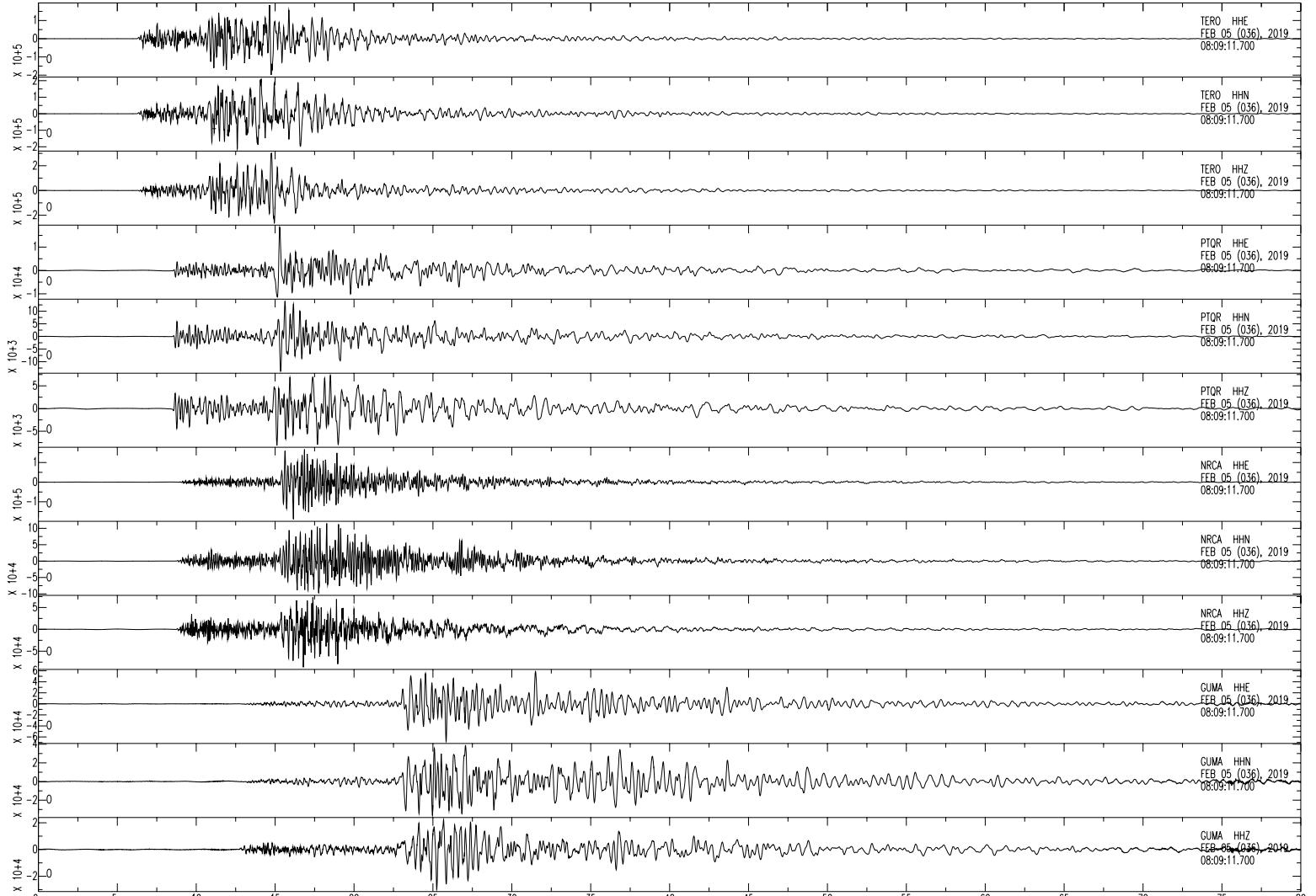




Localizzazione dei terremoti

Esempio di onde sismiche registrate da stazioni italiane a seguito di un terremoto avvenuto vicino a L'Aquila, di magnitudo ML=3.6 il 5 febbraio 2019.



Osserviamo diversi treni d'onda che distano tra loro alcuni secondi.

Sismogrammi

Sui sismogrammi si individuano le fasi sismiche (ampiezze che emergono e si distinguono osservando le tracce). Ogni fase è caratterizzata da:

- un particolare percorso nell'interno terrestre;
- un'ampiezza e un tempo di arrivo.

Le fasi sono molteplici e dipendono dalla distanza evento-stazione.

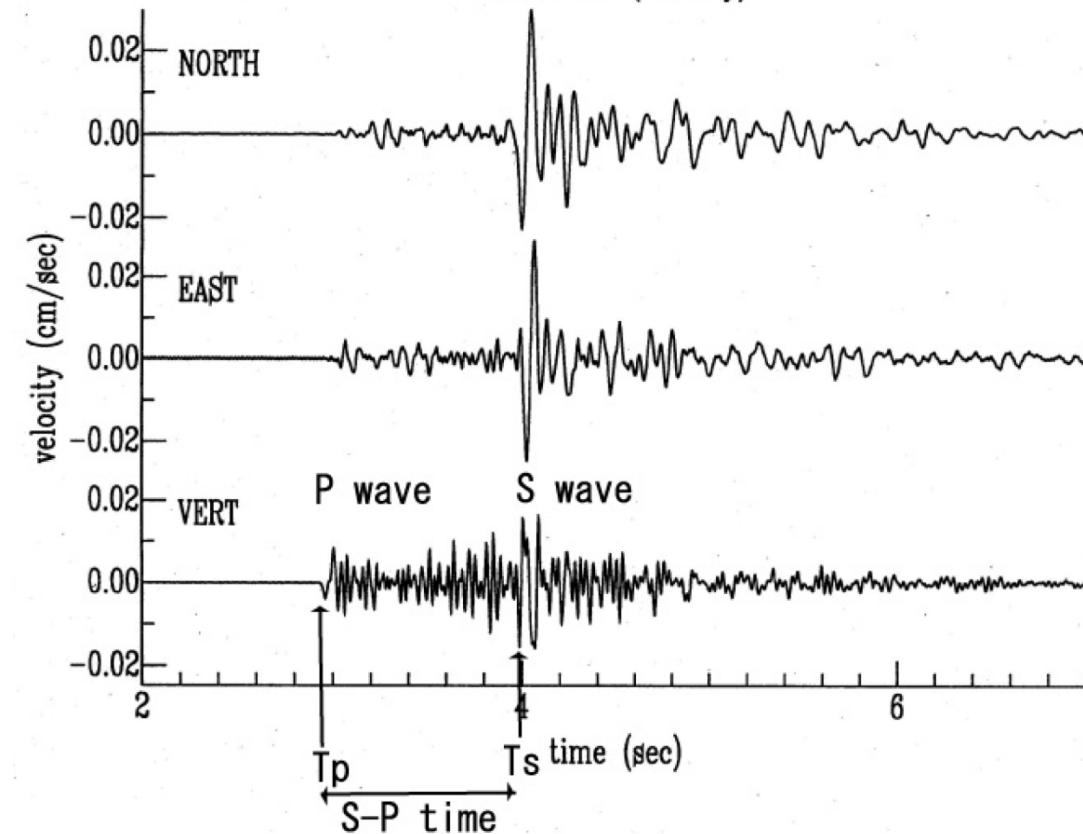


Fig. 2.1 Three-components waveforms of a local earthquake.

Sismogrammi

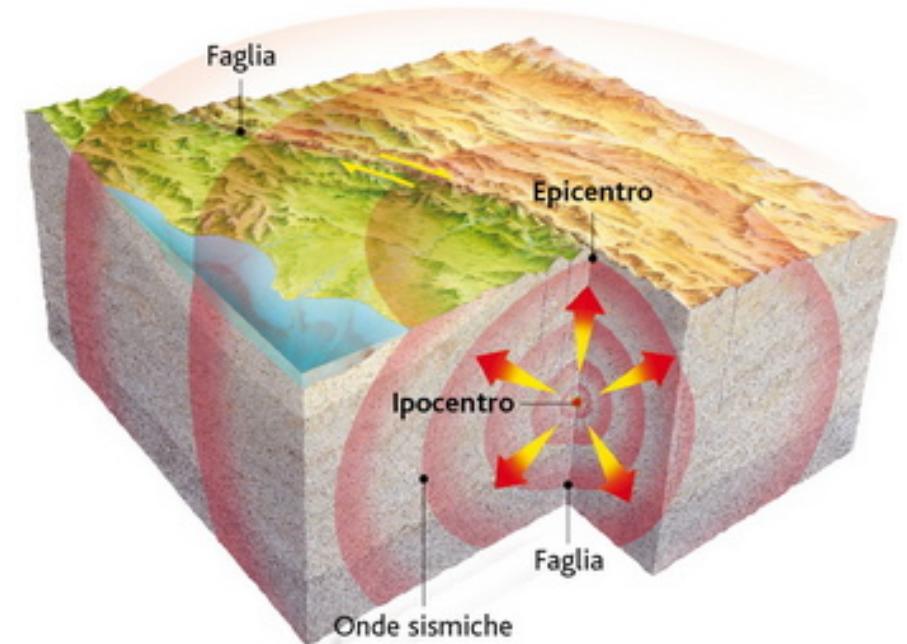
In base alla distanza di osservazioni le registrazioni dei terremoti sono classificate secondo:

- 1) Distanze locali, ovvero distanze epicentrali inferiori a 100 km, in cui i sismogrammi sono dominati da effetti di propagazione attraverso la crosta e sulle registrazioni è possibile distinguere le fasi P e S dirette che sono seguite da fasi secondarie e più complesse
- 2) Distanze regionali, ovvero distanze epicentrali tra i 100 km e 1400 km, in questo caso i sismogrammi sono dominati da fasi sismiche rifratte e riflesse lungo la discontinuità crosta-mantello (che vedremo nelle prossime lezioni).
- 3) Distanze telesismiche, ovvero distanze epicentrali superiori a 3300 km, che mostrano bene gli arrivi diretti P e S (entro i 95° di distanza) seguiti da una molteplicità di arrivi di onde che attraversano il mantello e che sono riflesse più volte tra la superficie terrestre e il nucleo.

Ipocentro e localizzazione

L'**ipocentro** è il luogo all'interno della terra dove un terremoto si enuclea ed è definito da latitudine, longitudine e profondità dalla superficie terrestre.

L'**epicentro** è la proiezione in superficie dell'ipocentro.



Ipo centro e localizzazione

- Il **tempo origine** rappresenta l'istante di tempo in cui l'onda è stata generata (ovvero quando è avvenuta la sorgente).
- Il **tempo di arrivo** delle onde ci fornisce l'informazione del tempo di viaggio (**travel time**) che le onde hanno impiegato per attraversare il mezzo e raggiungere il ricevitore.

Localizzazione

La localizzazione dei terremoti è un tipico problema inverso che consiste nella determinazione delle coordinate spaziali (ipocentro) e dell'istante di tempo (tempo origine) dell'occorrenza del terremoto.

Vengono utilizzati come informazioni di partenza i tempi dei primi arrivi delle onde sismiche primarie (P ed S) alle varie stazioni che hanno registrato l'evento stesso.

Localizzazione

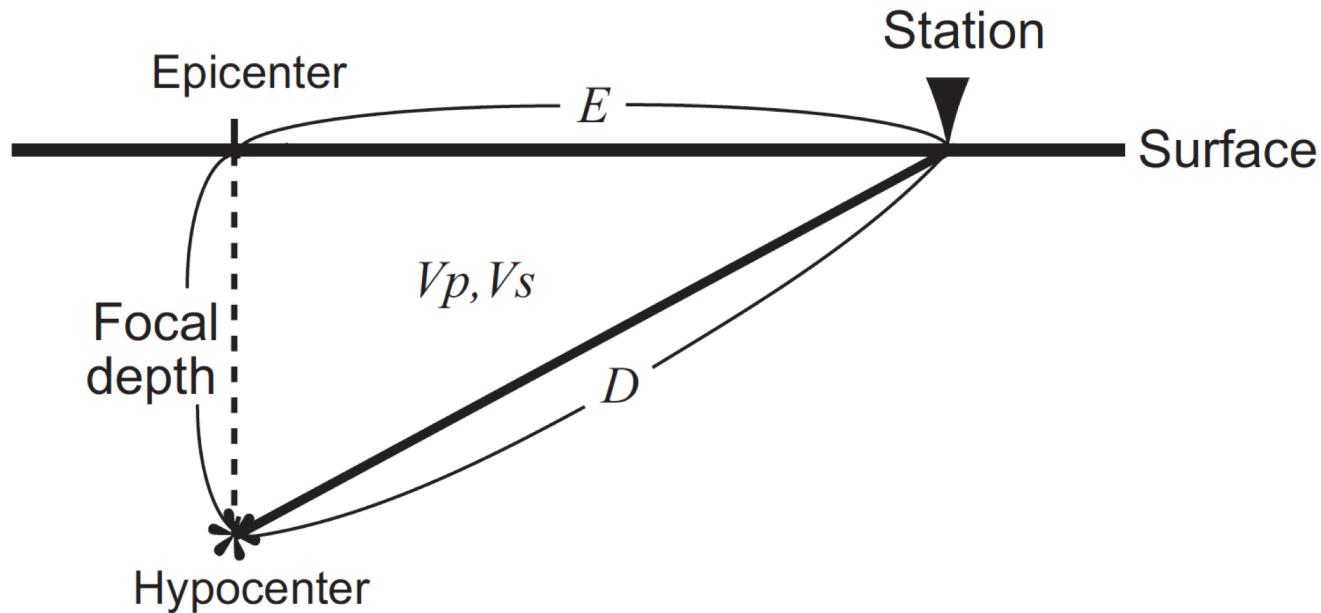
La conoscenza del modello di propagazione che determina il percorso dei raggi sismici e quindi i tempi di arrivo delle onde sismiche dalla sorgente ai ricevitori è di cruciale importanza.

Nei problemi di localizzazione, anche moderni, il modello di velocità viene assunto come informazione a priori.

Localizzazione

A partire dalle fasi P e S lette sui sismogrammi si determina l'ipocentro del terremoto, ovvero si ricavano le 4 incognite relative alla posizione ipocentrale:

- a) Latitudine, Longitudine
- b) Profondità
- c) Tempo Origine (quando si è verificato, es: 01/10/2015 hh 23:40:15)



Localizzazione

Come si stima il tempo origine di un evento?

Tempo origine dell'evento

Tempo di arrivo onda P

$$t_p = t_o + x/V_p$$

Tempo di arrivo onda S

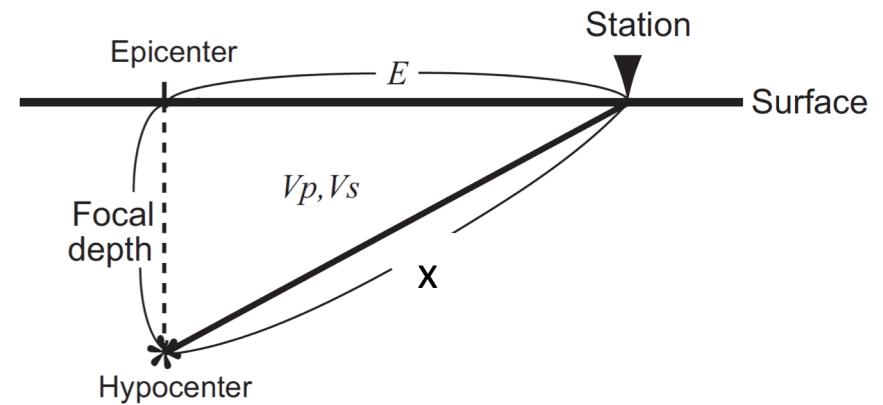
$$t_s = t_o + x/V_s$$

t_o è il tempo origine

Il secondo termine è il travel time (tempo di viaggio) dell'onda P e onda S, rispettivamente.

$$t_s - t_p = x/V_p [V_p/V_s - 1]$$

$$t_s - t_p = t_p [V_p/V_s - 1] - t_o [V_p/V_s - 1]$$



Tempo origine dell'evento

$$t_s - t_p = t_p \left[\frac{V_p}{V_s} - 1 \right] - t_o \left[\frac{V_p}{V_s} - 1 \right]$$

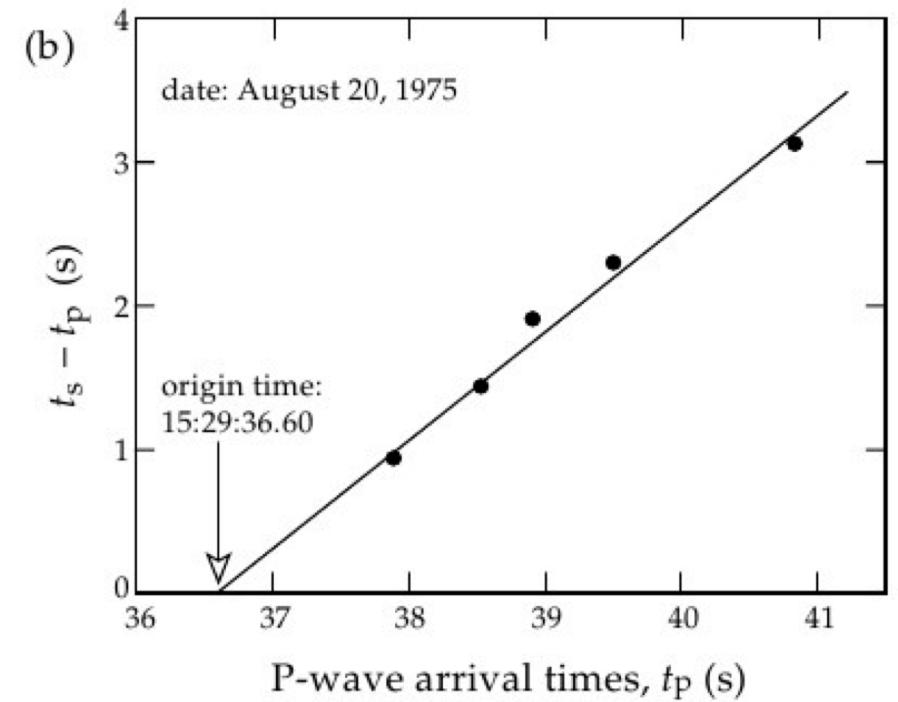
y x

$$y = mx + q$$

Esempio di tempi di arrivo t_p e differenza di tempi di arrivo $t_s - t_p$ per 5 diverse stazioni.

In linea teorica la pendenza della retta mi da info sulle velocità del mezzo e l'intercetta all'asse x (ovvero $y=0$) mi da informazioni sul tempo origine.

Diagramma di Wadati



Localizzazione

Un altro modo semplice per ricavare il tempo origine (quando si ipotizza a priori una struttura Vp e Vs) è calcolare la media dei vari «tempo origine» ottenuti per ogni stazione.

$$t_s - t_p = t_p \left[\frac{V_p}{V_s} - 1 \right] - t_o \left[\frac{V_p}{V_s} - 1 \right]$$

$$t_o = t_p - \frac{(t_s - t_p)}{\left[\frac{V_p}{V_s} - 1 \right]}$$

$$t_o = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{ip} - \frac{(t_{is} - t_{ip})}{\left[\frac{V_p}{V_s} - 1 \right]}$$

Come si calcola latitudine e longitudine ?

Latitudine e Longitudine dell' Ipocentro

Conoscendo il tempo origine t_o si trasforma il tempo di arrivo in tempo di percorso (traveltime)

$$T_p = t_p - t_o$$

Per un valore costante di V_p (è un'approssimazione) nei primi chilometri della crosta terreste, possiamo stimare la distanza dell'evento da quella determinata stazione.

$$D = V_p T_p$$

Vuol dire che il raggio sismico, partendo dall'ipocentro, ha percorso una distanza = D

Latitudine e Longitudine dell' Ipocentro

Se non conosciamo il tempo origine t_o possiamo ricavare la distanza ipocentrale:

$$D = T_p V_p = \frac{(t_s - t_p) V_s}{(V_p - V_s)} V_p = \frac{V_p}{\frac{V_p}{V_s} - 1} (t_s - t_p) = k(t_s - t_p)$$

$$k = \frac{V_p}{\frac{V_p}{V_s} - 1}$$

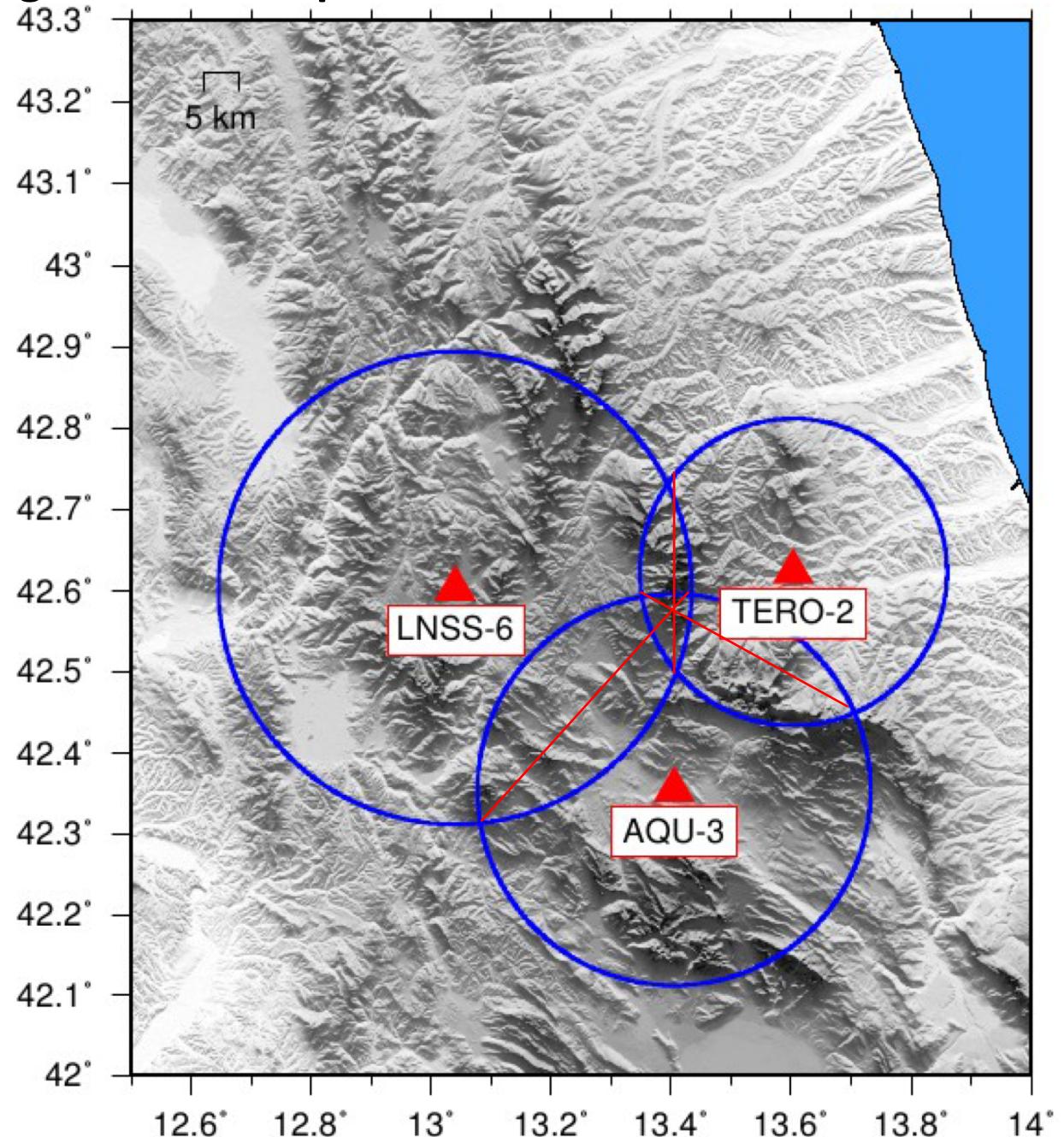
Se ipotizziamo per la crosta superiore $V_p = 6$ km/s e se ipotizziamo un mezzo di Poisson ($\frac{V_p}{V_s} = 1.73$); allora k è circa 8 km/s. Quindi per avere una stima immediata e approssimata della distanza ipocentrale basta calcolare $8(t_s - t_p)$.

Latitudine e Longitudine dell' Ipocentro

Metodo Grafico

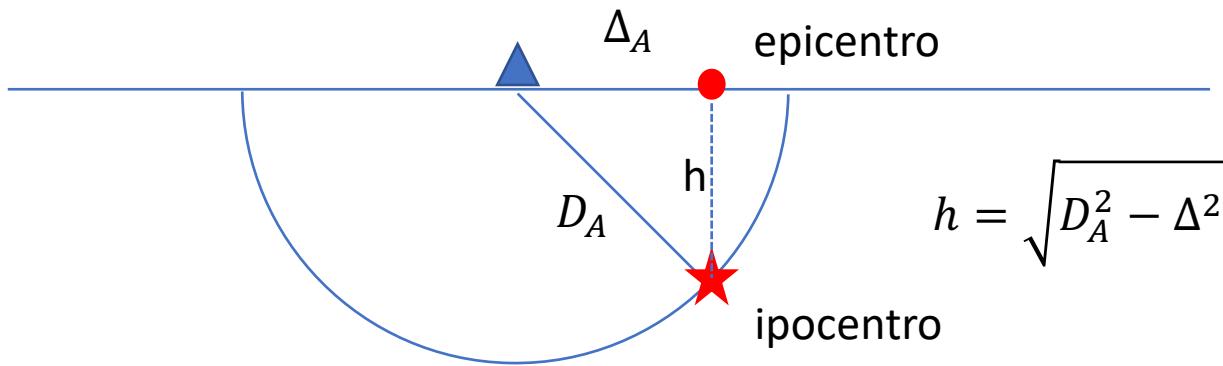
Dalla stazione si traccia una semisfera di raggio D che in superficie è una circonferenza di raggio D. L'epicentro giace su un punto della circonferenza.

Le circonferenze si intersecano definendo UN'AREA. L'epicentro è al centro di questa area e corrisponde all'incrocio delle secanti.



Profondità ipocentrale

Stazione A

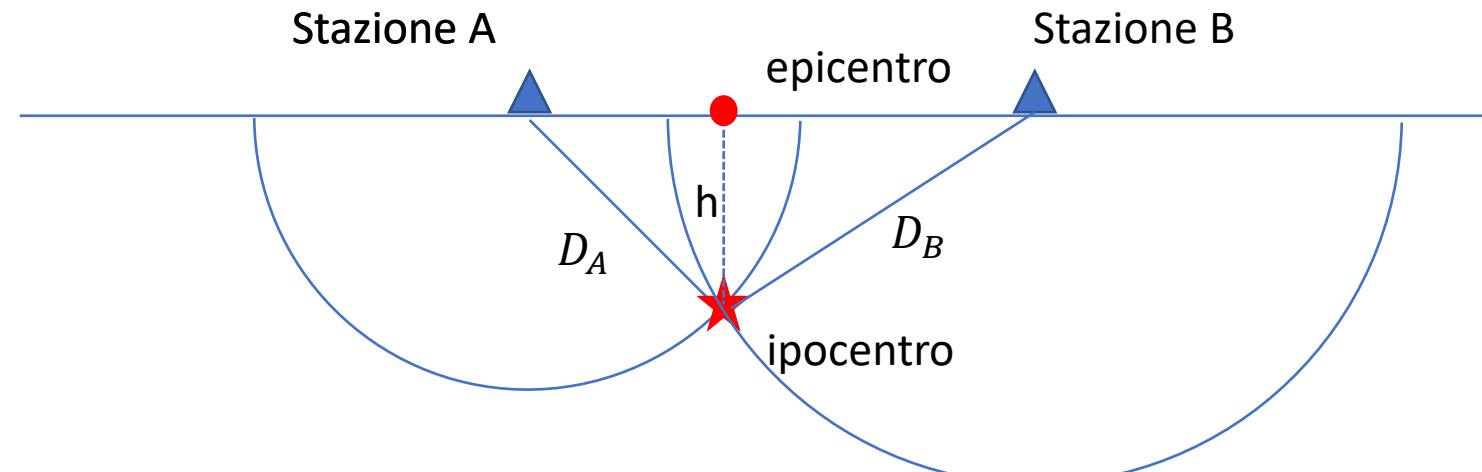


$$h = \sqrt{D_A^2 - \Delta_A^2}$$

Semisfera di raggio

$$D_A = V_p T_p$$

h (incognita) si calcola per ogni stazione utilizzata per calcolare l'epicentro, quindi si mediano i valori



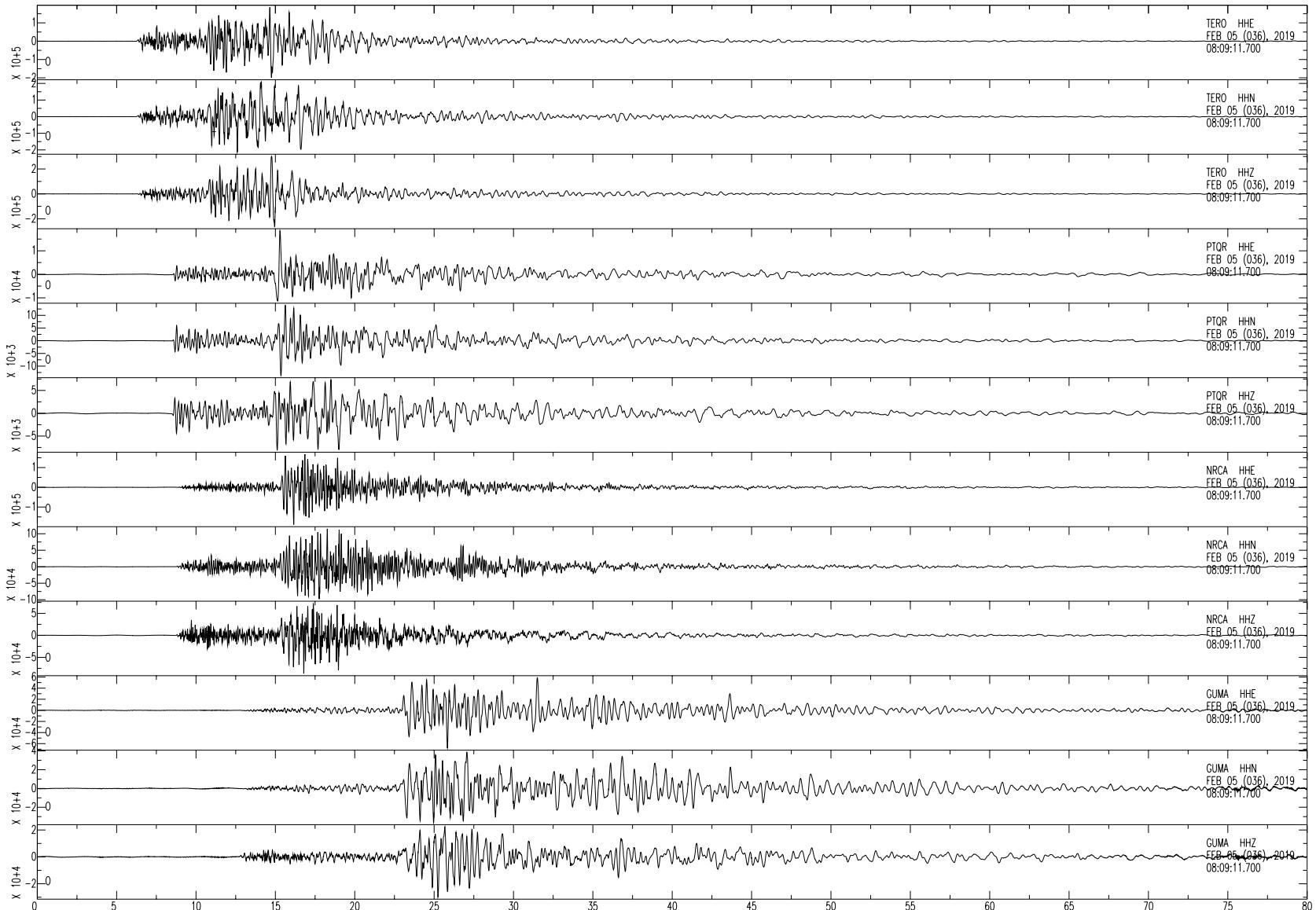
Esempio di localizzazione senza errori e incertezze

Esercitazione:

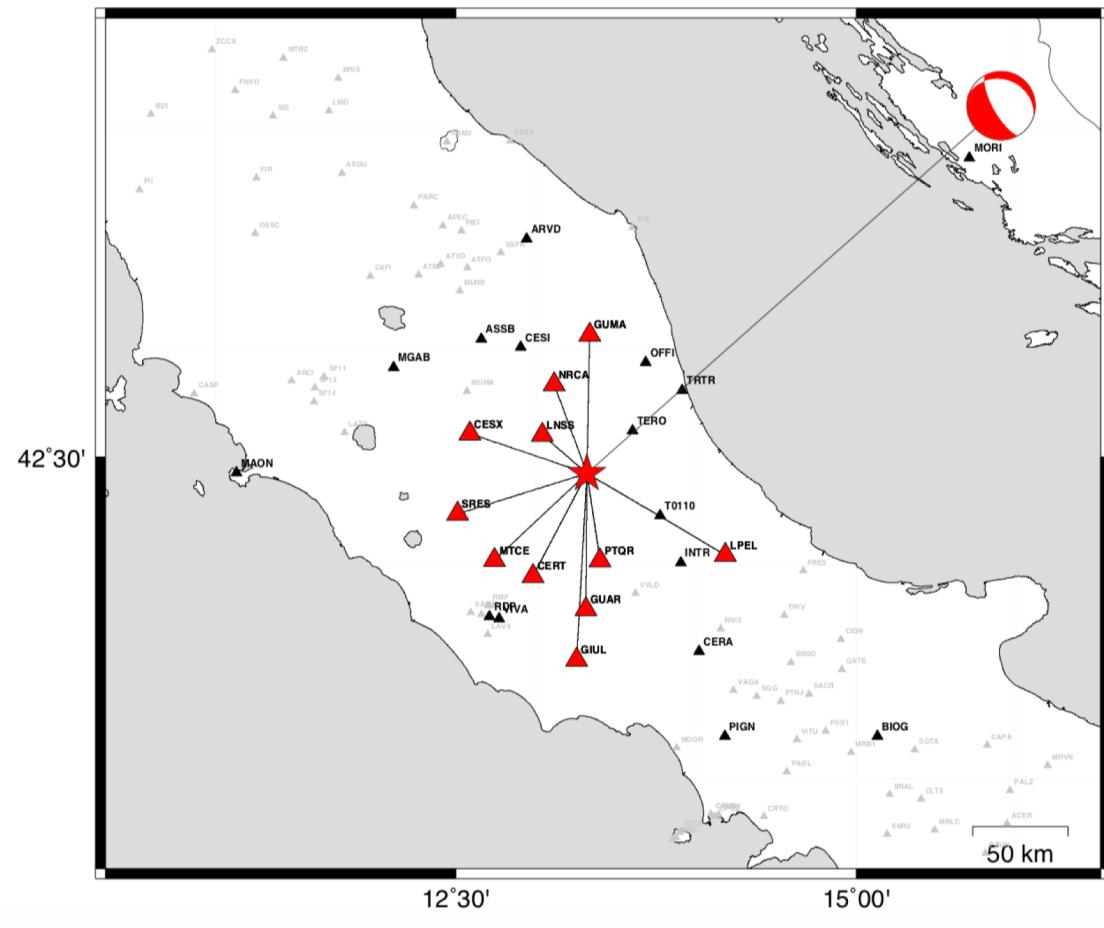
Test con sismogrammi reali

Sismogrammi reali di quattro stazioni poste a diversi azimut e distanze dalla sorgente.
Lo zero dei sismogrammi non rappresenta il tempo origine.

Ricavare tempo origine e distanze epicentrali delle stazioni, sapendo che la depth=9 km.



Localizzazione fatta in sala sismica



Dalla localizzazione della sala sismica effettuata con molte più stazioni otteniamo le seguenti distanze epicentrali

FILE: IV.GUMA.HHZ.SAC - 1

dist = 7.087557e+01

FILE: IV.NRCA.HHZ.SAC - 2

dist = 4.840668e+01

FILE: IV.PTQR.HHZ.SAC - 3

dist = 4.525637e+01

FILE: IV.TERO.HHZ.SAC - 4

dist = 3.213432e+01

Tipo	Magnitudo	Tempo origine (UTC)	Latitudine		Profondità (km)	Ora pubblicazione (UTC)	Autore	ID Localizzazione
			Longitudine					
Rev 1000 ★	ML 3.6	2019-02-05 08:09:11	42.42	13.31	9	2019-02-06 09:29:41	Bollettino Sismico Italiano INGV	65253201

Parametri della localizzazione preferita

Localizzazione

Campo	Valore
Tempo (UTC)	2019-02-05 08:09:11 ± 0.04
Latitudine	42.42 ± 0.00
Longitudine	13.31 ± 0.00
Profondità (km)	9 ± 0 (<i>from location</i>)
Metodo di valutazione	manual
Stato della valutazione	reviewed
Versione	1000 -> BULLETIN-INGV
Tipo di evento	earthquake
ID localizzazione	65253201

Incerezze

Campo	Valore
Tipo di incertezza	uncertainty ellipse
Semi-asse maggiore dell'ellisse di confidenza (metri)	180
Semi-asse minore dell'ellisse di confidenza (metri)	161
azimuth dell'asse maggiore dell'ellisse di confidenza (gradi)	70
Regione di confidenza sul piano orizzontale espressa mediante singolo valore di incertezza (metri)	180
Livello di confidenza dell'incertezza (%)	68

Qualità

Campo	Valore
Maggiore gap azimutale nella distribuzione delle stazioni all'epicentro	32
Numero di fasi associato indipendentemente se utilizzate nella localizzazione (determinazione dell'Origin')	144
Numero di fasi	144
Scarto quadratico medio dei residui di tempo risultanti dal calcolo del tempo origine (Origin) della localizzazione (sec)	0.17
Distanza epicentrale della stazione piu' vicina (gradi)	0.11152
Distanza epicentrale della stazione piu' lontana (gradi)	4.29246
Numero di stazioni in cui l'evento e' stato osservato	122
Numero di stazioni usate nel calcolo dell'Origin	122