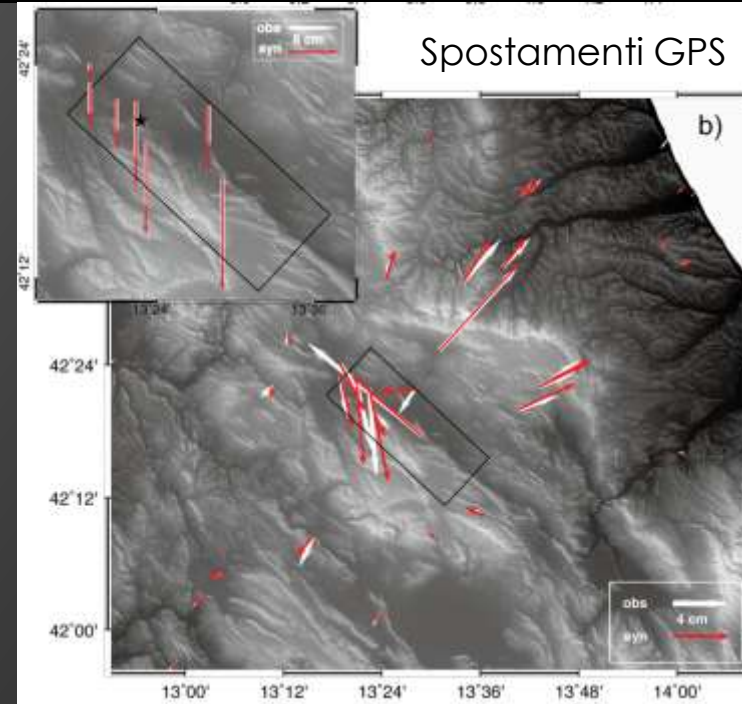
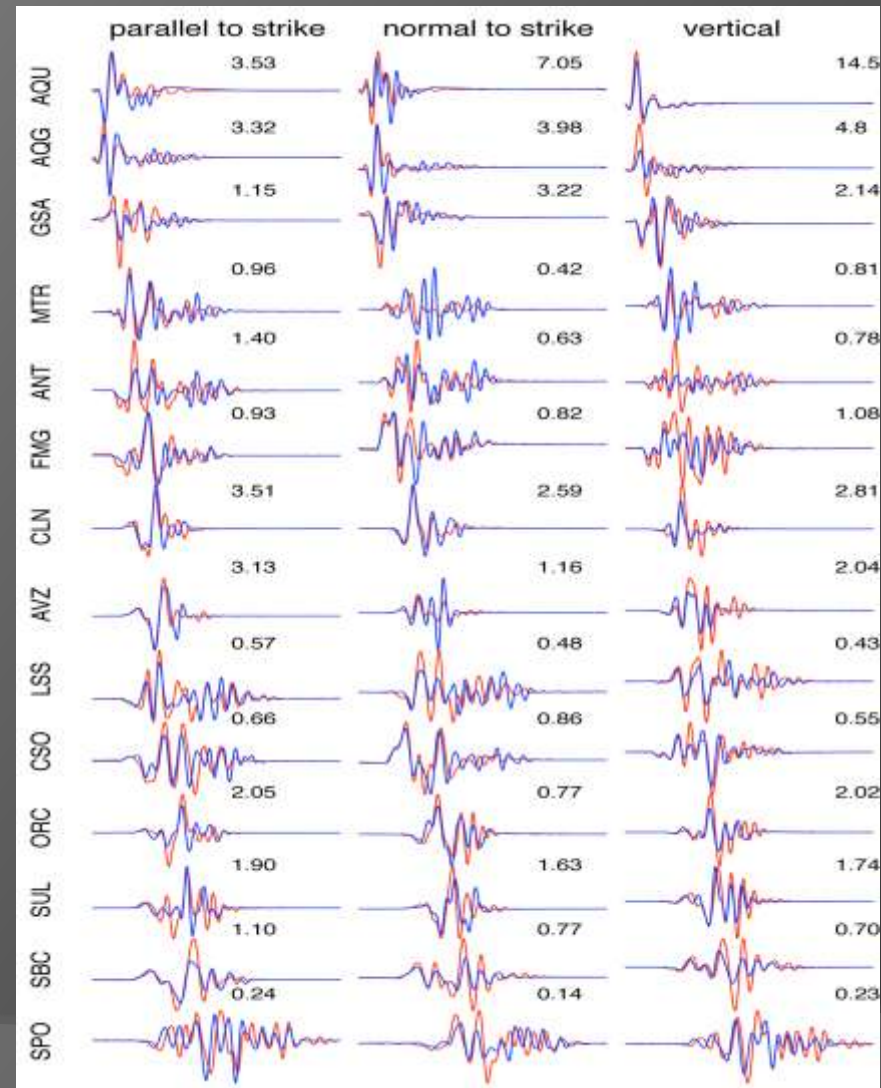
- 14 accelerogrammi
- 36 stazioni GPS
- $D < 70$ km
- Interferogrammi radar



L'Aquila, Italia centrale 2009, Mw=6.2 (2)

Sismogrammi strong motion

Banda di frequenza: 0.02 ÷ 0.5 Hz;



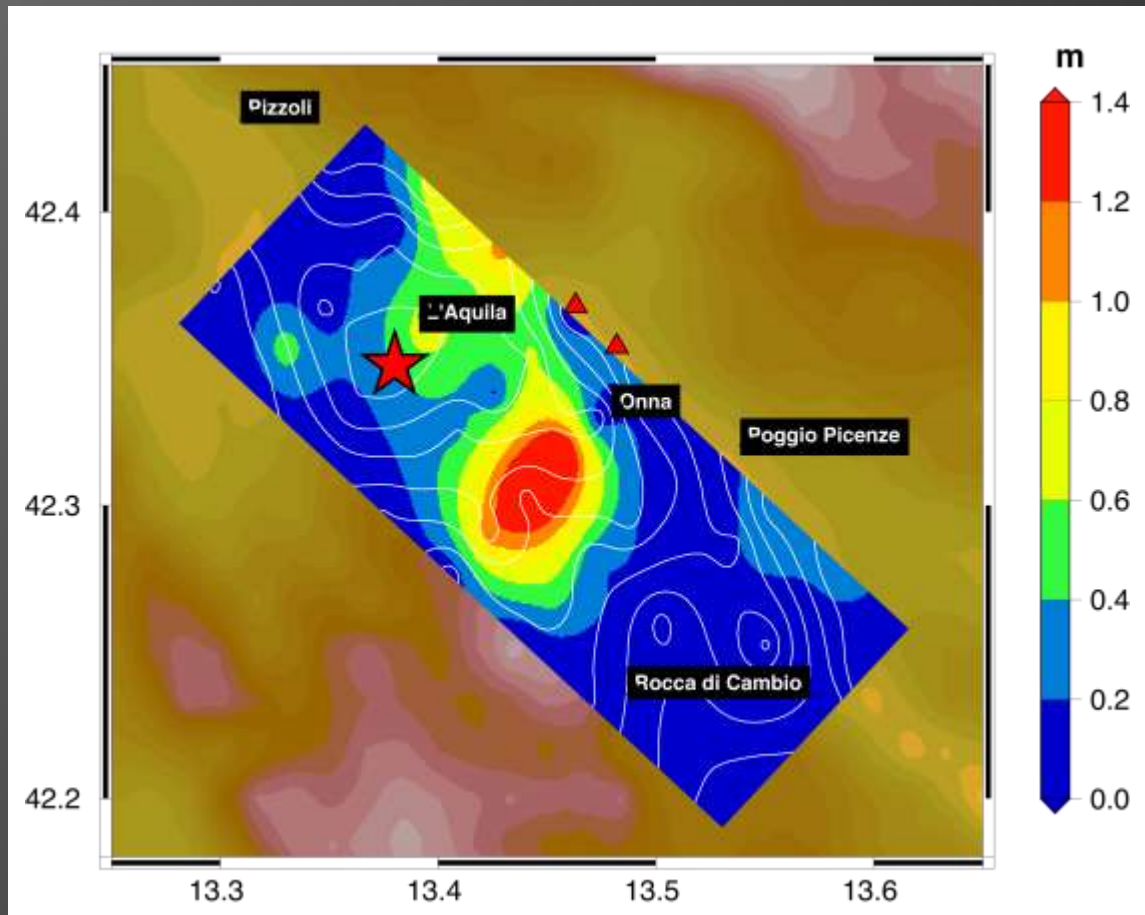
Interferogramma
Envisat
discendente

QuickTime™ and a decompressor are needed to see this picture.

L'Aquila, Italia centrale 2009, Mw=6.2 (3)

Modello sorgente estesa

ottenuto dall'inversione congiunta non lineare di dati strong motion, GPS e InSAR



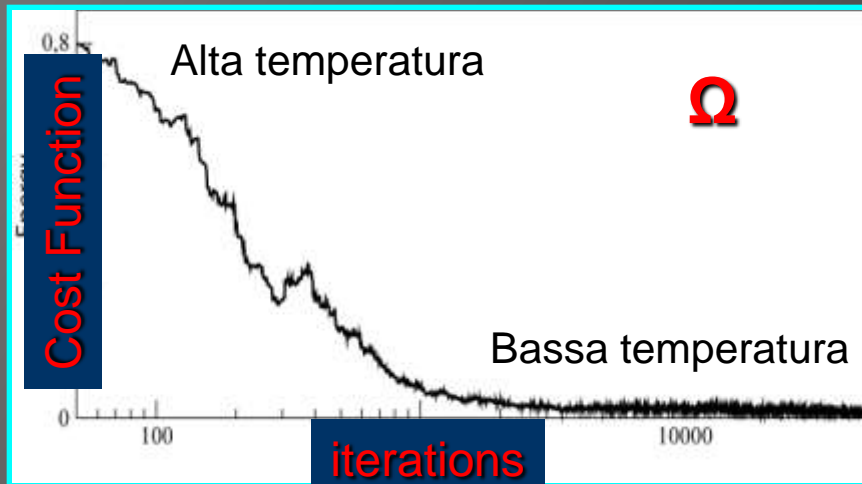
L'Aquila, Italia centrale 2009, Mw=6.2 (4)

Evoluzione spazio-temporale della rottura (velocità della dislocazione)

QuickTime™ and a
H.264 decompressor
are needed to see this picture.

L'algoritmo di inversione: simulated annealing

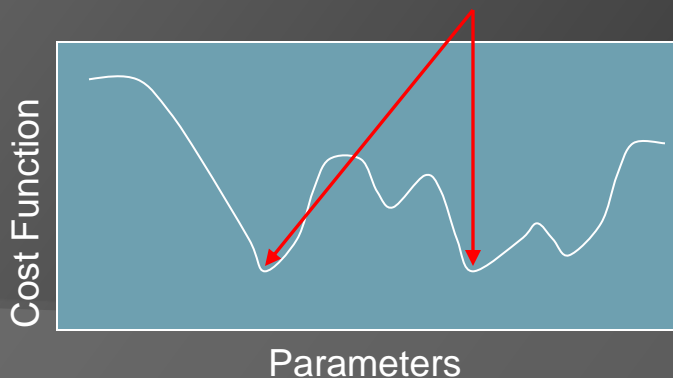
Ottimizzazione tramite *simulated annealing*



-Esplorazione guidata dello spazio dei parametri (alta dimensionalità, $N_p > 100$)

-Numero di modelli che devono essere testati molto alto ($N_M > 10^6$)

Cost function con *minimi multipli* molto simili fra loro (non univocità della soluzione)



L'algoritmo di inversione: pseudo-codice

Schema del codice

START

random model m_0

Loop over temperatures

Loop over iterations

Loop over parameters (V_r, \dots)

Loop over model values

Forward Modeling: **modulo SLIP (Compsyn)**
Misfit computation

end

Selezione modello e suo aggiornamento

end

end

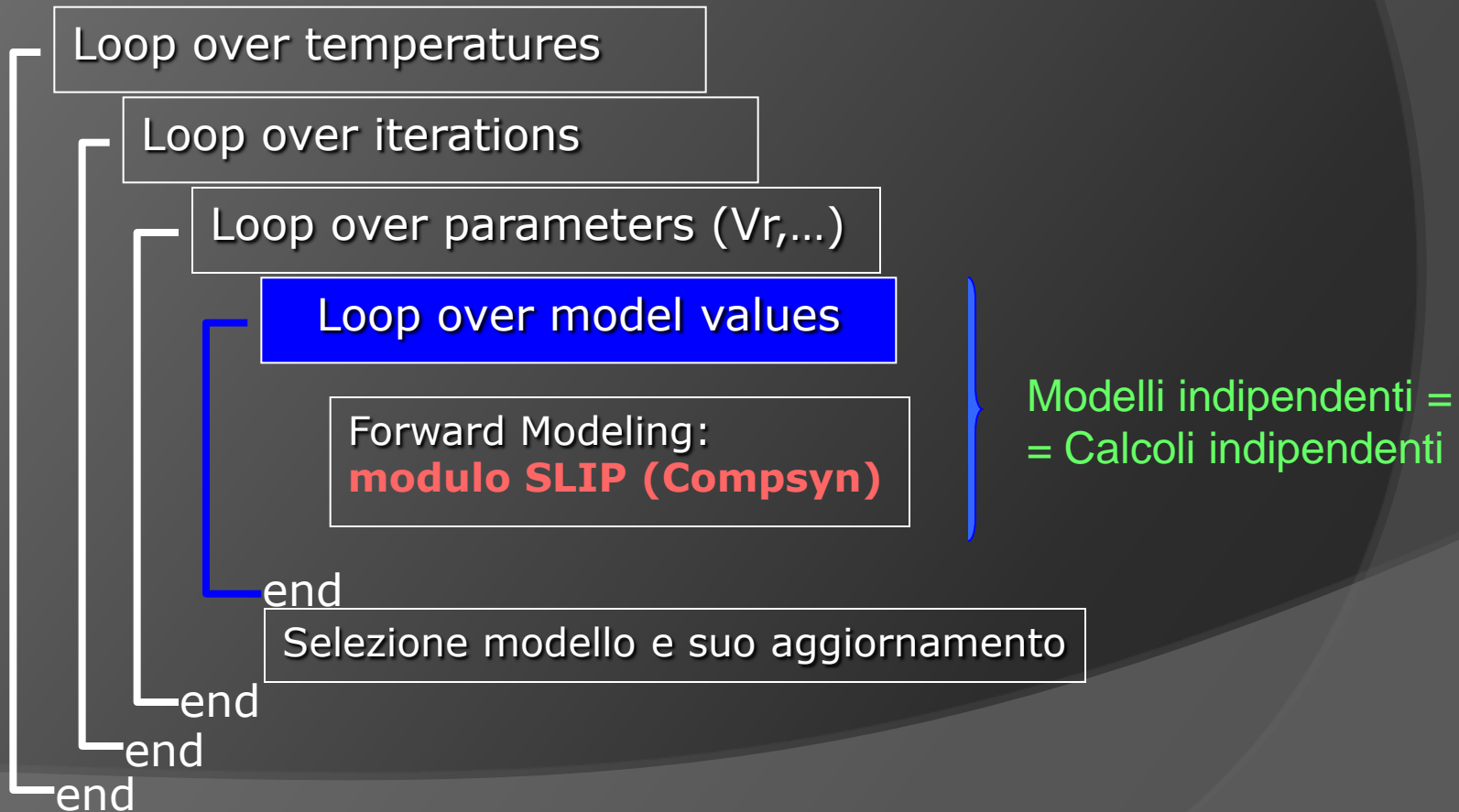
end

L'algoritmo di inversione: ottimizzazione 1

Carico computazionale elevato

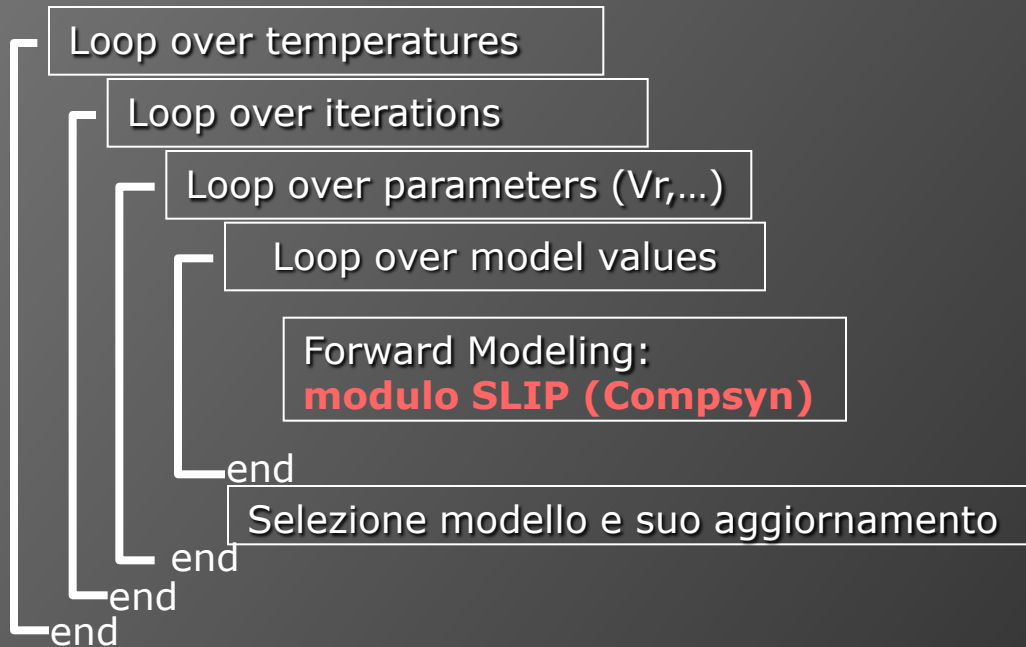
Run tipico: circa 100 ore (su singola CPU)

Possibile parallelismo sul ciclo più interno



L'algoritmo di inversione: ottimizzazione 2

Possibile parallelismo nel modulo **SLIP** nel ciclo più interno



- La struttura del modulo **SLIP** è molto simile alla struttura del modulo **TFAULT**
- TFAULT** è già stato ottimizzato per **GPU**!
- Il tempo di esecuzione tipico di un singolo run del modulo **SLIP** è di circa 0.5 sec!
L'ottimizzazione di **SLIP** per **GPU** potrebbe essere inefficiente

L'algoritmo di inversione: ottimizzazione 3

Modifica dell'algoritmo di "global search"

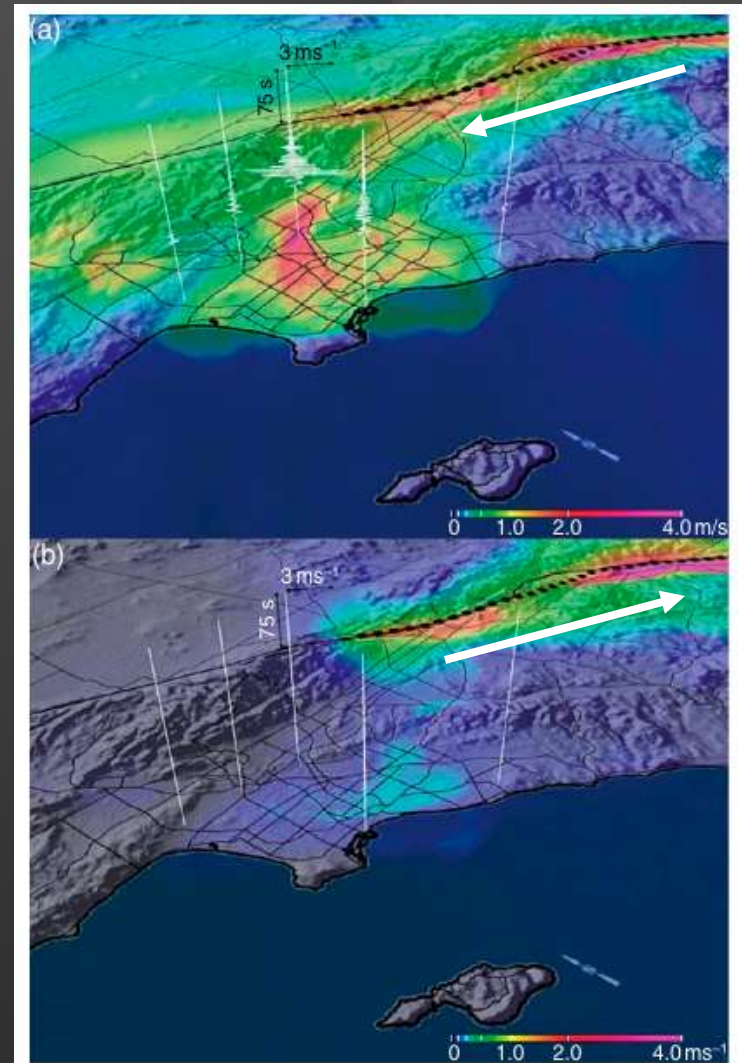
Simulated annealing (heat bath) -----> cluster Metropolis

-----> ??????

Previsione del moto del suolo

Lo scuotimento al suolo dipende fortemente dalle eterogeneità spazio-temporali della rottura

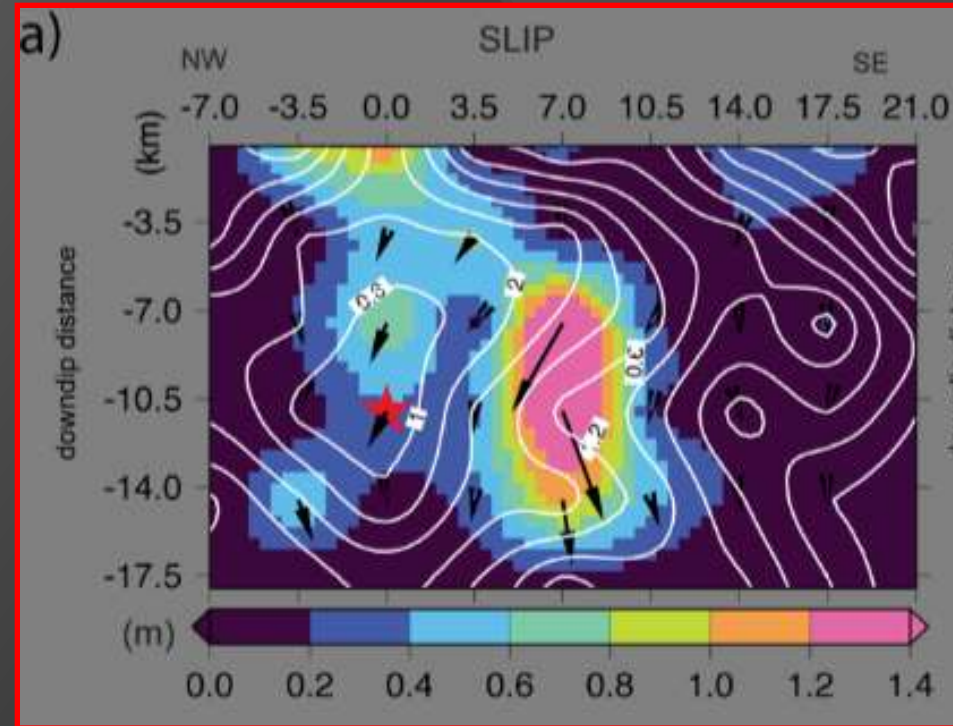
Bacino di Los Angeles:
Effetto della direttività della rottura lungo un segmento della faglia di San Andreas



Previsione del moto del suolo:

terremoto de L'Aquila 2009

Lo scuotimento al suolo dipende fortemente dalle eterogeneità spazio-temporali della rottura che avviene sul piano di faglia durante un terremoto.

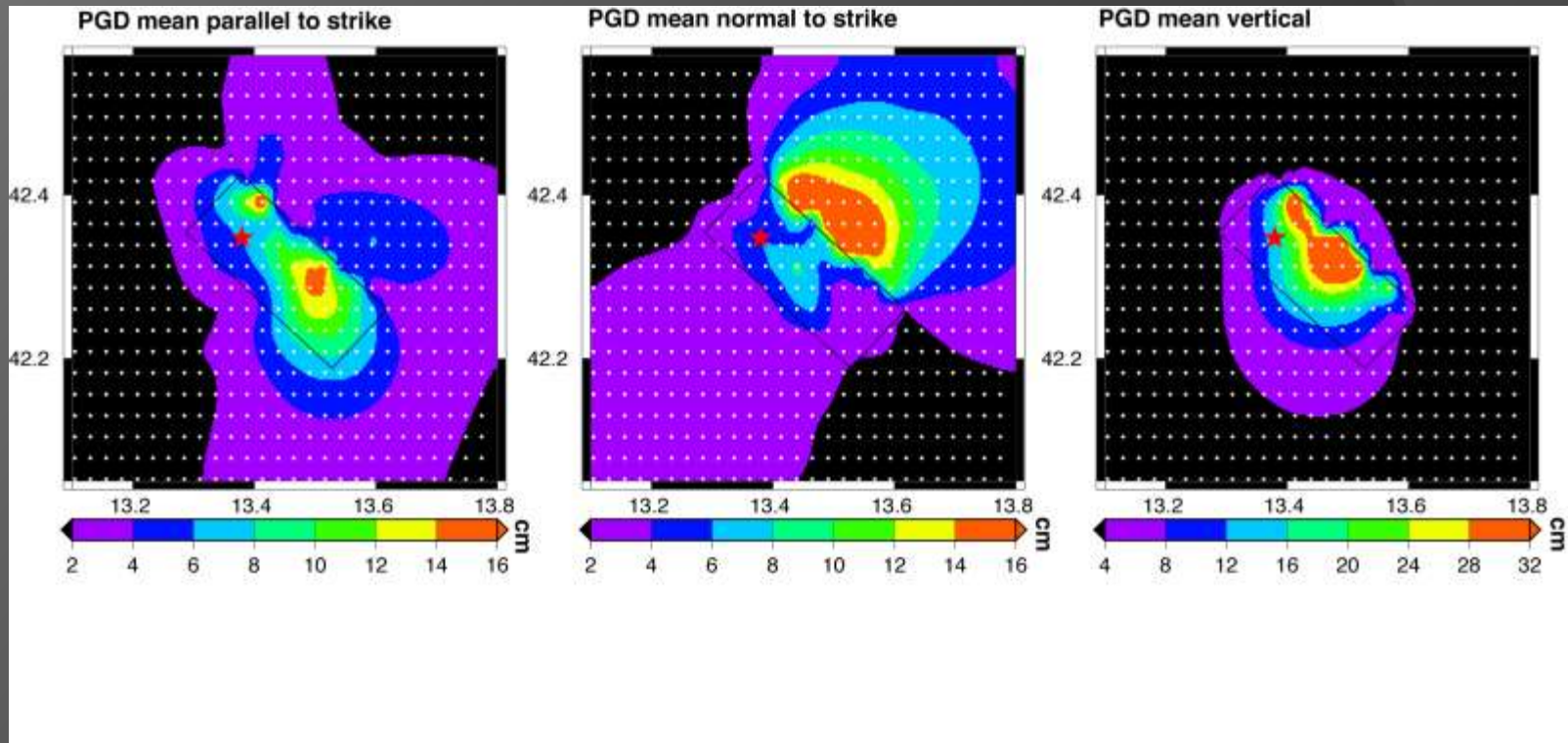


QuickTime™ and a decompressor are needed to see this picture.

Per ovviare alla copertura limitata di stazioni, consideriamo una griglia costituita da circa 800 siti virtuali, su cui calcoliamo i valori dei parametri significativi per la caratterizzazione del moto del suolo che si osserverebbe durante un evento sismico.

Previsione del moto del suolo: mappe di scuotimento (PGD), terremoto de L'Aquila 2009

PGD= Peak Ground Displacement



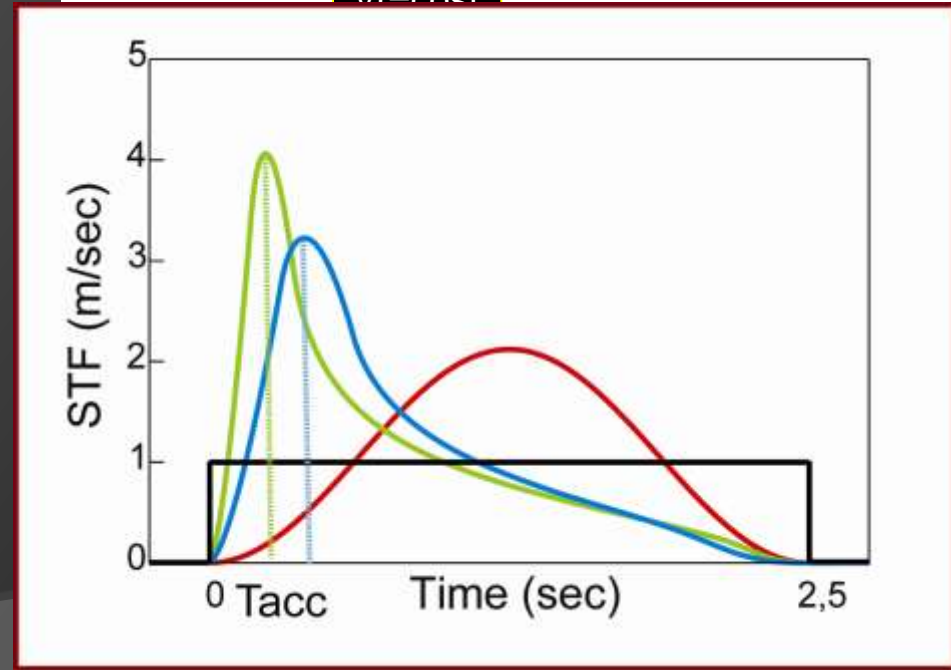
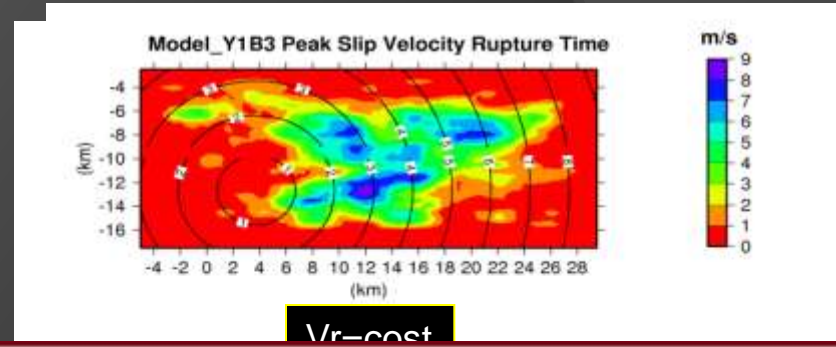
Shaking_Chain Package

➤ Strumento creato per studiare la variabilità del moto del suolo indotta dalla variabilità dei parametri della sorgente sismica

INGREDIENTI IN INPUT:

insieme di processi di rottura possibili ottenuti dalla combinazione dei parametri cinematici descrittivi una sorgente sismica. Fissata la geometria dei siti si variano:

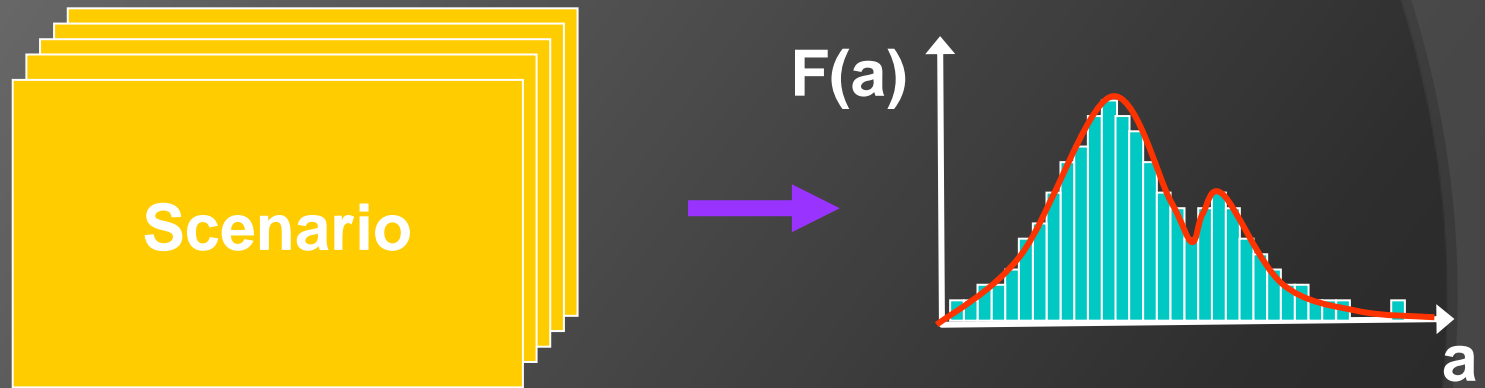
- ✓ distribuzioni di slip;
- ✓ posizione del punto di nucleazione;
- ✓ velocità di rottura;
- ✓ funzione sorgente;



v1 crescente con lo slip

Shaking_Chain Package

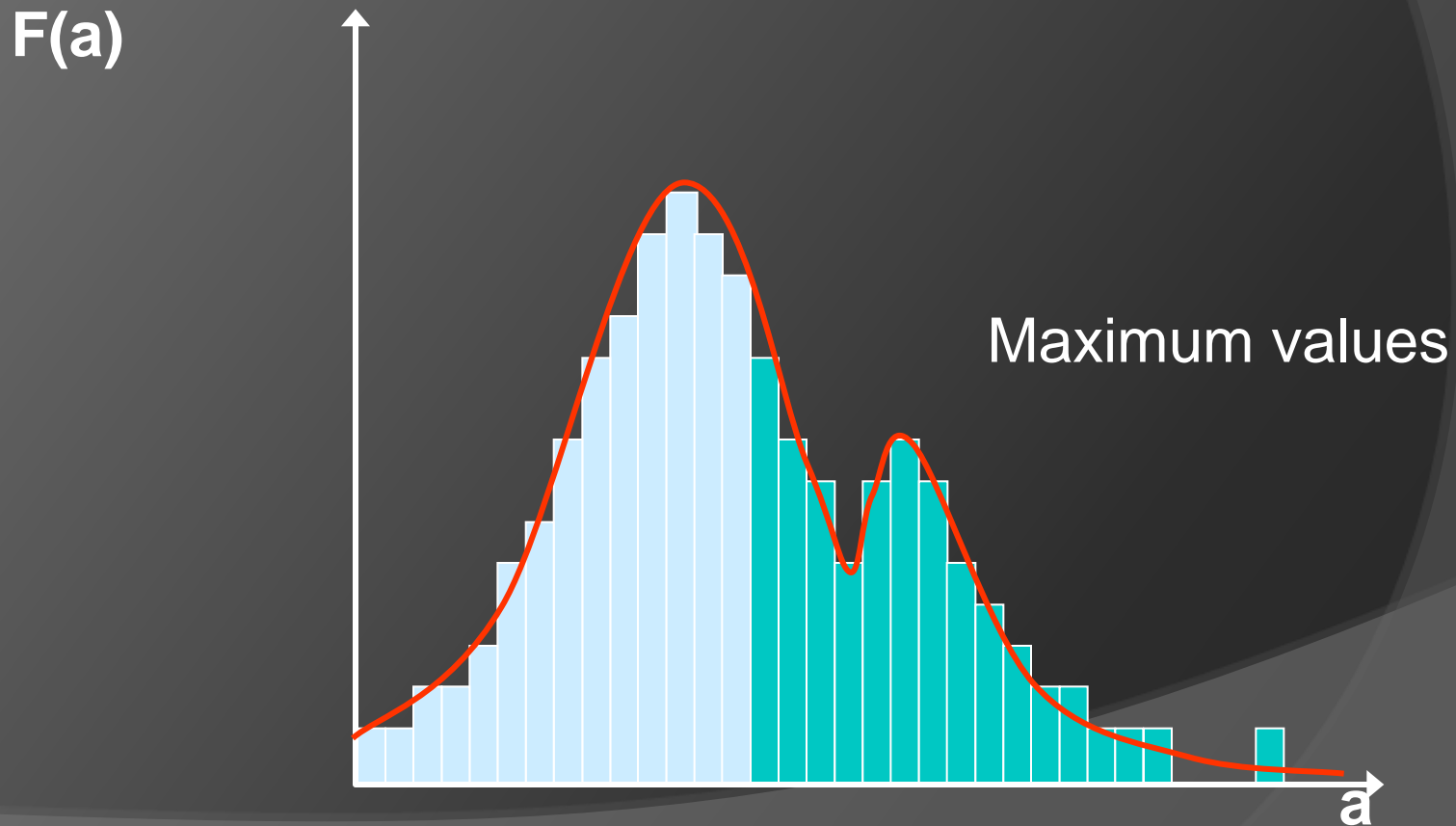
OUTPUT: distribuzioni dei parametri del moto del suolo...



per affrontare studi parametriciad esempio..

Shaking_Chain Package

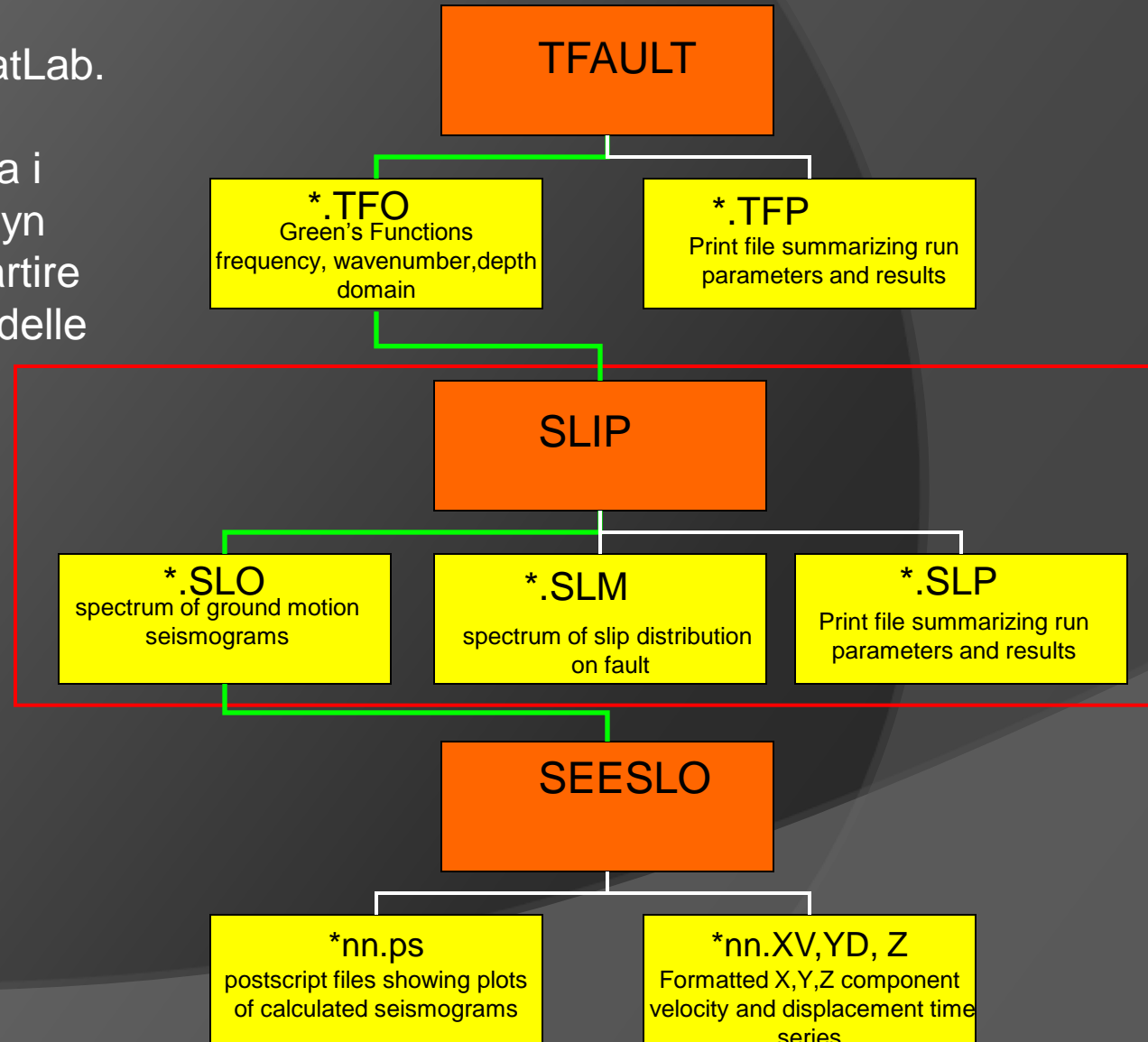
..selezione degli scenari che forniscono i valori massimi della distribuzione del parametro in analisi...etc,



Shaking_Chain Package: diagramma di flusso

L'algoritmo si basa su applicazioni FORTRAN e MatLab.

Il diagramma di flusso mostra i moduli del pacchetto Compsyn interessati dalla catena, a partire dalla generazione dell'array delle trazioni sul piano di faglia (modulo TFAULT).



Shaking_Chain Package: pseudo-codice

loop over slip distribution

loop over slip function

loop over the nucleation

loop over rupture velocity

Definizione scenario

call SLIP

call SEESLO

(Inverse Fourier Transform)

end loop

end loop

end loop

end loop

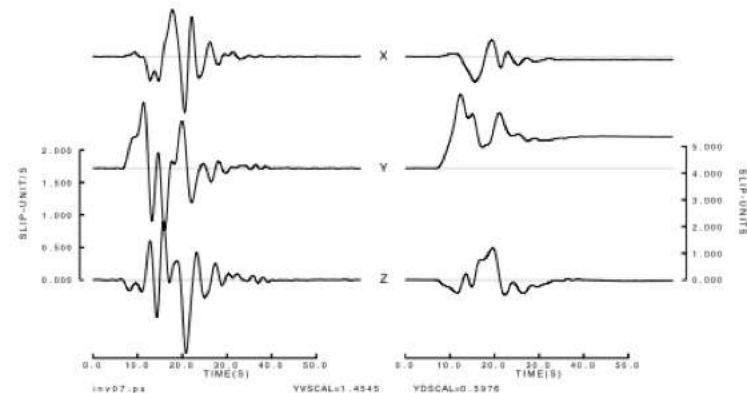
Produzione di sismogrammi e parametri del moto del suolo per ogni sito considerato

```
FILE: slip.SLO      RNPWS = 12.0RNPWT = 12.0
OBSERVED AT: 1.19  42.60
UMIN = -7.00UMAX = 21.00  VMIN = 0.50VMAX = 18.00
TAPER FREQUENCY = 0.00  0.00  0.45  0.65
DIP = 54.0         OLSON RESOLVING FREQUENCY = 1.70
RUPTURE VELOCITY/SHEAR VELOCITY = 1.00
MOMENT = 3.38 E25  DYNE*SLIP-UNIT
```

VELOCITY

COMP

DISPLACEMENT



Shaking_Chain Package: ottimizzazione 1

Parallelismo imbarazzante: ogni scenario (modello di rottura, $N_M \sim 1000$)
è un calcolo indipendente

```
loop over slip distribution
  loop over slip function
    loop over the nucleation
      loop over rupture velocity
```

```
        Definizione scenario
        call SLIP
        call SEESLO
        (Inverse Fourier Transform)
```

} Ogni scenario è un
calcolo indipendente

```
      end loop
    end loop
  end loop
end loop
```

Shaking_Chain Package: ottimizzazione 2

Tuttavia, se siamo interessati a sismogrammi ad alta frequenza, il modulo SLIP è pesante a livello computazionale

Quindi una ottimizzazione di SLIP su GPU (come fatto per TFAULT) può rappresentare una valida alternativa

```
loop over slip distribution
  loop over slip function
    loop over the nucleation
      loop over rupture velocity
```

```
Definizione scenario
call SLIP
call SEESLO (IFFT)
```

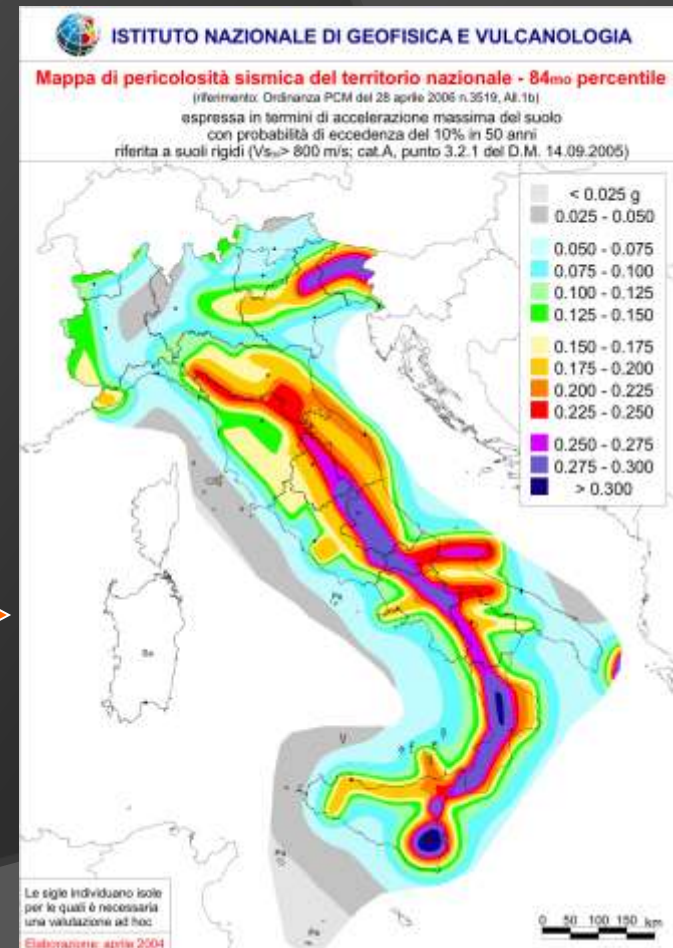
```
      end loop
    end loop
  end loop
end loop
```

Applicazioni: mappa di pericolosità sismica

Il software Shaking_chain può essere utilizzato per simulare il moto del suolo prodotto da tutte le sorgenti sismiche note e per generare le future mappe di pericolosità sismica.



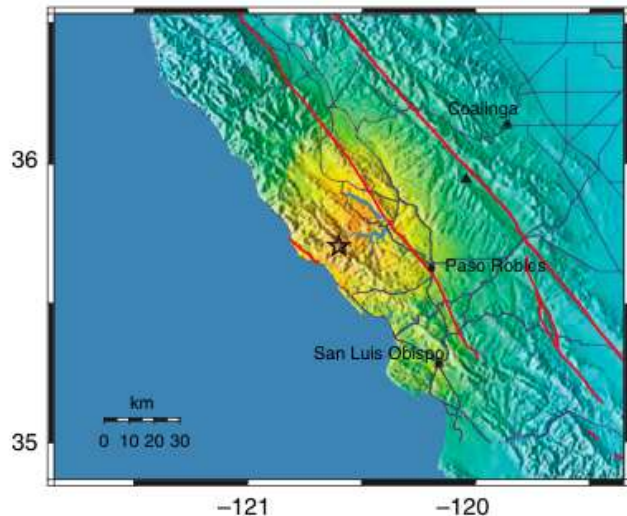
Shaking_Chain



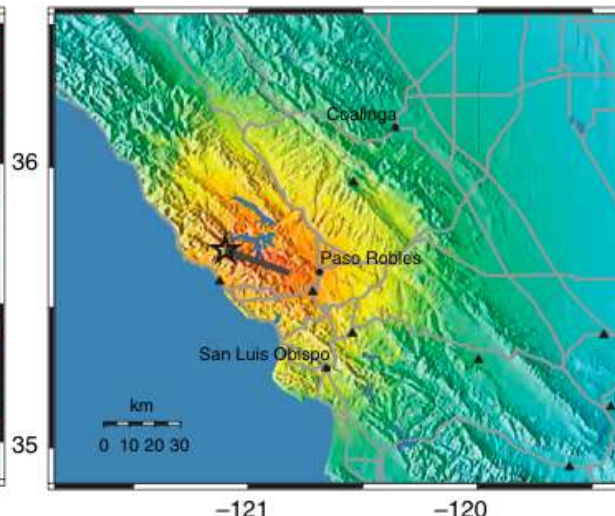
Applicazioni: ShakeMaps

- Il concetto di una ShakeMaps è quello di acquisire rapidamente le informazioni sul moto del suolo e produrre una mappa di valori di picco dello scuotimento
- Tuttavia, la limitata copertura di stazioni rende necessaria l'integrazione dei valori misurati con valori predetti ai siti dove le stazioni non sono presenti.
- L'inclusione degli **effetti di sorgente finita** fornisce una ShakeMaps più realistica

(a) Automatic (M_w) ShakeMap



(d) Current ShakeMap with line source

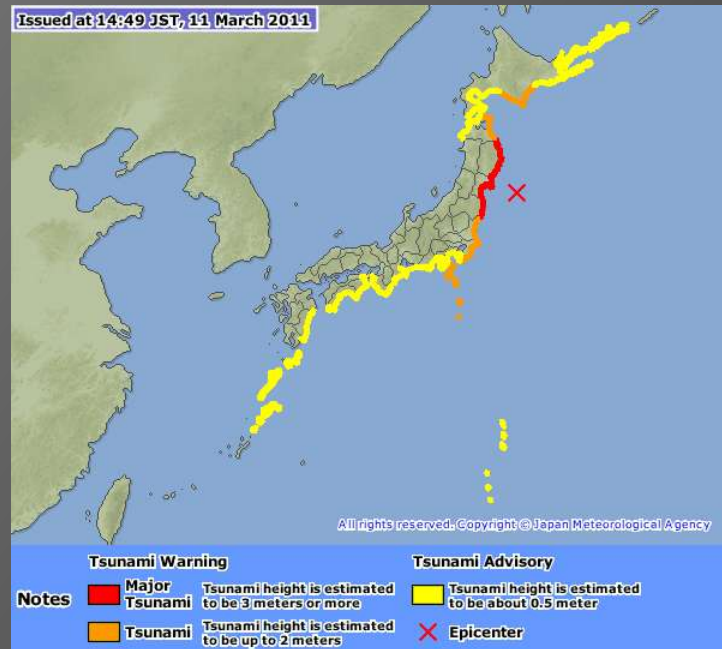


Applicazioni: previsione e allerta rapida tsunami (1)

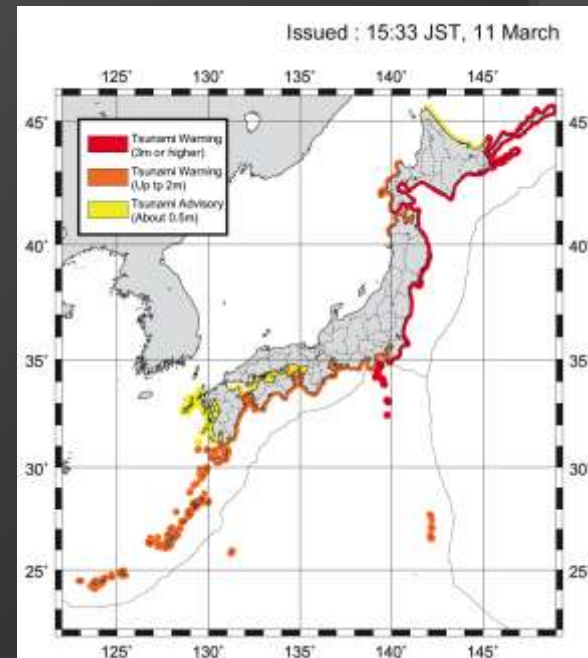
Tsunami in Giappone, marzo 2011.

Il sistema giapponese di allerta tsunami ha permesso di salvare centinaia di migliaia di vite umane. Tuttavia ha fortemente sottostimato l'entità del fenomeno.

dopo 3 min



dopo 47 min



A posteriori il Giappone sta rivedendo l'intero sistema perché lo ritiene non adatto in caso di megatsunami.

Per lanciare un'allerta più precisa si dovrebbe essere in grado di stimare correttamente la distribuzione di slip in tempo utile.

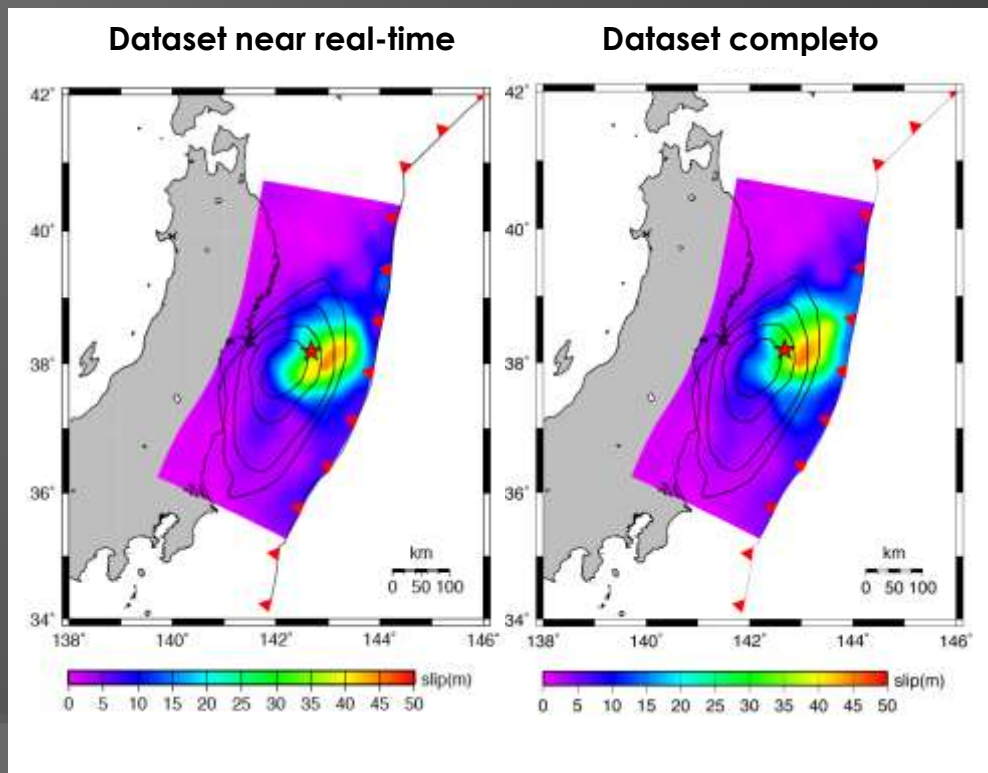
Applicazioni: previsione e allerta rapida tsunami (2)

Il terremoto-tsunami del Giappone, grazie alla quantità e qualità di dati permette di fare, a posteriori, esperimenti di determinazione rapida della sorgente.

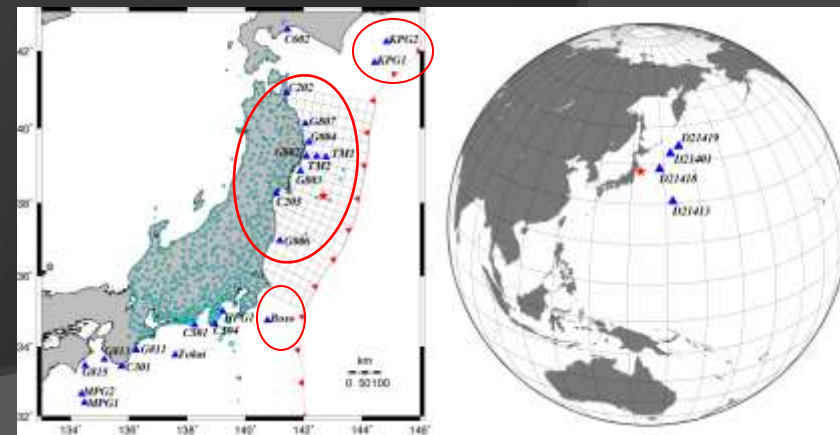
35-40 minuti: arrivo delle onde più grandi sulla costa

20-25 minuti: dati disponibili in tempo reale sufficienti per ricostruire la sorgente

Con un **codice di inversione veloce** è possibile, in linea di principio, stimare correttamente la sorgente e lanciare un'allerta più precisa



- GPS-Buoys
 - Bottom pressure gauges
 - GPS on land
 - GPS acoustic transponders
- < 20-25 minuti**



Fine

alessio.piatanesi@ingv.i

†