

LA STAZIONE GEOFISICA IPOGEA DELLA GROTTA GIGANTE (CARSO TRIESTINO)

Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Trieste (DST)
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)

Convenzione INGV - DST

Prot. Nr. (INGV) 1189 del 16.04.2002

Prot. Nr. (DST) 72/02 del 22.04.2002

Rapporto annuale
Luglio 2008

Responsabile Scientifico: Dr. Carla Braitenberg

Collaboratori:

DST:

Prof. Maria Zadro

Dr. Ing. Ildikò Nagy

Dott. Barbara Grillo

Dott. Patrizia Mariani

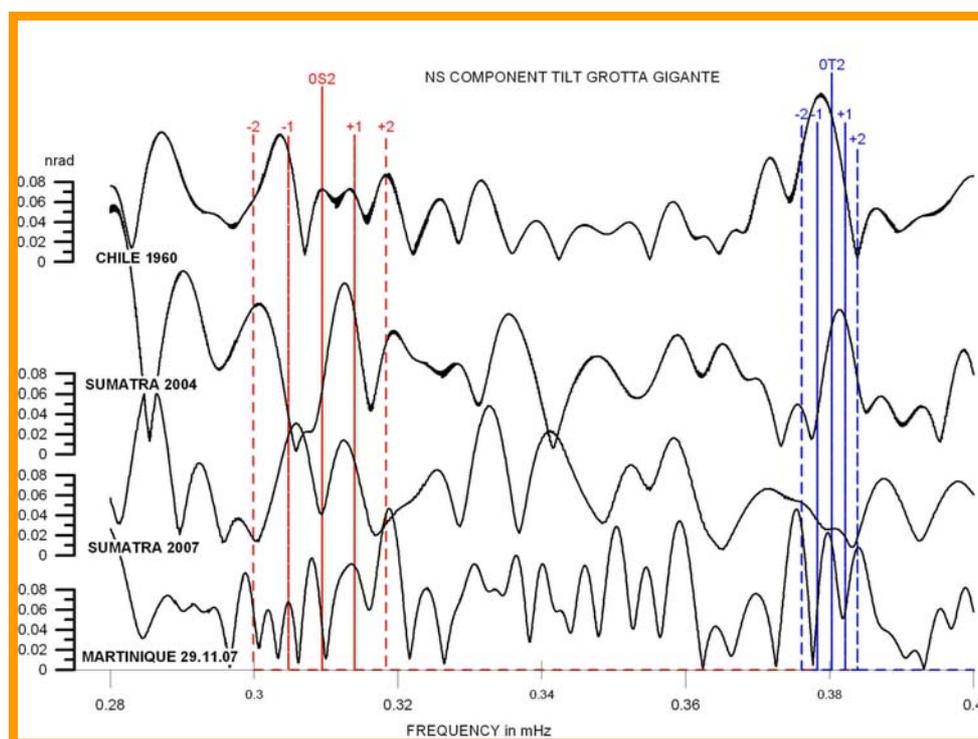
Dipl. Tecn. Sergio Zidarich

INGV:

Dr. Gianni Romeo

Dr. Quintilio Taccetti

I modi delle oscillazioni libere registrati con i pendoli della Grotta Gigante



Indice

1 Introduzione

2 Illustrazione della strumentazione geodetica e del database

2.1. Pendoli orizzontali a lungo periodo-LPHP, clinometri -MPT

2.1.1 Principio di funzionamento del clinometro di tipo Zöllner

2.1.2 Fattore di amplificazione statico

2.2 Funzione di trasferimento del pendolo LPHP per spostamenti del suolo nel caso dinamico

3 Fattori di amplificazione-aggiornamento della taratura dell'acquisizione digitale

4 Osservazioni delle inclinazioni della verticale e di parametri ambientali per il periodo 2007- 2008.

5 Analisi del tilting di periodicità annuale rivelato dai pendoli

6 Osservazioni dei pendoli LPHP con acquisizione digitale nell'ambito di frequenze delle onde sismiche

7 Modi d'oscillazione libera osservati con i pendoli della Grotta Gigante.

8 Tilting a lungo periodo della Grotta Gigante a confronto con due stazioni operanti nella fascia sismica pedemontana.

9 Ringraziamenti

10 Riferimenti bibliografici

11 Pubblicazioni recenti del gruppo di lavoro (dal 2003)

1 - Introduzione

La registrazione continua dei pendoli della Grotta Gigante ha nel 2008 la notevole durata di 42 anni. L'eccellente qualità delle registrazioni e l'eccezionale durata della serie temporale permettono di seguire la deformazione crostale nel tempo in maniera ottimale.

Un'importante osservazione concerne la deformazione secolare, che si dimostra essere composta da una deriva lineare, alla quale si somma una variazione più complessa. Mentre il movimento medio avviene verso N57W con un tasso di 27 nrad/anno, troviamo una variazione sovrapposta che determina un'accelerazione e decelerazione di questo movimento con un periodo apparente di 33 anni. Tale osservazione è importante per i tassi di deformazione calcolati anche con stazioni GPS, che normalmente vengono assunti essere lineari, non avendo a disposizione un numero sufficiente di anni per vedere eventuali deviazioni da una deriva lineare.

Un segnale evidente compreso nelle registrazioni è quello con periodicità annuale, che ha una direzionalità molto ben definita, con azimuth N60E. Il tilting nelle due direzioni N ed E è in fase, per cui il movimento avviene lungo una sola direttrice. Abbiamo eseguito un'analisi spettrale sui fattori ambientali quali temperatura dell'aria, pressione barometrica e precipitazione piovosa, ed abbiamo trovato che tale movimento annuale è influenzato oltre che da un effetto termoelastico, anche dal runoff delle acque del sottosuolo. Questo risultato è importante anche esso per le analisi delle reti geodetiche GPS, dove il segnale annuale è bene visibile nella maggior parte delle stazioni fisse. Il segnale annuale può comportare una notevole sorgente di errore nel calcolo del tasso di deformazione, quando sono a disposizione solo pochi anni delle serie temporali. Segue che la modellazione e comprensione del segnale è un problema di largo interesse.

Altro segnale preso in considerazione è quello delle oscillazioni libere, che vengono rilevate molto bene dai pendoli. Abbiamo messo a confronto quattro eventi sismici di notevole entità, che sono due eventi delle isole Sumatra-Andamane del 2004 e del 2007, rispettivamente, l'evento di Martinique del 2007 e lo storico evento del Chile 1960. L'attenzione dello studio verteva sulla individuazione delle frequenze dei modi bassi principali e delle frequenze dei singlets che costituiscono un multipletto.

2- Illustrazione della strumentazione geodetica e del database

L'interpretazione di dati geodetici in termini della deformazione crostale e degli sforzi deve opportunamente anche considerare tutti i fattori ambientali che potrebbero contribuire ad un segnale registrato (e.g. Braitenberg 1999 a,b; Zadro and Braitenberg, 1999; Braitenberg and Zadro, 1999, Braitenberg et al., 2001). Per la Grotta Gigante sono da considerare la pressione barometrica, l'influenza dei corsi d'acqua superficiali e sotterranei, la temperatura ed il carico delle maree dell'Adriatico. Il nostro data-base e' comprensivo per questo motivo non solo delle registrazioni geodetiche, ma anche di quelle ambientali. In seguito viene illustrata la strumentazione geodetica e viene poi fatto cenno sulla fonte dei dati ambientali.

2.1.pendoli orizzontali a lungo periodo-LPHP, clinometri -MPT

Nella Grotta Gigante sono installati due tipi di strumenti che misurano l'inclinazione della verticale, che sono una coppia di clinometri tradizionali (MPT) delle dimensioni verticali di 0.5 m circa, ed una coppia di pendoli orizzontali (LPHP), che hanno una lunghezza di 100 m e sfruttano tutta la grandezza della cavità. Ambedue sono pendoli orizzontali con sospensione del tipo Zöllner (vedi oltre), differiscono però in una importante differenza costruttiva, come illustrato in quanto segue.

2.1.1 Principio di funzionamento del clinometro del tipo Zöllner

I clinometri MPT ed anche i pendoli LPHP sono pendoli orizzontali a sospensione Zöllner: l'asta del pendolo con la massa è sospesa orizzontalmente da due fili, uno superiore ed uno inferiore (vedi Fig. 2.1-2.2), in modo che l'asta ruoti nel piano orizzontale. La rotazione dell'asta avviene attorno ad un'asse di rotazione virtuale, che passa per il punto di attacco superiore del filo superiore ed inferiore del filo inferiore. L'inclinazione dell'asse di rotazione virtuale dovuta a movimenti crostali

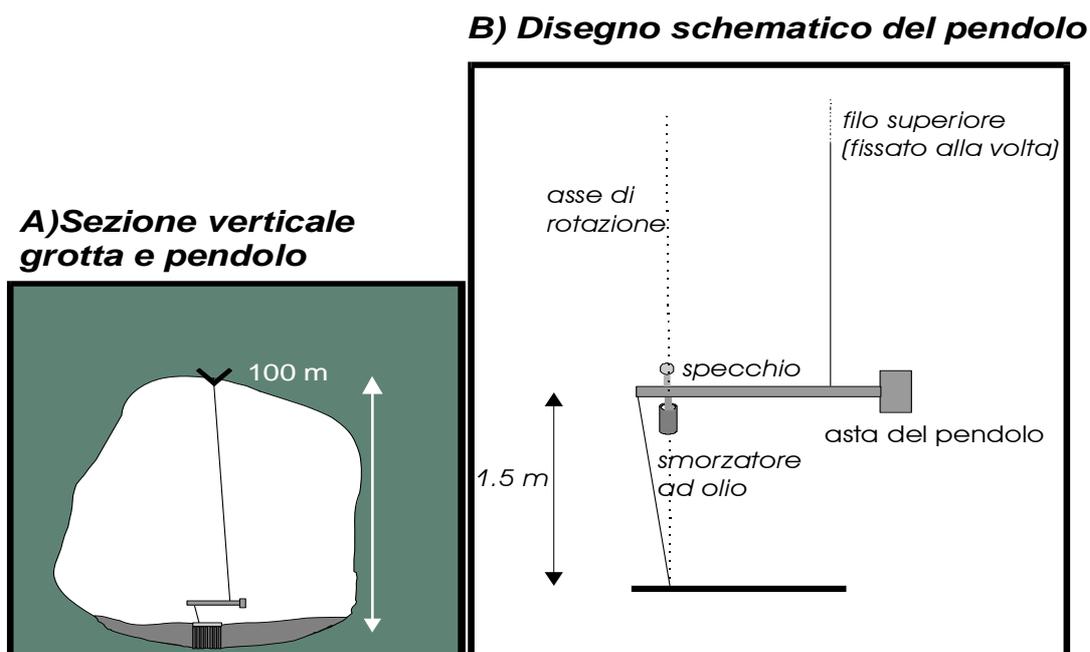


Figura 2.1: Disegno schematico del pendolo orizzontale (long period horizontal pendulum-LPHP) della Grotta Gigante (TS).

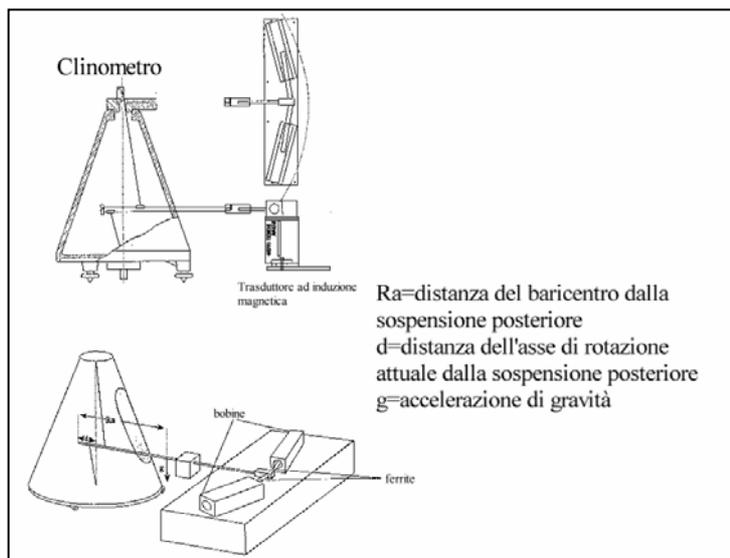


Fig 2.2 – Disegno schematico del clinometro(MPT) di costruzione del DST. L'acquisizione digitale avviene tramite un trasduttore ad induzione magnetica.

o ad effetti mareali viene registrata da una escursione dell'asta con un angolo che è di diversi ordini di grandezza maggiore dell'inclinazione dell'asse.

Le inclinazioni vengono misurate secondo due componenti, quella NS ed EW, registrate rispettivamente da due pendoli posti nella stazione di misura. I pendoli LPHP della Grotta Gigante (Marussi, 1959) differiscono dai clinometri per un aspetto costruttivo importante: i due fili di sospensione del pendolo orizzontale sono fissati direttamente alla volta ed alla base della cavità, rispettivamente (vedi **Fig. 2.1**). In questo modo i pendoli della Grotta Gigante sfruttano tutta l'altezza della spettacolare cavità naturale (100 m), e, grazie alle loro eccezionali dimensioni geometriche e meccaniche, permettono di ottenere una grande stabilità, con un periodo proprio di oscillazione di 6 minuti.

2.1.2 Fattore di amplificazione statico dei pendoli orizzontali

Come mostrato nel paragrafo precedente, i clinometri MPT ed i pendoli orizzontali LPHP sono ambedue caratterizzati dalla sospensione Zöllner. Nella **Tab. 2.1** sono elencate le principali caratteristiche strumentali di ambedue strumenti. Il fattore di amplificazione trova un'espressione in funzione del periodo di oscillazione del pendolo nel piano orizzontale e verticale. Sia J_0 il momento d'inerzia rispetto all'attuale asse di rotazione, R la distanza fra il baricentro e l'asse attuale di rotazione, i l'angolo di inclinazione dell'asse di rotazione attuale rispetto alla verticale, e g il valore della gravità; il periodo di oscillazione T_0 del pendolo nel piano orizzontale è pari a:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{J_0}{mgR \sin(i)}} \quad (1)$$

Con (R_a) la distanza fra il baricentro dell'asta ed il punto di sospensione posto all'estremo dell'asta del pendolo (vedi Fig. 2.2), il periodo di oscillazione (T_a) del pendolo fissato all'estremo dell'asta nel piano verticale è dato da:

$$T_a = 2\pi \sqrt{\frac{J_0 + mR_a^2 - mR^2}{mgR_a}} \quad (2),$$

L'amplificazione statica è data dall'inverso del seno dell'angolo di inclinazione i , che con le due espressioni è dato da:

$$A = \frac{1}{\sin(i)} = \frac{T_0^2}{(2\pi)^2} \frac{gR}{\frac{T_a^2}{(2\pi)^2} gR_a + R^2 - R_a^2} \quad (3)$$

L'amplificazione del segnale registrato dipende poi ulteriormente dalla distanza fra il punto di registrazione e l'asse di rotazione attuale del pendolo orizzontale. Per i clinometri MPT, che vengono registrati con un trasduttore ad induzione costruito dalla Ditta Tecniche Avanzate di Trieste, la distanza ammonta a 51.66 cm. Per i pendoli orizzontali (LPHP) in registrazione analogica su carta fotografica, la distanza ammonta a 5 m, mentre per l'acquisizione digitale, la distanza e' di 90 cm.

quantity	symbol	value
Distance between upper and lower mountings		50 cm
Weight of housing case		45 kg
Total weight of the pendulum, including the wires	m	679 gr.
Distance of the centre of gravity from the rear suspension	R_a	32.0 cm
Distance of the actual axis of rotation from the rear suspension	d	3.9 cm
Moment of inertia with respect to the actual axis of rotation	J_o	5,500 gr cm ²
Period of oscillation in the vertical plane, determined experimentally	T_a	1.3 sec
Period of oscillation in the horizontal plane	T_o	maintained to 90 sec
Recording:	hourly sampling rate	
-previous to 1990: Analogical	-scintillation on sparker paper.	
-after 1990: Digital	-Inductive displacement transducer	

Tabella 2.1a) Caratteristiche tecniche dei pendoli MPT (in inglese)

Quantity described	symbol	Pendulum A (EW)	Pendulum B (NS)
Distance between upper and lower mountings		94.9 m	95.5 m
Total weight of the pendulum, including the wires	m	18.374 kg	18.340 kg
Distance of the centre of gravity from the rear suspension	R_a	141.8 cm	141.7 cm
Distance of the actual axis of rotation from the rear suspension	d	17.3 cm	17.5 cm
Moment of inertia with respect to the actual axis of rotation	J_o	307.2 10 ⁶ gr cm ²	305.5 10 ⁶ gr cm ²
Period of oscillation in the vertical plane, determined experimentally	T_a	2.46 sec	2.46 sec
Period of oscillation in the horizontal plane	T_o	360 sec	360 sec
Operation mode		critical damping	critical damping
Recording		Analogical on photographic paper and digital	Analogical on photographic paper and digital

Tabella 2.1b) Caratteristiche tecniche dei pendoli LPHP (in inglese)

2.2 Differenze tra il segnale rilevato dai pendoli LPHP e dai clinometri MPT in risposta a deformazioni di taglio della grotta

Nella **Fig. 2.3** sono illustrate due diverse deformazioni: la prima è costituita da una sola rotazione, mentre la seconda rappresenta una rotazione ed una deformazione di taglio. Possiamo allora osservare come i due tipi di pendoli registrano segnali diversi nei due casi. Nella figura, il triangolo piccolo con vertice C rappresenta in modo schematico il clinometro, mentre l'asse indicata dalla lettera B collega i punti di sospensione (superiore ed inferiore) del pendolo LPHP. Si può notare come nel primo caso, di sola rotazione, i due strumenti daranno in uscita il medesimo segnale, mentre nel secondo caso, il segnale registrato dal pendolo LPHP sarà diverso, e potrà essere orientato in direzione opposta, in quanto la grotta ha subito non solo una rotazione ma anche una deformazione di taglio (vedi anche Ebblin and Zadro, 1980, Pagot, 2002). Ovviamente per la particolare costruzione, soltanto i pendoli LPHP risentiranno della deformazione di taglio, mentre i clinometri tradizionali, come anche il sismografo Broad band (BB) presente nella grotta, non sono sensibili a tale segnale.

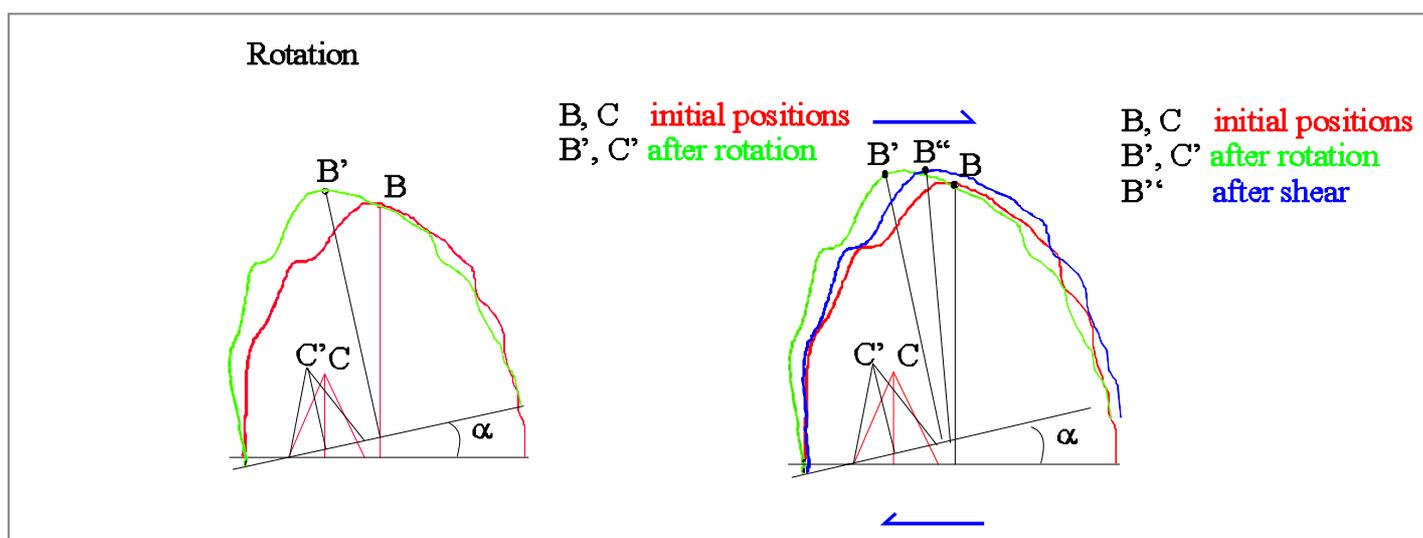


Fig. 2.3 – Illustrazione della differenza osservata dai pendoli LPHP e dai clinometri MPT per una rotazione della grotta di angolo α ed una rotazione alla quale si aggiunge una deformazione di taglio. Il segnale rilevato dal clinometro è rappresentato dal triangolo con vertice C (C', C'') e quello rilevato dal pendolo orizzontale dall'asse con vertice B, B', B''). Si può osservare come la deformazione di taglio viene soltanto osservata dal pendolo orizzontale LPHP, mentre il clinometro, che poggia sul fondo della grotta, è sordo a tale segnale (da Pagot, 2002).

2.2 Funzione di trasferimento del pendolo LPHP per spostamenti del suolo nel caso dinamico

La risposta del pendolo orizzontale ad una sollecitazione del suolo è descritta dalla equazione:

$$\ddot{\vartheta} + 2\lambda\Omega\dot{\vartheta} + \Omega^2\vartheta = -\frac{\ddot{u}}{l} \quad (4)$$

dove: ϑ è l'angolo di rotazione del pendolo nel piano orizzontale, misurato via raggio ottico o laser come spostamento lineare su un registratore, u è lo spostamento del terreno, perpendicolare al piano

verticale che contiene l'asta del pendolo, Ω è la frequenza angolare propria del pendolo nel piano orizzontale pari a $2\pi/T$, l è la lunghezza ridotta e λ è il coefficiente di smorzamento.

La lunghezza ridotta dell'equazione (4) deve tenere conto del fatto che la rotazione avviene intorno all'asse di rotazione virtuale, dislocato da una distanza d dalla coda del pendolo. Il valore del periodo di oscillazione nel piano verticale invece, è stato misurato sospendendo il pendolo alla sua coda. Risulta allora che il valore della lunghezza ridotta che entra nell'equazione (4) è minore della lunghezza ridotta che risulta dall'applicazione dell'equazione (2). Infatti, con i valori della tabella si ottiene una lunghezza ridotta (per la rotazione intorno all'attacco del pendolo) di $L'=1504$ mm. Il valore da usare invece nell'equazione (4) è dato dalla:

$$l = \frac{J_0}{mR} \quad (5)$$

l	Lunghezza ridotta	1343.2 mm
T	Periodo proprio del pendolo	360 sec
λ	Coefficiente di smorzamento.	0.85

Tab. 2.1 - Valori numerici dei parametri che determinano la funzione di trasferimento dei pendoli LPHP

Ponendo $u(t) = ae^{i\omega t}$ e $g(t) = Ae^{i(\omega t - \varphi)}$, si ottiene:

$$-A\omega^2 + 2A\lambda\Omega i\omega + A\Omega^2 = \frac{a}{l} \omega^2 [\cos \varphi + i \sin \varphi] \quad (5)$$

Dalla (2) ricaviamo la funzione trasferimento per le onde sismiche:

$$\frac{A_{(\omega)}}{a_{(\omega)}} = \frac{1}{l} \left\{ \left[\frac{\Omega^2}{\omega^2} - 1 \right]^2 + 4\lambda^2 \frac{\Omega^2}{\omega^2} \right\}^{-1/2} \quad (6)$$

e per lo sfasamento:

$$\tan \varphi_\omega = \frac{2\lambda\Omega\omega}{\Omega^2 - \omega^2} \quad (7)$$

La curva di risposta del pendolo a sollecitazioni del suolo per effetto dinamico è riportata nella **Fig.2.5**. Si osserva come la curva di risposta dei pendoli LPHP, andando verso le alte frequenze, si normalizza e, quindi equivale ad un'amplificazione costante (vedi anche Brusatin, 2002).

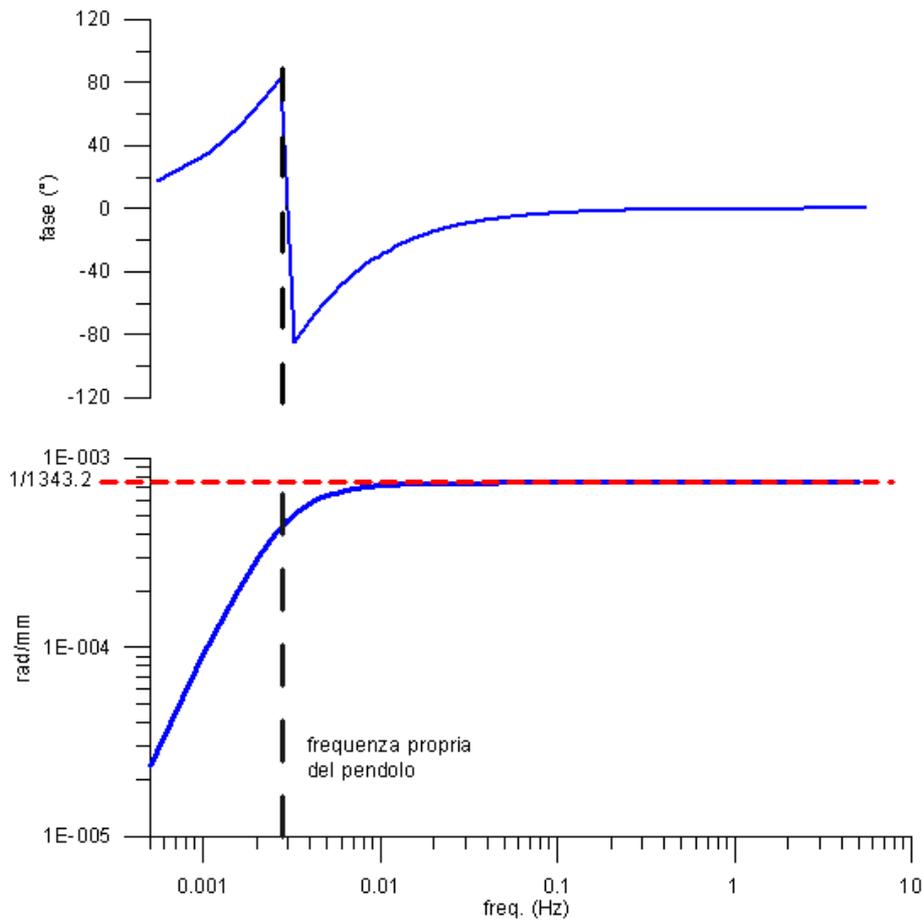


Fig. 2.5 – La figura illustra la curva di risposta dinamica dei pendoli orizzontali LPHP: in alto lo sfasamento ed in basso la curva di risposta in radianti di rotazione dell'asta per mm di spostamento del suolo.

3 Fattori di amplificazione-aggiornamento della taratura dell'acquisizione digitale

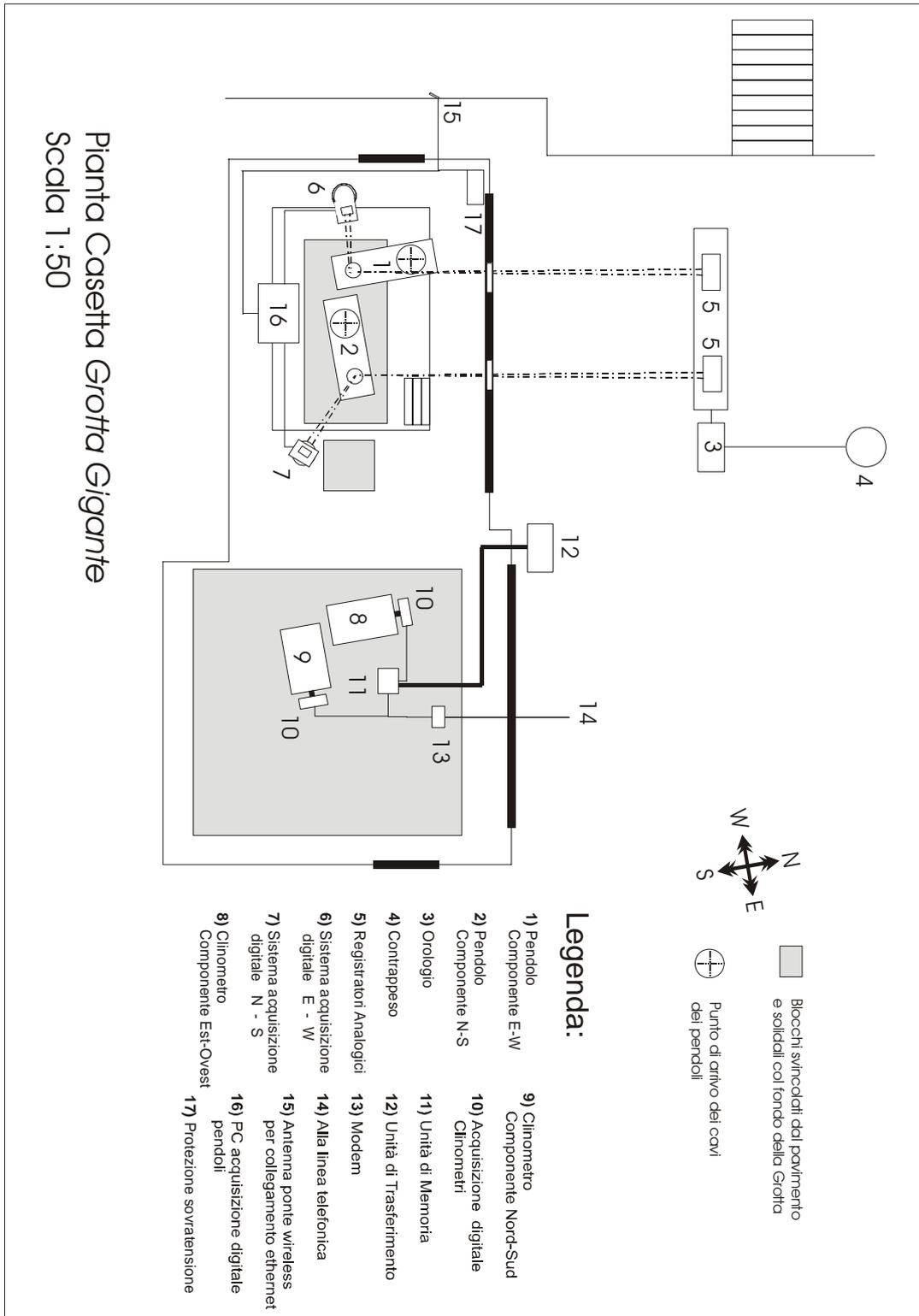


Fig. 3.1 - Pianta schematica della strumentazione presente nell'edificio sito in fondo alla Grotta Gigante.

Come illustrato nel rapporto del 2004, il rilevatore di seconda generazione effettua, come il primo, l'intercettazione di un fascio laser riflesso da uno specchietto montato sull'asta del pendolo. Il rilevatore di posizione del fascio laser è un dispositivo ottico analogico PSD (Position Sensitive Detector). Il meccanismo di funzionamento è estremamente semplice e, sebbene questi sensori non possiedano l'accuratezza di un sensore CCD (la linearità è pessima alle estremità), la facilità d'uso li rende appetibili in molti casi. Il sensore è formato da una lunga giunzione $P-N$ che può essere illuminata attraverso una metallizzazione trasparente. L'installazione del sistema di acquisizione è stata effettuata il 17 dicembre 2003 in collaborazione con il Dott. Gianni Romeo ed il Dott. Quintilio Taccetti (Romeo, 2000; Braitenberg et al., 2004; Braitenberg et al., 2005). Da tale data il sistema di acquisizione digitale nuovo è stato in funzione ininterrottamente. Prima di eliminare l'acquisizione su carta fotografica, si intende continuare la verifica sulla linearità del sistema di acquisizione. A tale scopo si sono confrontate le registrazioni ottiche su carta fotografica con quelle digitali per gli anni a disposizione (2004-2007). Il campionamento dei dati digitali è stato ridotto a quello dei dati digitalizzati dalla carta pari ad una ora.

Il fattore da determinare è α : fattore di conversione da unità digitali all'angolo di inclinazione del pendolo per i movimenti quasi-statici, dove la dinamica del pendolo è trascurabile. Il fattore di conversione è stato calcolato tramite regressione lineare. Avendo a disposizione oramai cinque anni di dati, si è potuto controllare la linearità del sistema su un'ampiezza di 130 msec ed anche la stabilità di tale valore di conversione nel tempo. Per tutti gli anni la linearità era risultata buona, come si era verificato dalla regressione lineare dei dati digitali e quelli su carta. Qui presentiamo il confronto dei dati digitali e quelli letti da carta fotografica per l'anno 2007 (vedi **Fig. 3.2**). Nella **Fig. 3.2** sono visibili (in colore rosso) le registrazioni digitali in 10^5 unità e con tratto nero le registrazioni analogiche effettuate su carta fotografica e successivamente digitalizzate a mano in msec. L'intervallo di tempo rappresentato è l'anno 2007. Durante la prima parte dell'anno la registrazione è molto disturbata a causa della difettosa guaina di protezione del pendolo. La guaina nel 2007 è stata sostituita, ed il segnale è tornato ad essere di ottima qualità. Il calcolo del fattore di regressione per l'anno 2007 (componente NS) è illustrato nella **Fig. 3.3**. Nella **tab. 3.1** riportiamo i coefficienti della relazione lineare, risultato della regressione per gli anni a disposizione. I coefficienti indicano la relazione di conversione dall'unità digitale a msec di registrazione, ottenuta dalla regressione delle serie temporali per gli anni 2004, 2005, 2006 e 2007. Notiamo una leggera variazione del fattore calcolato- la variazione però non risulta essere sistematica.

Per quanto riguarda la registrazione di eventi sismici, alle frequenze molto maggiori della frequenza propria del pendolo, l'escursione di un digit di registrazione digitale equivale ad un movimento del suolo dell'ampiezza di $2.763 \cdot 10^{-7}$ m e $2.871 \cdot 10^{-7}$ m per le componenti EW e NS, rispettivamente, per il sistema a PSD (basandosi sui fattori del 2004). Nella **Fig. 3.4** riportiamo la registrazione digitale per tutto il 2007, qui con campionamento ridotto a 1 minuto.

Rimane un problema da risolvere, che è costituito dalla presenza di spikes irregolari, generati dal sistema digitale. Una ipotesi è, che sono attribuibili ad un difetto del laser di tipo industriale, il cui fascio non mantiene costantemente la stessa direzione, ma devia la sua direzione ad intervalli irregolari, generando i "spikes". Il problema potrebbe essere migliorato dalla sostituzione del dispositivo laser con un tipo di qualità più elevata.

	NS	EW
Fattore di amplificazione statica: conversione dall'inclinazione del pendolo alla rotazione orizzontale dell'asta del pendolo (febbraio 2004 a marzo 2005)	23950	26330
Fattore di conversione da un digit di registrazione digitale all'inclinazione dell'asse del pendolo (anno 2004). (Movimenti quasi-statici)	-1.94 10 ⁻³ msec/digit - 9.40 10 ⁻¹² rad/digit	-1.54 10 ⁻³ msec/digit -7.47 10 ⁻¹² rad/digit
Fattore di conversione da un digit di registrazione digitale all'inclinazione dell'asse del pendolo (anno 2005). (Movimenti quasi-statici)	-1.88 10 ⁻³ msec/digit -9.092 10 ⁻¹² rad/digit	-1.50 10 ⁻³ msec/digit -7.291 10 ⁻¹² rad/digit
Fattore di conversione da un digit di registrazione digitale all'inclinazione dell'asse del pendolo (anno 2006). (Movimenti quasi-statici)	-1.85 10 ⁻³ msec/digit -8.946 10 ⁻¹² rad/digit	Causa guasto alla guaina non e' possibile ricalcolare il fattore. Viene mantenuto quello del 2005.
Fattore di conversione da un digit di registrazione digitale all'inclinazione dell'asse del pendolo (anno 2007). (Movimenti quasi-statici)	-1.87 10 ⁻³ msec/digit -9.059 10 ⁻¹² rad/digit	Ripristino guaina a metà anno- Viene mantenuto fattore del 2005.
Numero totale di dati orari nel 2004: 8784. Periodi tralasciati nel calcolo del fattore di conversione causa interruzioni nel 2004. Indice in ore dal 1 gennaio 2004 ore 00:00 locali.	876-1556 5265-5722 6527-6884 6969-6983	394-410 416-433 2891-2910 3563-3591 4239-4252 5265-5723
Numero totale di dati orari nel 2005: 8760. Periodi tralasciati nel calcolo del fattore di conversione causa interruzione nel 2005. Indice in ore dal 1 gennaio 2005 ore 00:00 locali.	2165-2190 3513-3518 6450-6546 6625-6873	1515-1570 6450-6546 6626-6873
Numero totale di dati orari nel 2006: 8760. Nessuna interruzione.		
Reset nell'anno 2005 su registrazione digitale (N= indice in ore dall'inizio dell'anno, S= spostamento in msec)	N=6498 S=+2.917 msec	

Tab.3.1: Fattore di conversione per il pendolo LPHP nel caso della registrazione ottica e quella digitale per il sistema digitale di seconda generazione.

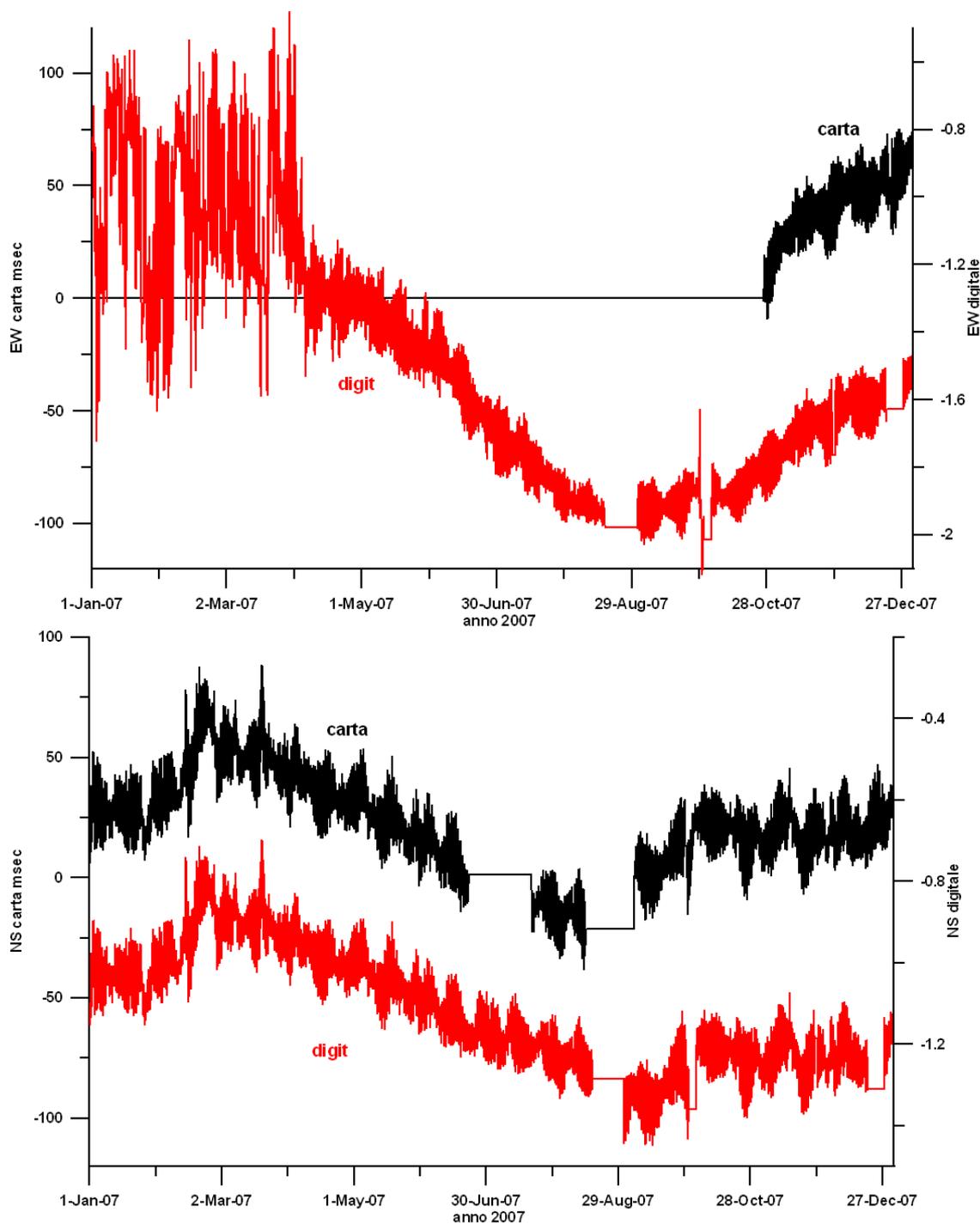


Fig. 3.2 – Confronto fra le registrazioni del pendolo LPHP) ottenute dall’acquisizione su carta fotografica (in nero) e digitale (rosso) per l’anno 2007, campionamento 1 ora. I valori digitali vengono letti con 5 cifre significative, per cui l’unità digitale(1 digit) è pari a 10^{-5} . E’ molto evidente il livello di rumore elevato dei primi mesi del 2007, antecedenti alla sostituzione della guaina protettiva.

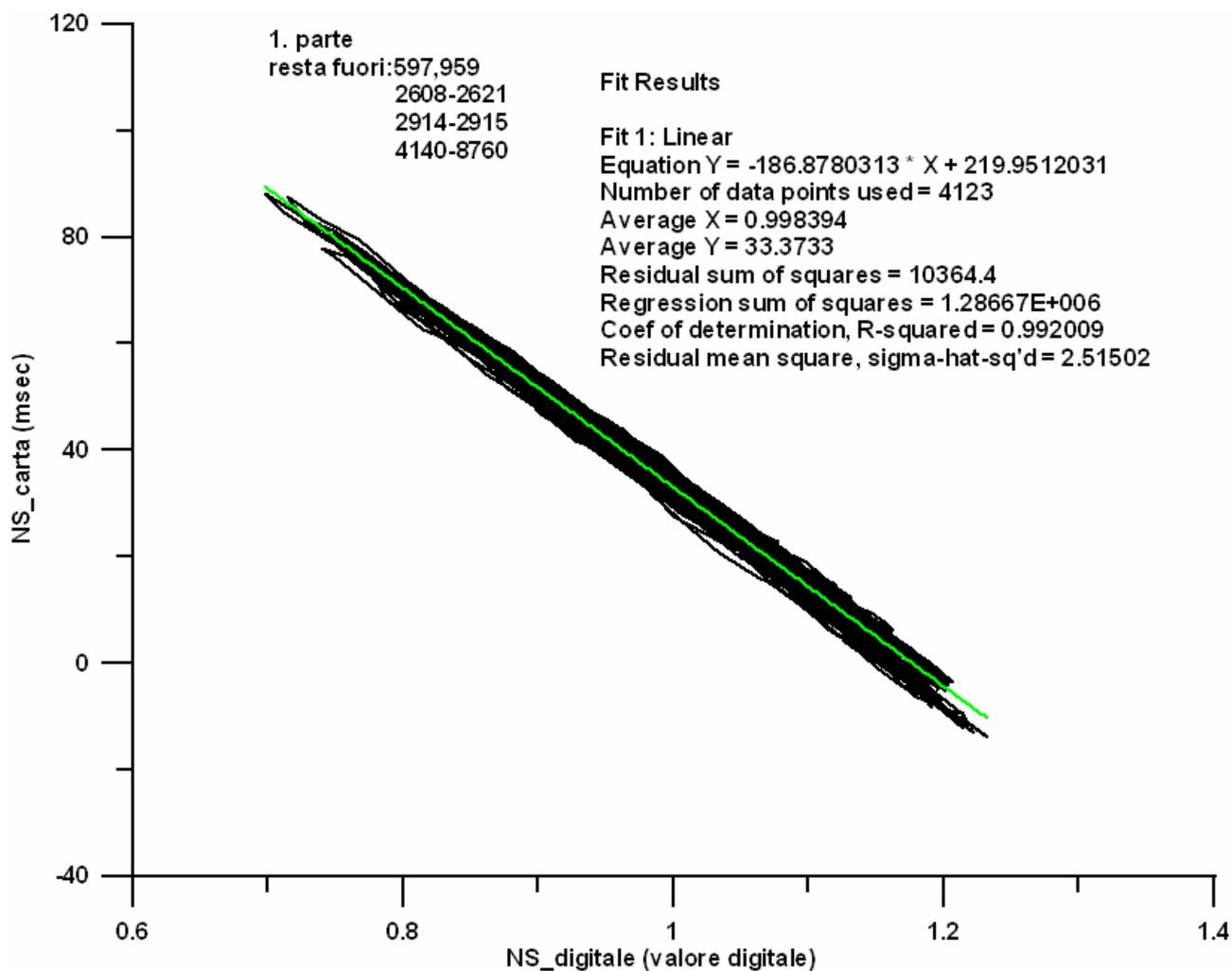


Fig. 3.3 – Retta di regressione fra le registrazioni dei pendoli LPHP ottenute dall'acquisizione su carta fotografica e digitale. Componente NS, anno 2007.

Registrazioni dati digitali GG
ore 0 1/01/07 - ore 23 31/12/07

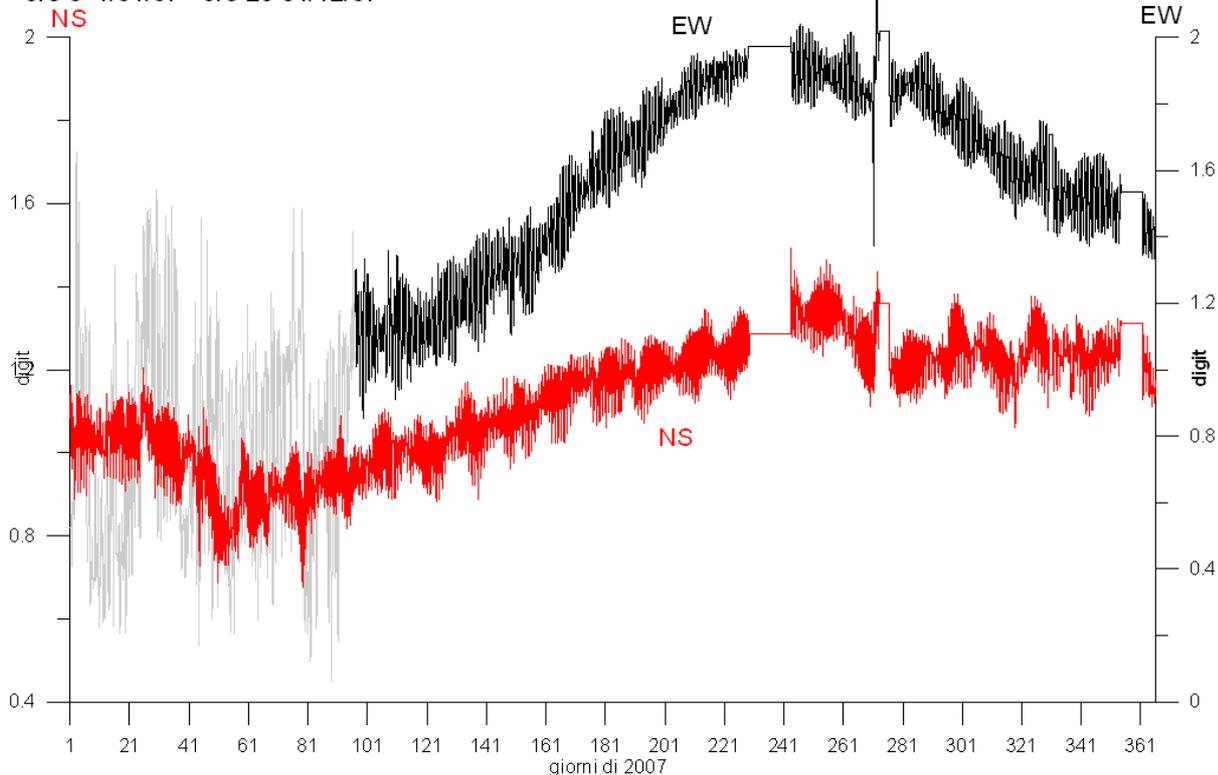


Fig. 3.4 - La registrazione dei pendoli LPHP con acquisizione digitale per l'anno 2007. Campionamento ridotto a 1min. I primi mesi della registrazione della componente EW sono disturbati a causa di un guasto alla guaina protettiva, che e' stata sostituita su ambedue componenti successivamente durante i giorni 230-240.

4 - Osservazioni delle inclinazioni della verticale e di parametri ambientali per il periodo 2006- 2007.

Qui di seguito vengono riportate le registrazioni effettuate con i pendoli LPHP e con i clinometri MPT della Grotta Gigante per il periodo 2006-2007. Inoltre si riportano i grafici delle registrazioni orarie della temperatura, della pressione atmosferica e della piovosità. Infine viene dato un quadro d'insieme della disponibilità delle registrazioni estensimetriche e clinometriche della intera rete strumentale clino-estensimetrica del Friuli gestita dal DST.

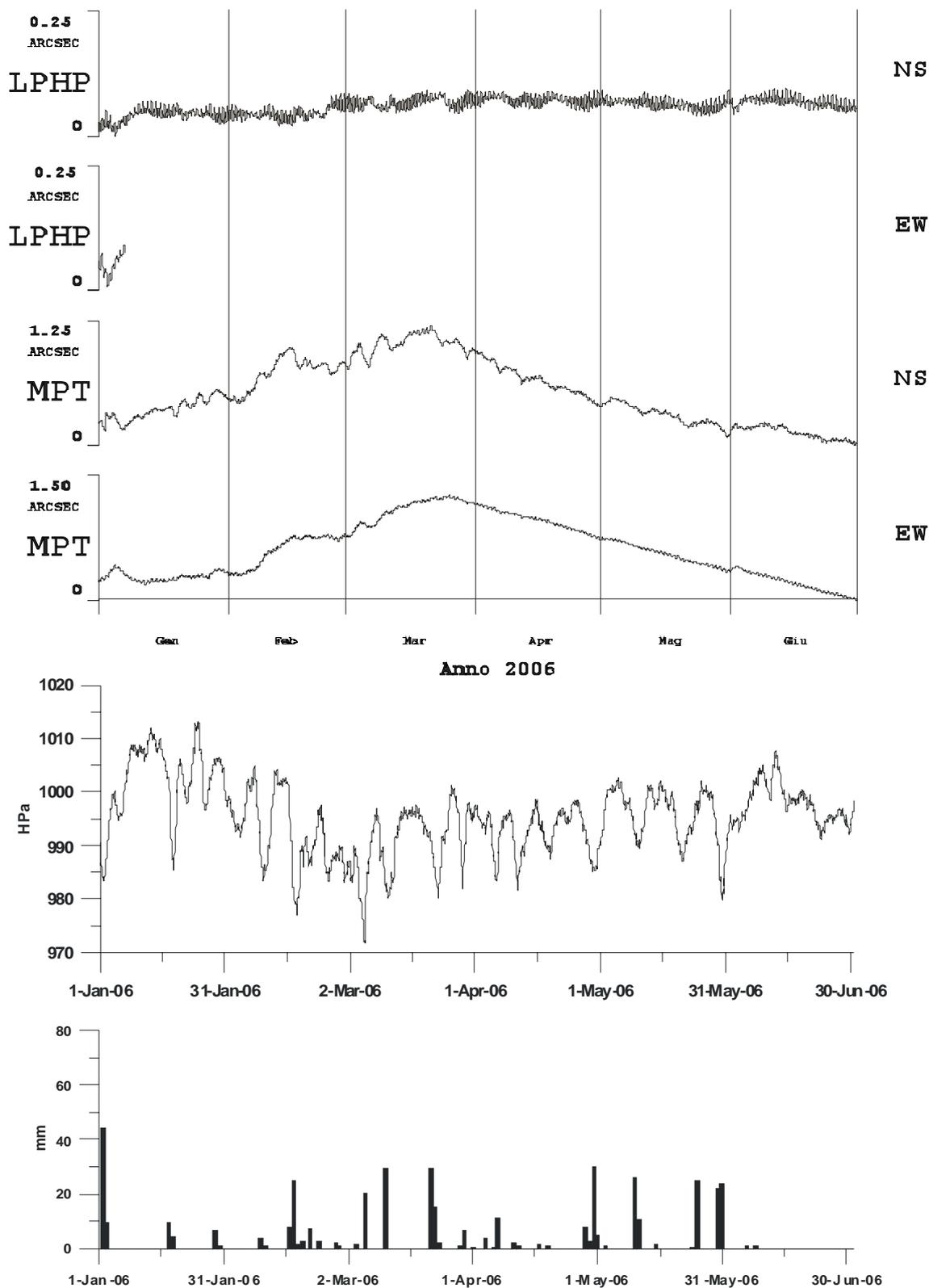


Fig. 4.1- Grafico delle registrazioni effettuate con i pendoli LPHP e con i clinometri MPT della Grotta Gigante per il periodo 2006-2007. Nella parte inferiore del grafico è riportata la registrazione pluviometrica giornaliera (stazione di Trieste. Stravisi, comunicazione personale) e la pressione barometrica. A) Periodo gennaio-giugno 2006

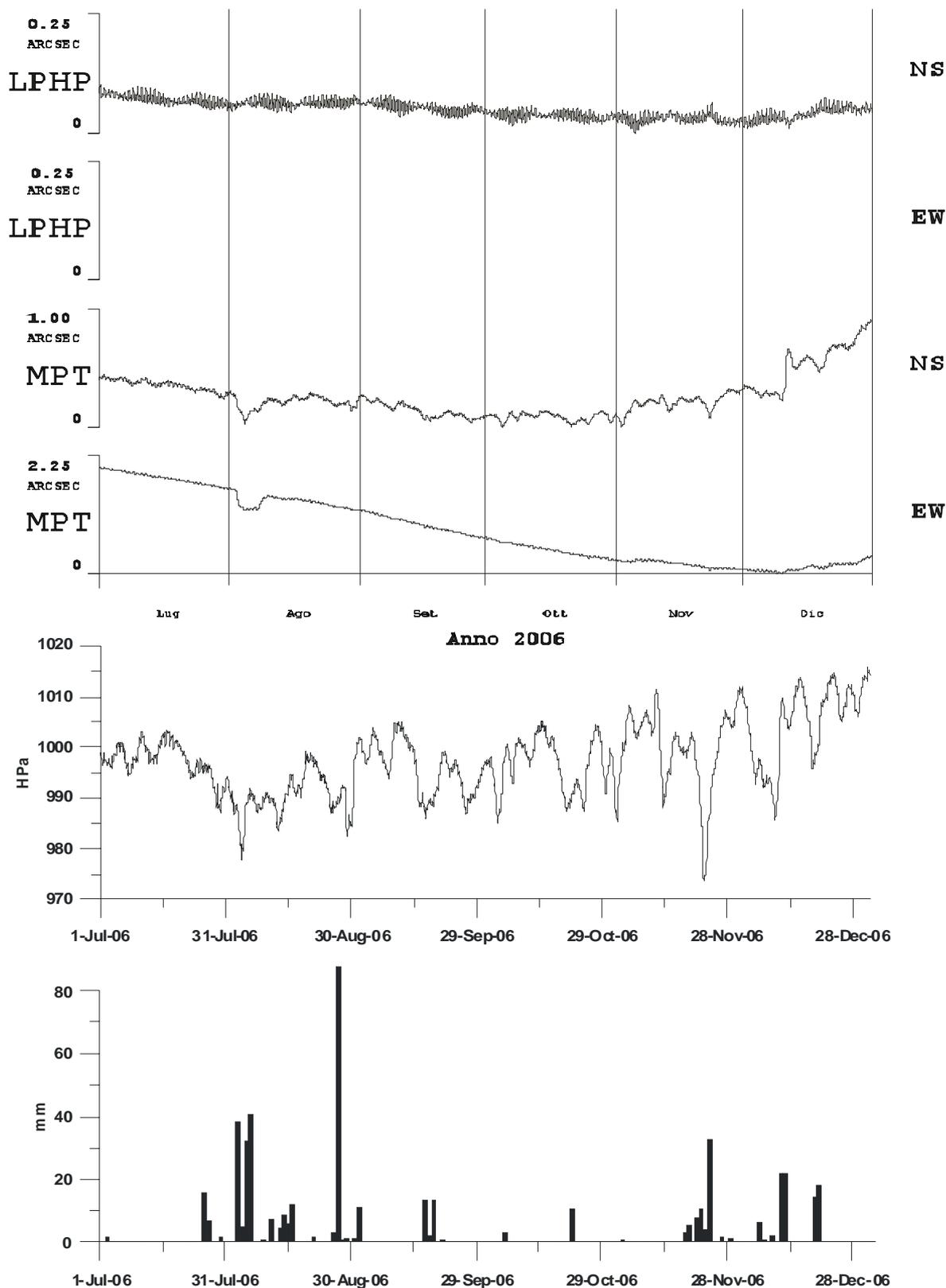


Fig. 4.1b - Grafico delle registrazioni effettuate con i pendoli LPHP e con i clinometri MPT della Grotta Gigante per il periodo 2006-2007. Nella parte inferiore del grafico è riportata la registrazione pluviometrica giornaliera (stazione di Trieste. Stravisi, comunicazione personale) e la pressione barometrica. B) periodo luglio-dicembre 2006

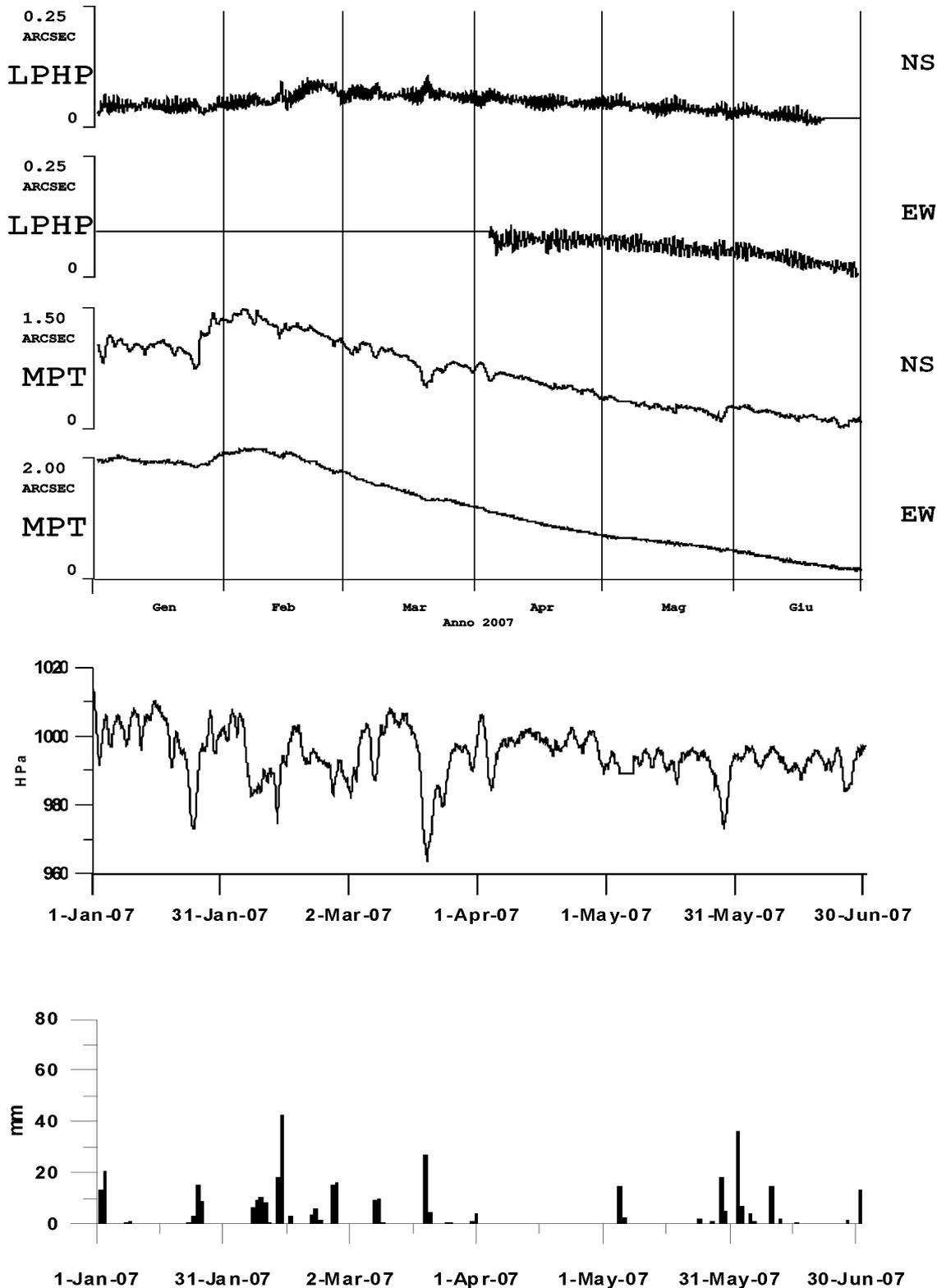


Fig. 4.1c - Grafico delle registrazioni effettuate con i pendoli LPHP e con i clinometri MPT della Grotta Gigante per il periodo 2006-2007. Nella parte inferiore del grafico è riportata la registrazione pluviometrica giornaliera (stazione di Trieste. Stravisi, comunicazione personale) e la pressione barometrica. C) Periodo gennaio-giugno 2007

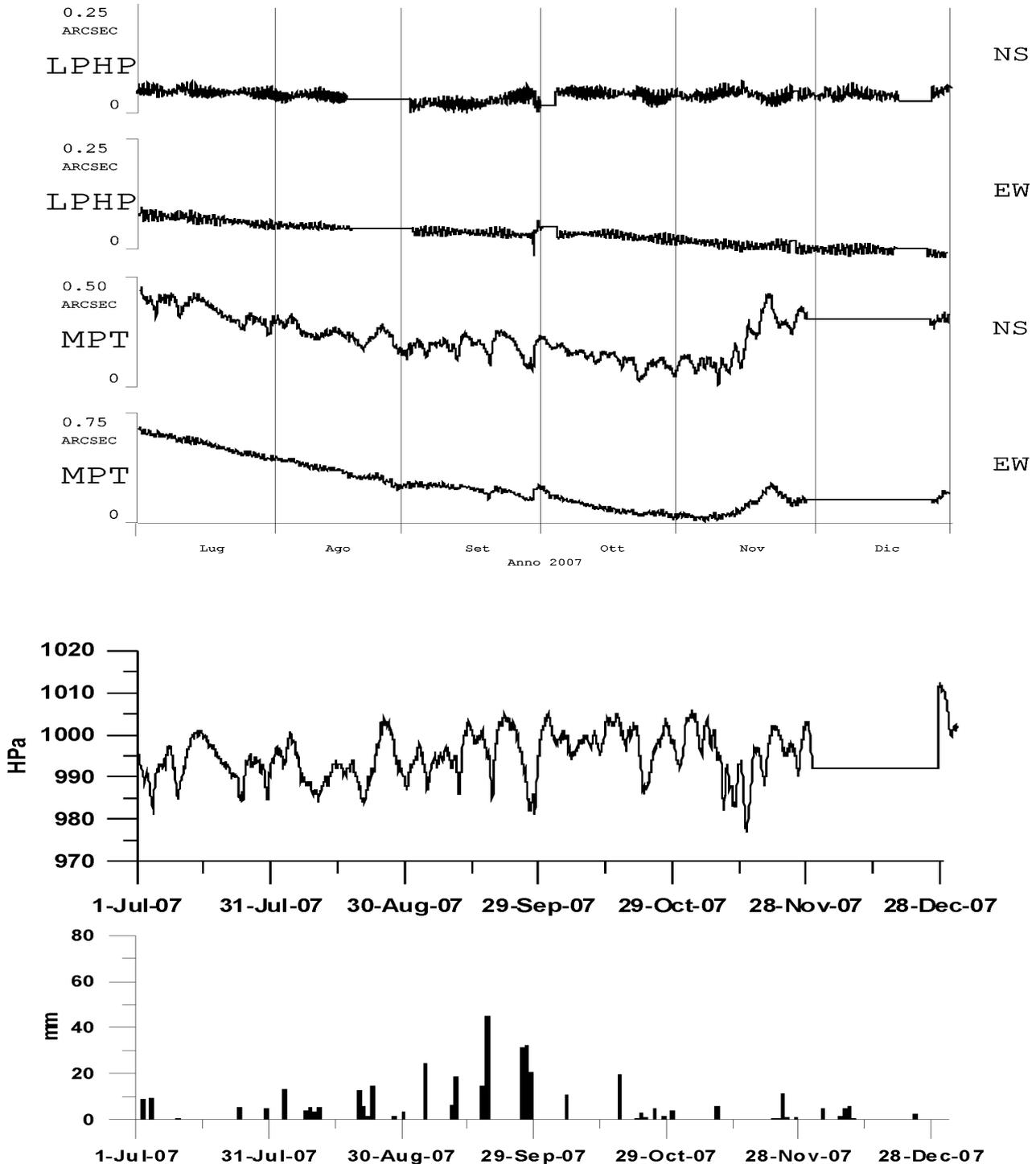


Fig. 4.1d - Grafico delle registrazioni effettuate con i pendoli LPHP e con i clinometri MPT della Grotta Gigante per il periodo 2006-2007. Nella parte inferiore del grafico è riportata la registrazione pluviometrica giornaliera (stazione di Trieste. Stravisi, comunicazione personale) e la pressione barometrica. D) Periodo luglio-dicembre 2007.

**RETE CLINO-ESTENSIMETRICA DI FRIULI
 DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLA TERRA - UNIVERSITA' DI TRIESTE
 REGISTRAZIONI DISPONIBILI PER GLI ANNI '1960 - 2007'**

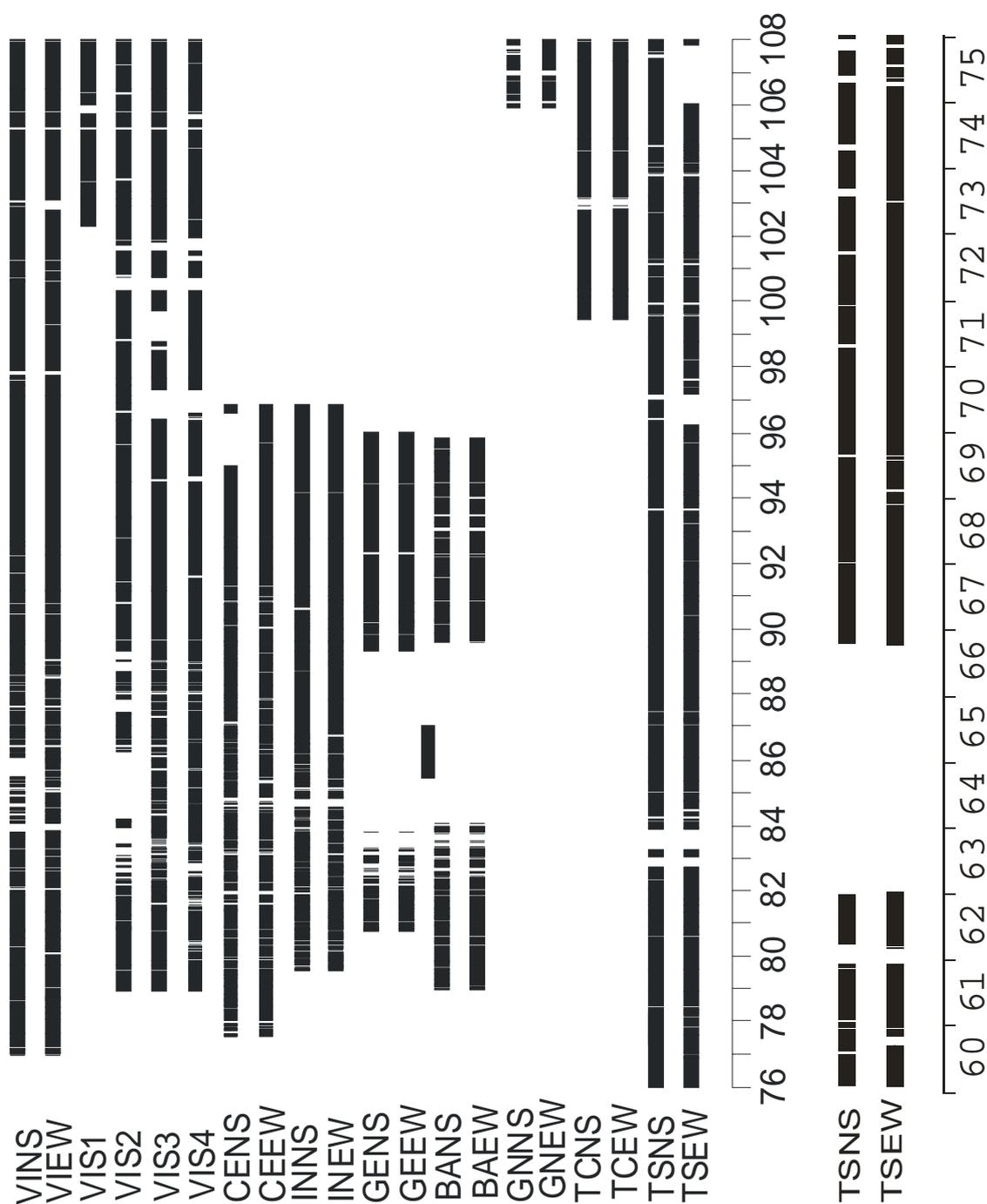


Fig. 4.2 - Quadro d'insieme della disponibilità delle registrazioni della rete strumentale clino-estensimetrica del Friuli e della Grotta Gigante gestita dal DST. Le sigle si riferiscono a: VI: Villanova, CE: Cesclans, IN: Invillino, GE: Gemona, BA: Barcis, GN: Genziana. I clinometri (pendoli orizzontali) sono identificati con NS ed EW, mentre i quattro strainmeter (3 orizzontali, uno verticale) con S1, S2, S3, S4. Le sigle TSNS e TSEW si riferiscono ai pendoli LPHP della Grotta Gigante. Il database comprende inoltre l'osservazione di temperatura e pressione, e dei clinometri tradizionali MPT (sigle TCNS e TCEW; dal 1999) della Grotta Gigante.

5 Analisi del tilting di periodicità annuale rivelato dai pendoli

Uno dei segnali evidenti nelle registrazioni dei pendoli della Grotta Gigante è il tilting annuale. L'analisi spettrale delle sequenze temporali mostra la presenza evidente della componente annuale. Abbiamo calcolato lo spettro di potenza dell'intera serie temporale (15070 valori con campionamento giornaliero, con inizio 13 ottobre 1966). Alla serie è stata applicata una finestra di Hann (Marple, 1987) previo calcolo dello spettro. Lo spettro di potenza è riportato nella Fig. 5.1, dove in 5.1a si osserva lo spettro per periodi da 1 a 10000 giorni, mentre lo spettro limitato a periodicità limitrofe a quella annuale e semiannuale è visibile in Fig. 5.1b. Considerando la fase della variazione annuale, troviamo che le due componenti sono in fase, e che il massimo tilting verso N ed E avviene il 4 e 7 ottobre, rispettivamente, mentre il massimo tilting in direzione opposta, verso S ed W, avviene il 7 e 10 aprile, rispettivamente. La causa del segnale annuale non è del tutto compreso, ed i fattori che lo generano possono essere la temperatura, lo scarico delle acque del fiume sotterraneo Timavo, e il carico variabile dell'Adriatico. Allo scopo di comprendere meglio il segnale annuale, provvediamo a seguire l'ampiezza nel tempo tramite la tecnica della demodulazione complessa. Sia $x(t)$ la serie temporale registrata con campionamento dt , allora definiamo una seconda serie temporale $y(t)$ con:

$$y(t) = x(t)e^{-i2\pi f_0 t}$$

con $f_0 = \frac{1}{365.25} \text{ cpd}$

L'ampiezza del segnale annuale è data dalla

$$a(t) = 2|y_{LP}(t)|$$

La $y_{LP}(t)$ equivale alla $y(t)$ filtrata con un filtro in frequenza passa basso. Definiamo il filtro passa bassa $H(f)$ come:

$$H(f) = 1 \quad 0 \leq f \leq f_{\max} \quad f_{\max} = \frac{1}{P_{\min}}$$

$$H(f) = 0.5 \left(1 + \cos\left(\pi \frac{f - f_{\max}}{k_{\cos} df}\right) \right) \quad f_{\max} < f \leq \frac{1}{2dt}$$

con $p_{\min} = 1095 d$ e $k_{\cos} = 15$

$$dt = 1 d \text{ e } df = \frac{1}{15070} \text{ cpd}$$

Il risultato della demodulazione complessa delle registrazioni delle componenti NS ed EW dei pendoli della Grotta Gigante è illustrato in Fig. 5.2. Il grafico mostra l'ampiezza del segnale annuale della componente NS ed EW, rispettivamente, ed anche l'ampiezza totale e l'azimut del tilting annuale. Si può osservare come l'ampiezza della componente EW è sistematicamente maggiore di quella della componente NS. L'unica eccezione avviene durante gli anni dal 1978 al 1983, quando invece è maggiore il segnale annuale sulla componente NS rispetto a quella EW. L'azimut del tilting annuale (misurato da Nord verso Est) è pressoché costante e si aggira intorno a 60° . Tale direzione è approssimativamente ortogonale alla direzione della costa (vedi Fig. 5.3).

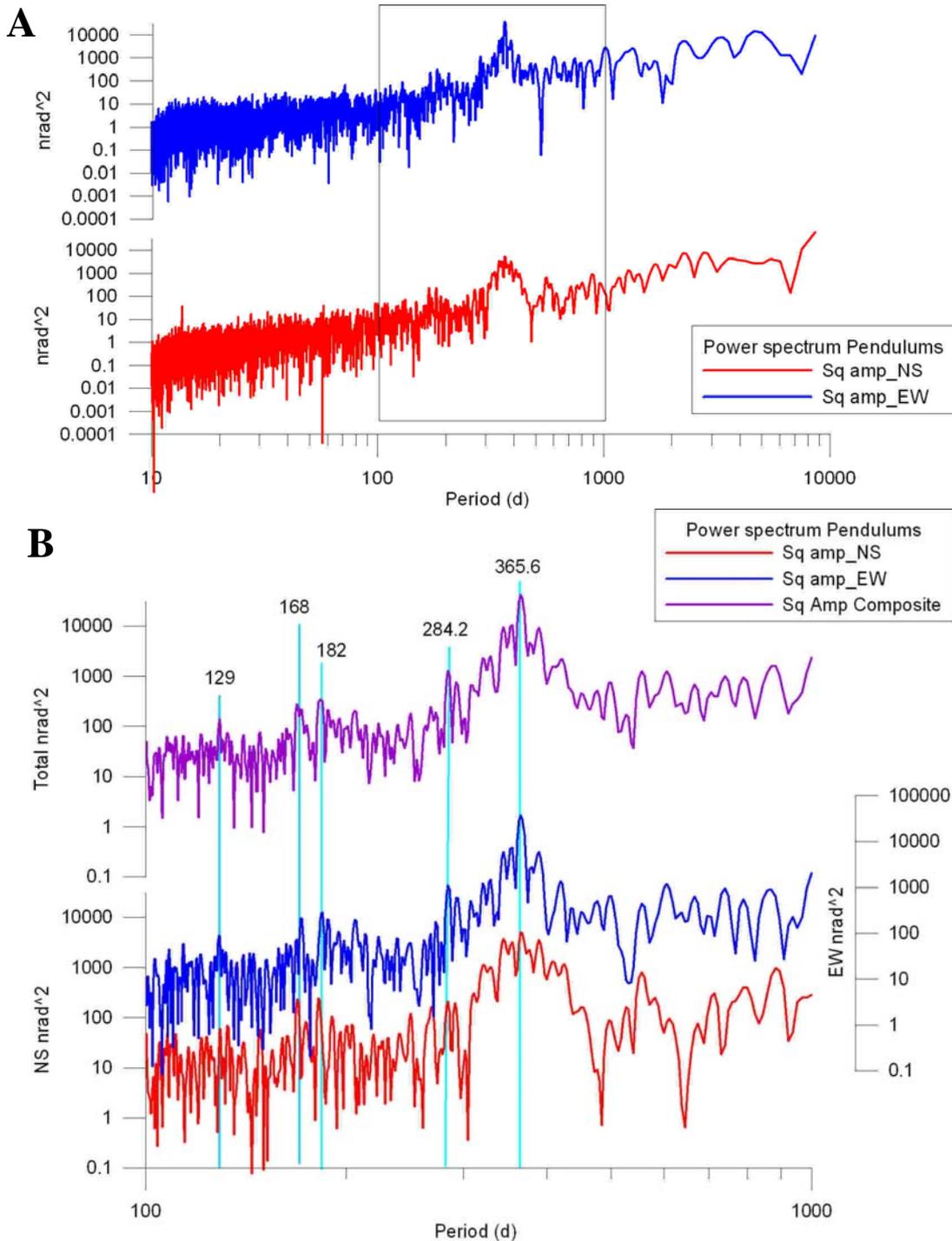


Fig. 5.1 – Spettro di potenza delle due componenti NS ed EW; a) l'intero spettro in scala logaritmica. Il riquadro mostra la parte dello spettro riportata nella figura 5.1b. b) dettaglio dello spettro per periodi da 100 a 1000 giorni. In violetto lo spettro del quadrato dell'ampiezza del vettore inclinazione composto. Le linee verticali ed il periodo corrispondente riportato in alto evidenziano i picchi nello spettro.

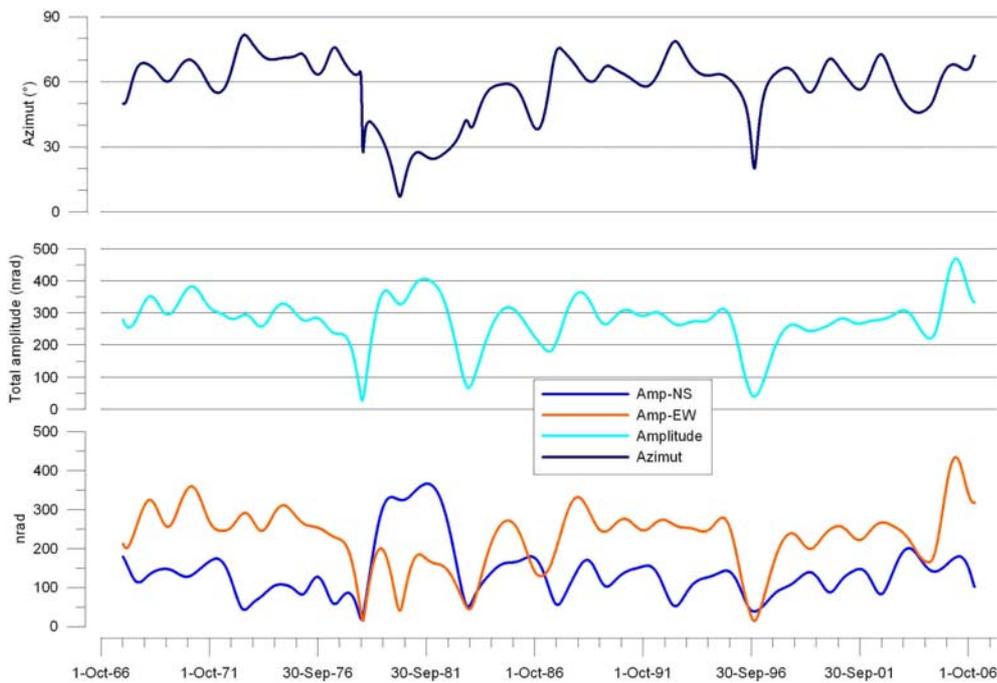


Fig. 5.2 – Risultato della demodulazione complessa del segnale annuale registrato dai pendoli della Grotta Gigante. In celeste ed arancione l'ampiezza istantanea della variazione annuale per le due componenti NS ed EW, rispettivamente; in colore blu e turchese, ampiezza ed azimuth del tilting annuale. Il tilting annuale ha mediamente un'ampiezza di 300 nrad, ed è polarizzato in direzione N60E, approssimativamente ortogonale alla linea di costa.

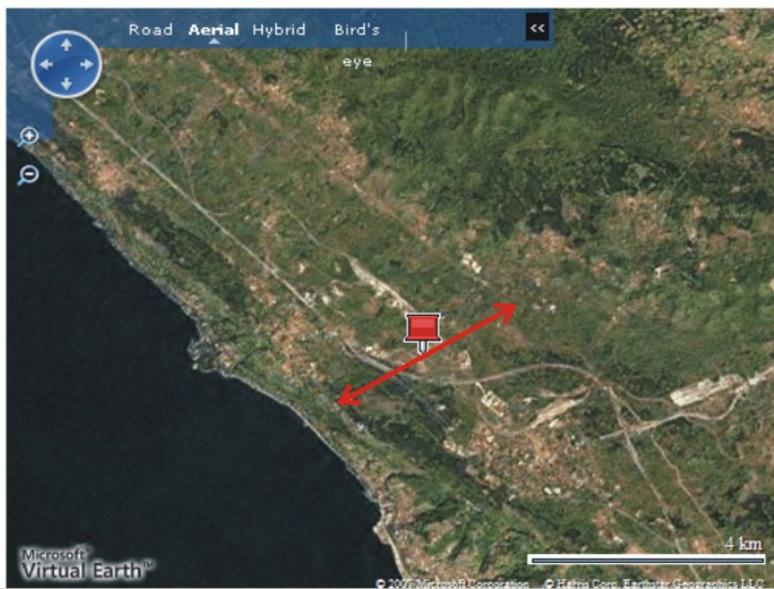


Fig. 5.3 – Fotografia aerea dell'altipiano carsico. Il simbolo rosso indica la posizione della stazione della Grotta Gigante. La linea rosso indica la direzionalità del tilting annuale.

Allo scopo di poter eseguire un'analisi comparata, calcoliamo lo spettro di potenza della temperatura, della pressione e della precipitazione della stazione posta sopra la grotta. Le serie temporali sono riportate nella Fig. 5.4. Analizzando una serie temporale che si estende dal 1.1.1967

al 31.12.2002, con campionamento giornaliero, troviamo che la temperatura esterna misurata alla stazione Grotta Gigante ha una variazione annuale con ampiezza di 9.2°C, con valore massimo il 20 luglio, e valore minimo il 20 gennaio. Lo spettro di potenza e' riportato in Fig. 5.5 a e b, dove si possono individuare due valori estremi con periodo P1=365.22 d e P2= 182.61 d, rispettivamente. Gli spettri della pressione e della precipitazione sono stati calcolati sugli anni 1967-2004, e sono riportati anch'essi nella Fig. 5.5a,b. Su pressione e precipitazione troviamo tre periodicit  preponderanti, che sono quella annuale (365 d), quella semiannuale (182 d) ed una ter-annuale (120 d). La componente ter-annuale e' assente nello spettro della temperatura.

E' interessante osservare la fase delle componenti spettrali, riportata in Tab. 5.1. Dalla tabella emerge che la massima escursione annuale dei pendoli verso SW avviene il giorno 257 (257=75.8+365/2), che e' 21 giorni dopo il massimo della variazione annuale della precipitazione piovosa (giorno 236.5) oppure 34 giorni dopo il massimo della variazione annuale di temperatura. Considerando la periodicit  semi-annuale troviamo un risultato piu' complicato, in quanto l'escursione delle due componenti di inclinazione sono sfasate di 72 giorni.

P (d)	NS (nrad)		EW (nrad)		Temp (°C)		PR (Hpa)		PL (mm)	
	Amp ²	Fase/ Dmax	Amp ²	Fase	Amp ²	Fase/ Dmax	Amp ²	Fase/ Dmax	Amp ²	Fase/ Dmax
365.61	5054	-76.19/ 77.4	37293	-74.62/ 75.8						
365.22					83.7	160.5/ 202.4				
365.27							4.6	21.7/ 343.3		
364.45									94.8	126.43/ 236.5
284.61	207.68	143.2/ 171.4	1076	-159.3/ 125.9						
181.70	245	-4.0/ 2.0								
183.93			287	-145.5/ 74.3						
182.61					0.6	-101/ 51.23				
172.16							0.59	-22.1/ 10.57		
182.23									113.16	171.03/ 95.7
129.22	59.40	-132.6/ 47.6								
128.67			90.77	92.13/ 95.7						
121.76							0.63	-114/ 38.56		
117.86									79.18	179.7/ 59.0

Tab. 5.1 Analisi spettrale dei fattori meteorologici (Temperatura (Temp.), Pressione (PR) e Precipitazione (PL)) e dei due pendoli NS ed EW. La fase viene espressa sia in gradi che nel giorno dell'anno (Dmax) nel quale si trova il massimo della variazione oscillatoria corrispondente ad un dato periodo di oscillazione.

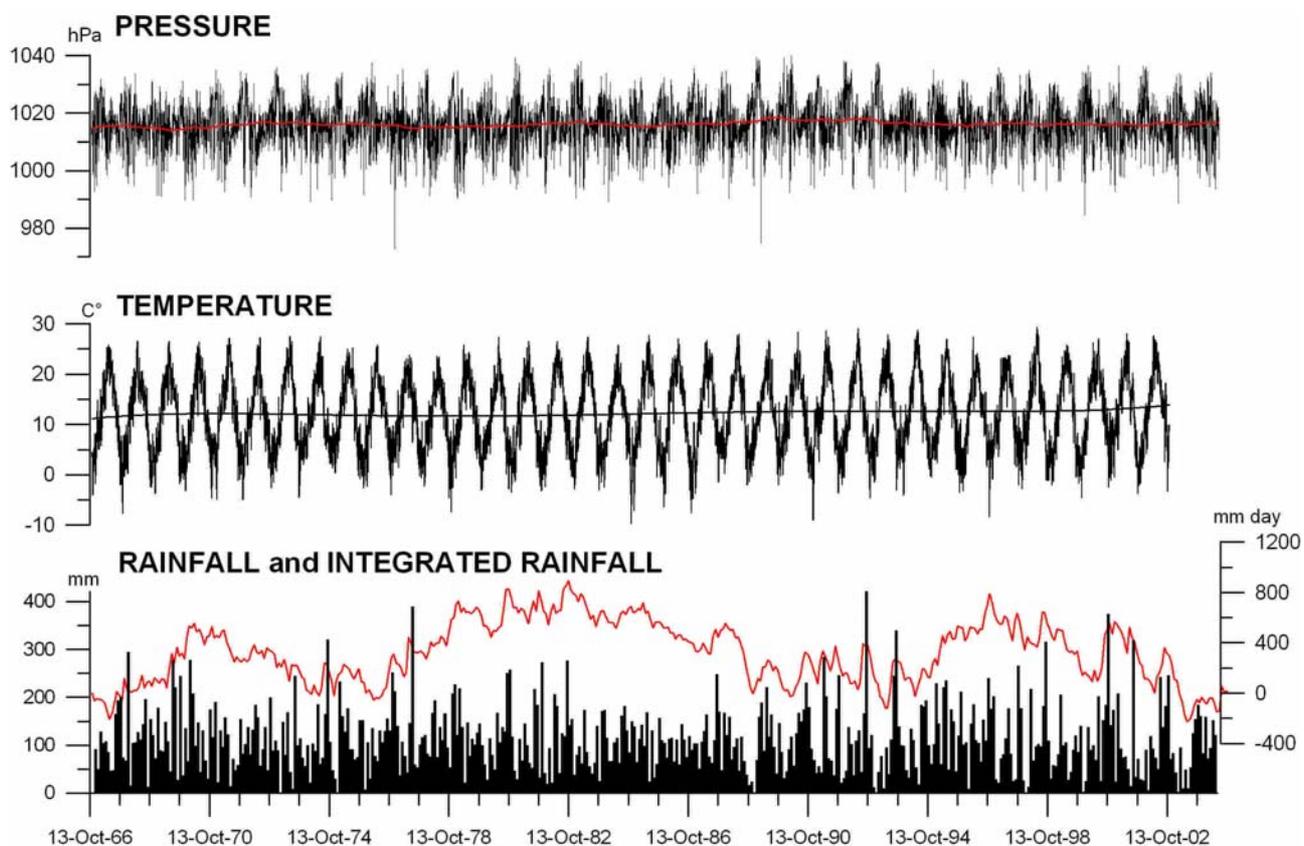


Fig. 5.4 - Serie temporali di temperatura, pressione e precipitazione piovosa misurati nella stazione di Borgo Grotta Gigante (Commissione Grotte "Eugenio Boegan", Soc. Alpina delle Giulie), i principali fattori meteorologici che possono influenzare la stazione.

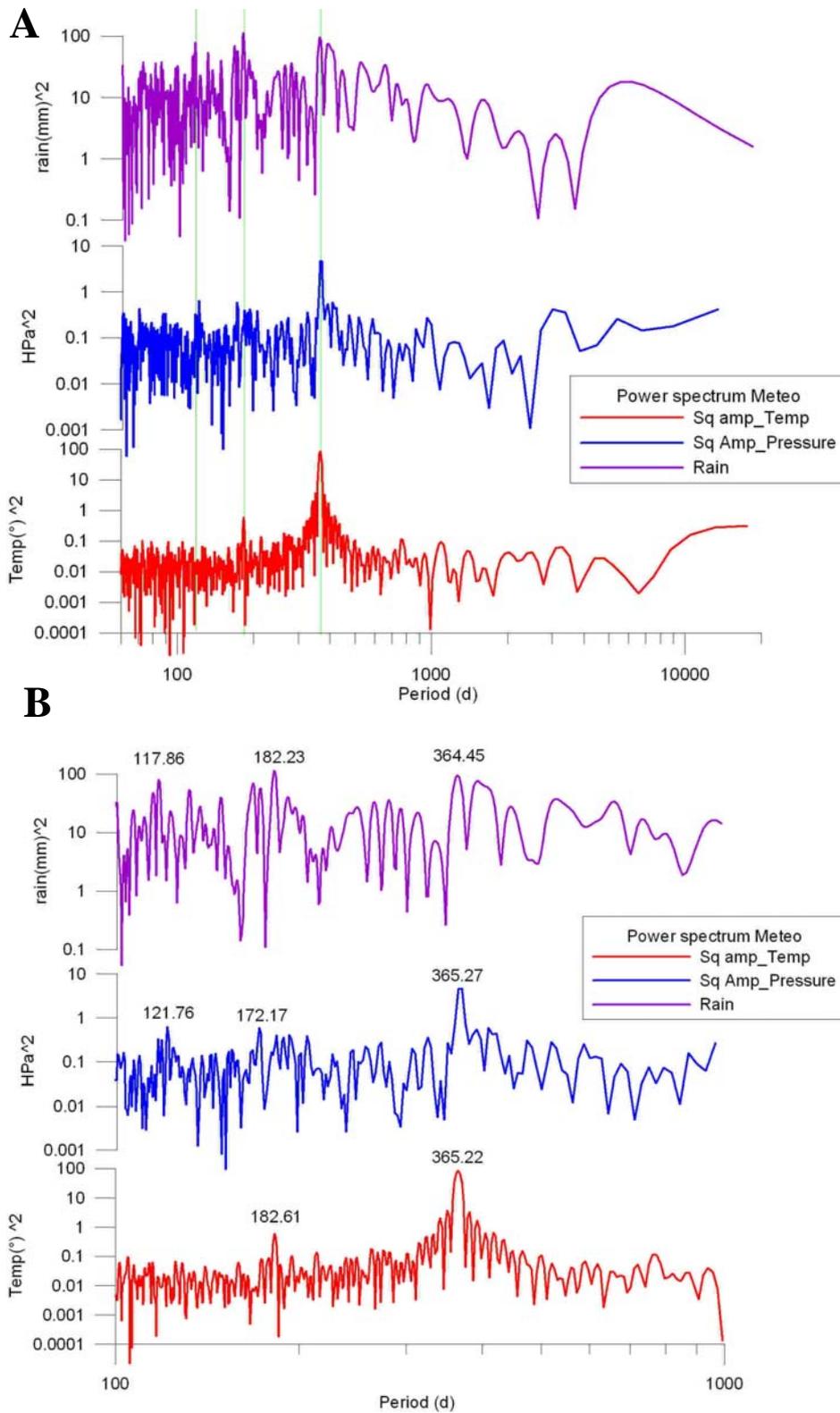


Fig. 5.5 – Spettro di potenza dei fattori meteorologici (temperatura, pressione e precipitazione). A) spettro completo. B) Spettro limitato alle periodicità da 100 d a 1000 d. I picchi principali dello spettro sono evidenziati con i rispettivi periodi (d)

6 - Osservazioni dei pendoli LPHP con acquisizione digitale nell'ambito di frequenze delle onde sismiche

Come accennato nel paragrafo 3, il sistema di acquisizione digitale dei pendoli LPHP preleva i dati ad una frequenza elevata: il sistema digitale di prima generazione (CCD) acquisiva i dati ad una frequenza di approssimativamente 15 campioni al secondo, mentre quello di seconda generazione (PSD) li preleva alla frequenza doppia di approssimativamente 30 campioni al secondo. Il sistema di acquisizione digitale fornisce quindi registrazioni nell'ambito delle onde sismiche. A partire da dicembre 2003 si è iniziata l'archiviazione sistematica di tutti gli eventi sismici di magnitudo elevata ($M \geq 6$). La soglia è stata abbassata al valore di $M \geq 4$ per gli eventi più vicini, come per esempio quelli generati nell'area del Mediterraneo, dell'Adriatico e nello spazio Alpino. L'elenco di questi eventi è riportato nella **Tab. 6.1**, e le rispettive registrazioni sono disponibili a richiesta. Gli eventi sono stati selezionati basandosi sul database del NEIC (2007).

Tab.6.1 Maggiori eventi sismici rilevati dai pendoli della Grotta Gigante durante il periodo 01/01/07-03/03/08 (NEIC). Selezione: Telesismi: $M \geq 6$, eventi Mediterraneo, Adriatico, Alpi: $M \geq 4$. I dati sono stati archiviati e sono disponibili a richiesta.

TABELLA GRAFICI TERREMOTI RILEVATI DAI PENDOLI DELLA GROTTA GIGANTE NEL PERIODO 01/01/07-03/03/08

Selezione: Telesismi: $M \geq 6$, eventi Mediterraneo: $M \geq 4$

No.	Localita'	Data	Ora	M	File dati e file grafico
216	Kyrgyzstan	08/01/07	17:22	6.1	7008-1719fil.dat 080107Kyrgyzstan.gr
217	Kuril Isl.	13/01/07	04:23	8.2	7013-0407fil.dat 130107Kuril.grf
218	Molucca S.	21/01/07	11:28	7.3	7021-1114fil.dat 210107Molucca.grf
219	Taiwan	25/01/07	10:59	6.0	7025-1113fil.dat 250107Taiwan.grf
220	Mariana Isl.	30/01/07	21:38	6.3	7030-2123fil.dat 300107Mariana.grf
221	Azores	12/02/07	10:35	6.0	7043-1012fil.dat 120207Azores.grf
222	Indonesia	20/02/07	08:04	6.7	7051-0810fil.fat 200207Indonesia.grf
223	Indonesia	06/03/07	03:50 05:49	6.4 6.3	7065-0407fil.dat 060307Indonesia.grf
224	Vanuatu Japan Vanuatu	25/03/07	00:40 00:42 01:08	7.2 6.7 6.0	7084-0104fil.dat 250307Vanuatu.grf
225	Greece	25/03/07	13:58	5.7	7084-1314fil.dat 250307Greece.grf
226	Solomon I.	01/04/07	20:40 20:48 21:12	8.0 6.7 6.4	7091-2100fil.dat 010407Solomon.grf
227	Azores Isl.	05/04/07	03:57	6.3	7095-0406fil.dat 050407Azores.grf
228	Azores Isl.	07/04/07	07:09	6.3	7097-0709fil.dat 070407Azores.grf

229	Greece	10/04/07	07:13 07:16	5.1 5.2	7100-0708fil.dat 100407Greece.grf
230	Laos	16/05/07	08:56	6.3	7136-0810fil.dat 160507Laos.grf
231	China	02/06/07	21:35	6.3	7153-2123fil.dat 020607China.grf
232	Bismarck S.	07/06/07	00:41	6.2	7158-0002fil.dat 070607Bismarck.grf
233	Guatemala	13/06/07	19:30	6.7	7164-1921 fil.dat 130607Guate.grf
234	Papua	14/06/07	17:41	6.0	7165-1719fil.dat 140607Papua.grf
235	Papua	18/06/07	06:19	6.3	7169-0608fil.dat 180607Papua.grf
236	Papua	28/06/07	02:52	6.7	7179-0305fil.dat 280607Papua.grf
237	Greece	29/06/07	18:09	5.4	7180-1819fil.dat 290607Greece.grf
238	Japan	16/07/07	01:13	6.6	7197-0103fil.dat 160707Japan_1.grf
239	Japan	16/07/07	14:18	6.8	7197-0911fil.dat 160707Japan_2.grf
240	Molucca S.	26/07/07	05:40	6.9	7207-0507fil.dat 260707Molucca.grf
241	Vanutau	01/08/08	17:09	7.2	7213-1719fil.dat 010807Vanutau.grf
242	Russia, Tatar Alaska	02/08/07	02:38 03:22	6.2 6.7	7214-0204fil.dat 020807Russia.grf
243	Java	08/08/07	17:05	7.5	7220-1719fil.dat 080807Java.grf
244	Alaska	15/08/07	20:22	6.4	7227-2022fil.dat 150807Alaska.grf
245	Peru	15/08/07	23:41	8.0	7227-2302fil.dat 150807Peru.grf
246	Banda See	17/08/07	03:04	6.4	7229-0305fil.dat 170807Banda.grf
247	Gulf of Cal.	01/09/07	19:41	6.1	7244-1921 fil.dat 010907GulfC.grf
248	Santa Cruz I	02/09/07	01:05	7.2	7245-0103fil.dat 020907SCruz.grf
249	Kuril Island	03/09/07	16:15	6.2	7246-1618FIL.DAT 030907Kuril.grf
250	Taiwan	06/09/07	17:51	6.5	7249-1820fil.dat 060907Taiwan.grf
251	Colombia	10/09/07	01:49	6.8	7253-0103fil.dat 100907Colombia.grf
252	Sumatra	12/09/07	11:10	8.4	7225-1114fil.dat 120907Sumatra.grf
253	Indonesia	13/09/07	03:35	7.0	7256-0305fil.dat 130907Indonesia.grf
254	Indonesia	13/09/07	09:49	6.2	7256-0608fil.dat 130907_2Indone.grf
255	Sumatra	14/09/07	06:02	6.4	7257-0608fil.dat 140907Sumatra.grf
256	Indonesia	20/09/07	08:31	6.7	7263-0810fil.dat 200907Indonesia.grf
257	Greece	23/09/07	00:55	5.3	7266-0001 fil.dat 230907Greece.grf
258	papua	26/09/07	12:36	6.7	7269-1214fil.dat 260907Papua.grf
259	Loyalty Isl.	27/09/07	19:58	6.3	7270-2022fil.dat 270907Loyalty.grf
260	Loyalty Isl.	28/09/07	01:02 01:36	6.3 6.3	7271-0103fil.dat 280907Loyalty.grf
261	Mariana Isl.	28/09/07	13:39	7.4	7271-1316fil.dat 280907Mariana.grf
262	Sumatra	04/10/07	12:40	6.2	7277-1214fil.dat 041007Sumatra.grf
263	Fiji	05/10/07	07:18	6.5	7278-0709fil.dat 051007Fiji.grf
264	Mariana Isl.	06/10/07	12:39	6.1	7279-1214fil.dat 061007Mariana.grf
265	New Zeland	15/10/07	12:30	6.8	7288-1214fil.dat 151007NewZ.grf

266	Fiji	16/10/07	21:06	6.6	7289-2123fil.dat 161007Fiji.grf
267	Sumatra	24/10/07	21:03	6.8	7297-2123fil.dat 241007Sumatra.grf
268	Kuril Island	25/10/07	13:50	6.1	7298-1315fil.dat 251007Kuril.grf
269	Mariana Isl.	31/10/07	03:30	7.2	7304-0305fil.dat 311007Marian.grf
270	Alaska	31/10/07	13:44	6.0	7304-fil.dat 311007Alaska.grf
271	Chile	14/11/07	15:41	7.7	7318-1518fil.dat 141007Chile.grf
272	Chile	15/11/07	15:03 15:06	6.1 6.8	7319-1517fil.dat 151107Chile.grf
273	Peru-Ecuad.	16/11/07	03:13	6.8	7320-0305fil.dat 161107Peru-Ec.grf
274	Papua	22/11/07	08:49	6.7	7326-0810fil.dat 221107Papua.grf
275	Indonesia	25/11/07	16:02	6.4	7329-1618fil.dat 251107Indonesia.grf
276	Indonesia	25/11/07	19:53	6.3	7329-2022fil.dat 251107Indone_2.grf
277	Solomon Isl	27/11/07	11:50	6.6	7331-1214fil.dat 271107Solomon.grf
278	Martinique	29/11/07	19:00	7.4	7333-1921fil.dat 291107Martinique.g
279	Fiji	09/12/07	07:28	7.8	7343-0710fil.dat 091207Fiji.grf
280	Chile	13/12/07	07:24	6.2	7347-0709fil.dat 131207Chile.grf
281	Indonesia	15/12/07	09:40	6.3	7349-0911fil.dat 151207Indonesia.grf
282	Chile	16/12/07	08:09	6.7	7350-0810fil.dat 161207Chile.grf
283	Alaska	19/12/07	09:30	7.1	7353-0911fil.dat 191207Alaska.grf
284	Papua	01/01/08	18:55	6.3	8001-1921fil.dat 010108Paoua.grf
285	Queen Ch. Is.	05/01/08	11:01 11:45	6.6 6.4	8005-1113fil.dat 050108QueenCh.grf
286	Greece	06/01/08	05:14	6.1	8006-0506fil.dat 060108Greece.rgf
287	W. Xizang	09/01/08	08:27	6.4	8009-0810fil.dat 090108WXizang.grf
288	Queen Ch. Is.	09/01/08	14:40	6.1	8009-1416fil.dat 090108QueenCh.grf
289	Oregon	10/01/08	01:37	6.3	8010-0103fil.dat 100108Oregon.grf
290	Tonga	11/01/08	07:56	6.0	8022-0810fil.dat 220108Tonga.grf
291	Indonesia	22/01/08	17:15	6.1	8022-1719fil.dat 220108Indonesia.grf
292	Chile	04/02/08	17:01	6.3	8035-1719fil.dat 040208Chile.grf
293	N. Atl. Ridge	08/02/08	09:38	6.9	8039-0911fil.dat 080208NAtlR.grf
294	Sandwich Isl.	10/02/08	12:22	6.5	8041-1214fil.dat 100208Sandwich.grf
295	Mexico	12/02/08	12:50	6.4	8043-1214fil.dat 120208Mexico.grf
296	Greece	14/02/08	10:09 12:09	6.9 6.2	8045-1012fil.dat 140208Grecia.grf
297	Greece	19/02/08	23:16	4.9	8050-2300fil.dat 190208Greece.grf
298	Indonesia	20/02/08	08:09	7.4	8051-0811fil.dat 200208Indonesia.grf
299	Greece	20/02/08	18:27	6.2	8051-1820fil.dat 200208Greece.grf
300	Svalbard R.	21/02/08	02:46	6.2	8052-0204fil.dat 210208Svalbard.grf
301	Sandwich Isl.	23/02/08	15:57	6.7	8054-1618fil.dat 230208Sandwich.grf
302	Indonesia	24/02/08	14:46	6.4	8055-1416fil.dat 240208Indonesia.grf

303	Indonesia	25/02/08	08:37	7.0	8056-0811fil.dat 250208Indonesia.grf
304	Indonesia	25/02/08	18:06	6.4	8056-1820fil.dat 250208Ind_2.grf
305	Indonesia	25/02/08	21:02	6.6	8056-2123fil.dat 250208Ind_3.grf
306	Greece	26/02/08	10:46	5.4	8057-1012fil.dat 260208Greece.grf
307	Bonin Islands	27/02/08	06:54	6.3	8058-0608fil.dat 270208Bonin.grf
308	Kuril Islands	03/03/08	09:31	6.5	8063-0911fil.dat 030308Kuril.grf
309	Philippines	03/03/08	13:50 14:11	6.0 6.9	8063-1416fil.dat 030308Philipp.grf

Allo scopo di isolare le osservazioni sismologiche dal restante segnale osservato, è stato applicato un filtro al coseno di passa banda, con periodi di taglio di 120 sec e 4 sec, rispettivamente. La limitazione nella frequenza superiore e' dettata dalla soglia di rumore della registrazione. E' stato calcolato lo spettro di ampiezza medio per le sequenze di cui sopra, ed e' stata stimata la frequenza superiore, alla quale lo spettro devia dalla relazione lineare nella rappresentazione bi-logaritmica. Tale frequenza è stata stimata a 0.25 Hz. La frequenza inferiore e' stata scelta in modo da eliminare le periodicità lunghe, ed e' stata scelta pari a 0.0167 Hz, che corrisponde al periodo di 120 sec. I dati filtrati passa banda sono rappresentati nelle **Fig. 6.1 A-T**, per una selezione degli eventi disponibili. La componente EW e' sistematicamente più rumorosa fino all'agosto 2007, nel periodo precedente alla sostituzione della guaina protettiva.

A)

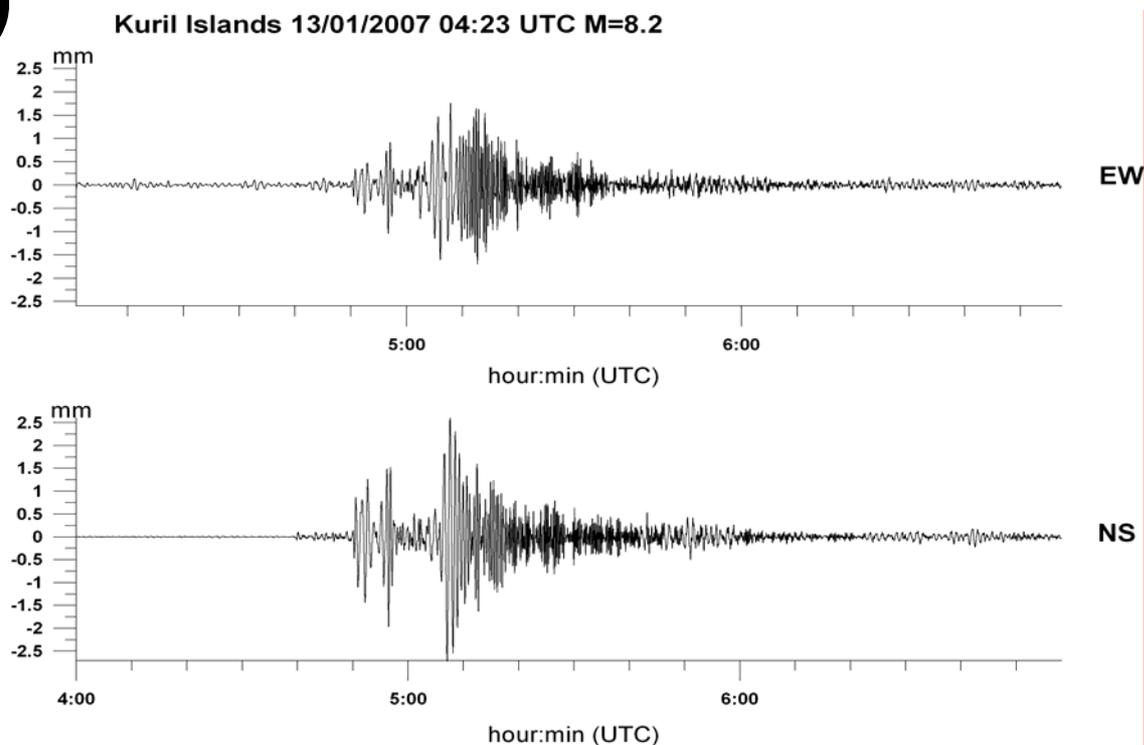
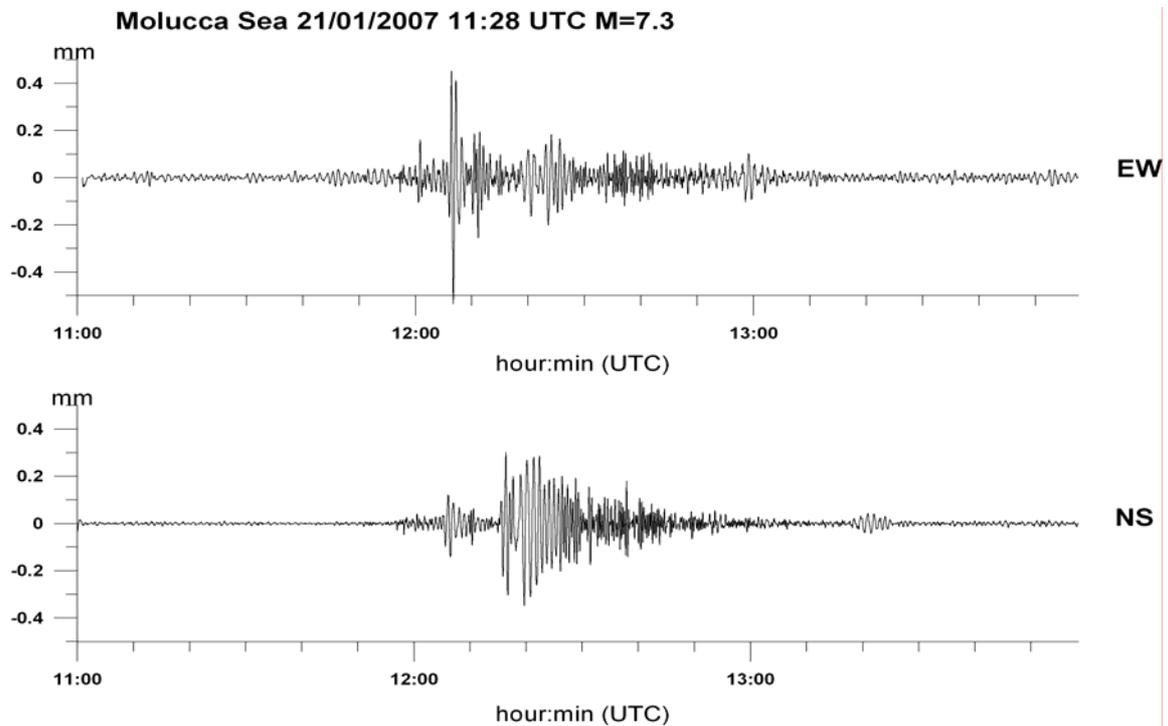
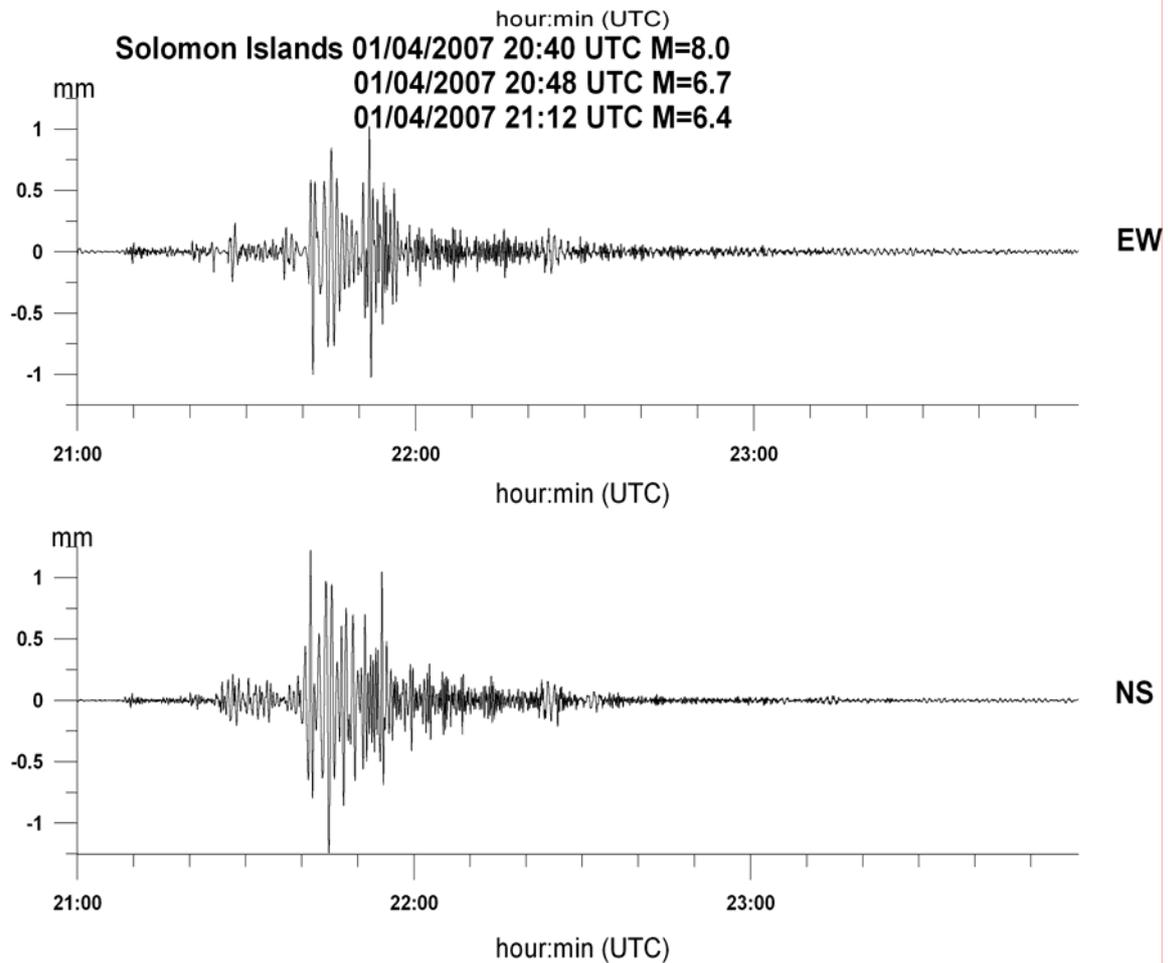


Fig. 6.1 (A-T) – Registrazione di alcuni eventi sismici di magnitudo rilevante avvenuti durante il periodo dal 01 gennaio 2007 a 03 marzo 2008 (vedi Tab. 6.1). I dati originali sono stati filtrati con un filtro passa banda con banda passante per le frequenze comprese fra 0.0167 Hz e .25 Hz.

B)

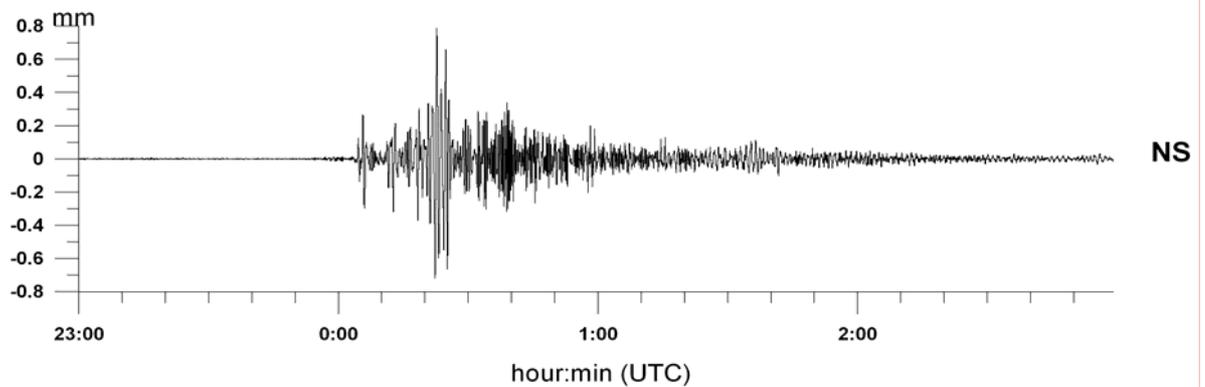
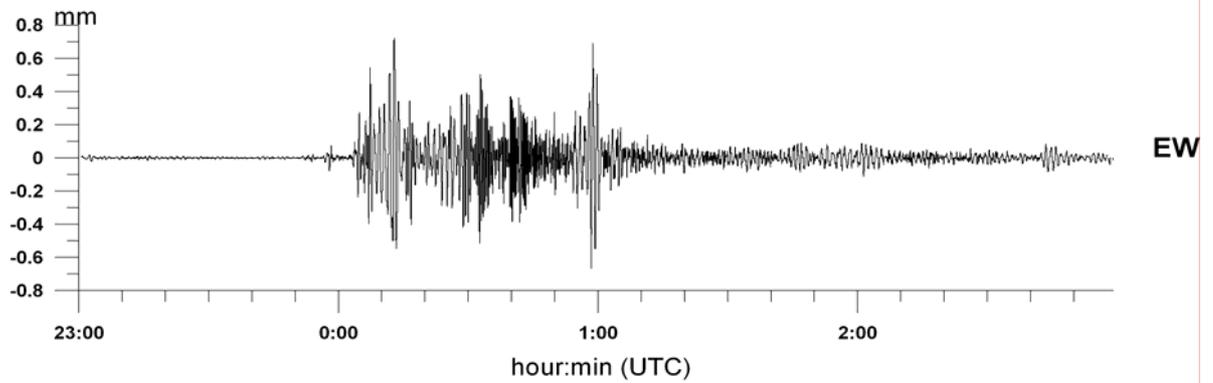


C)



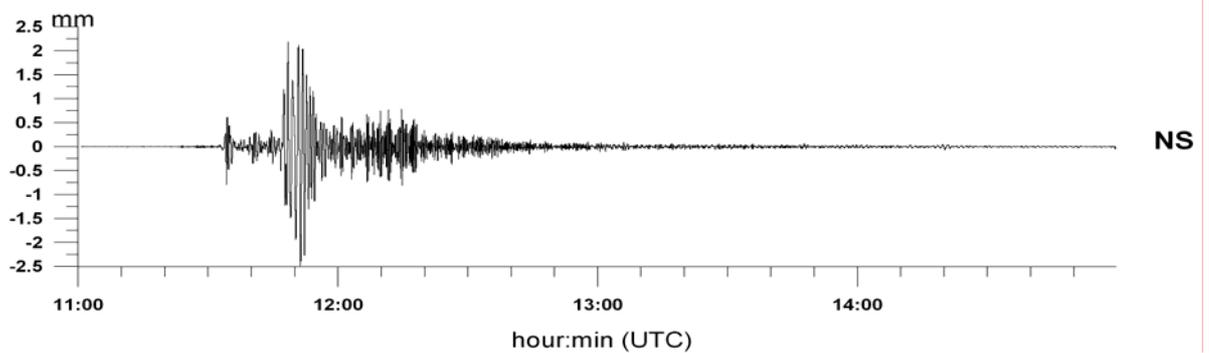
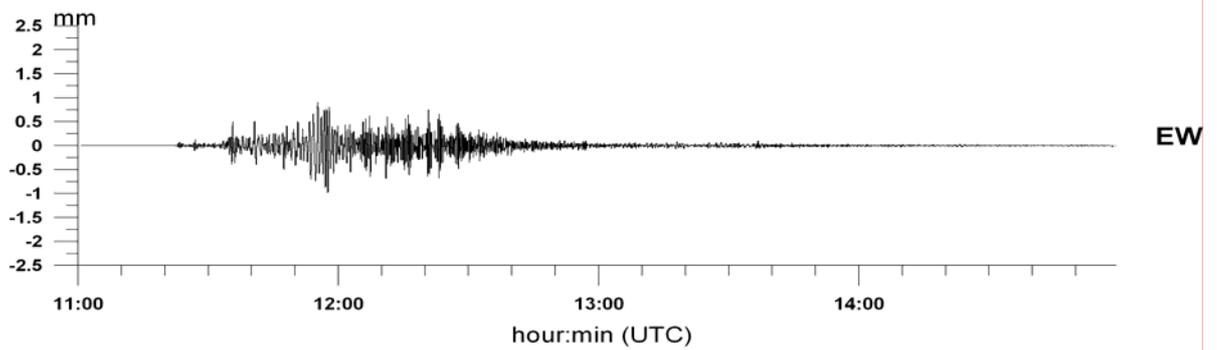
D)

Peru 15/08/2007 23:41 UTC M=8.0



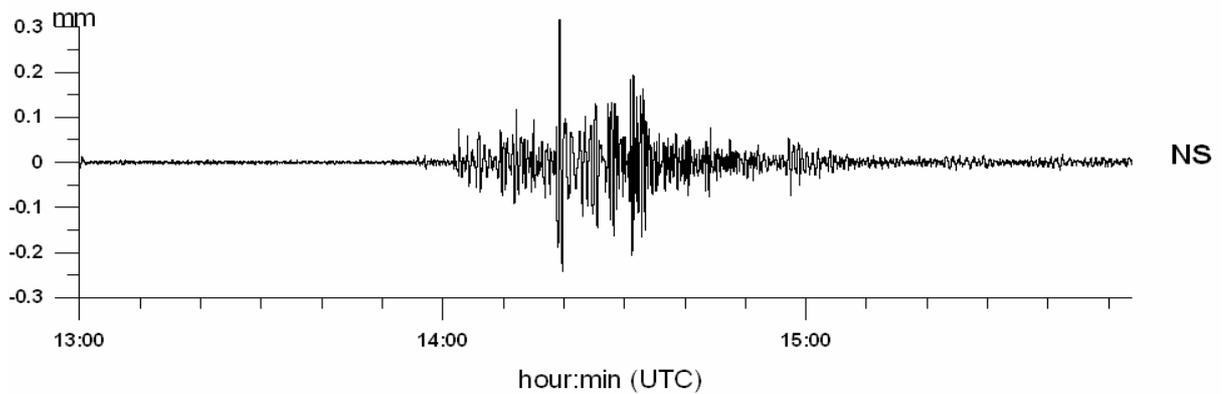
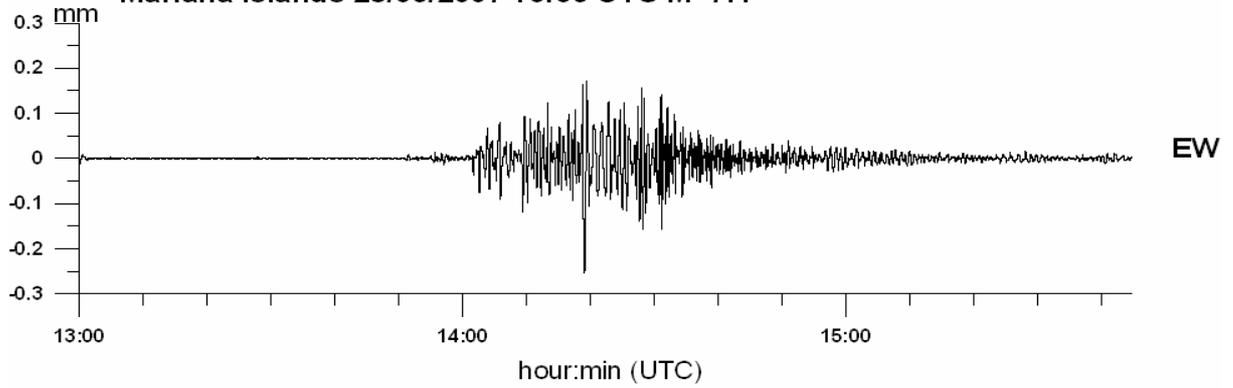
E)

Sumatra 12/09/2007 11:10 UTC M=8.4



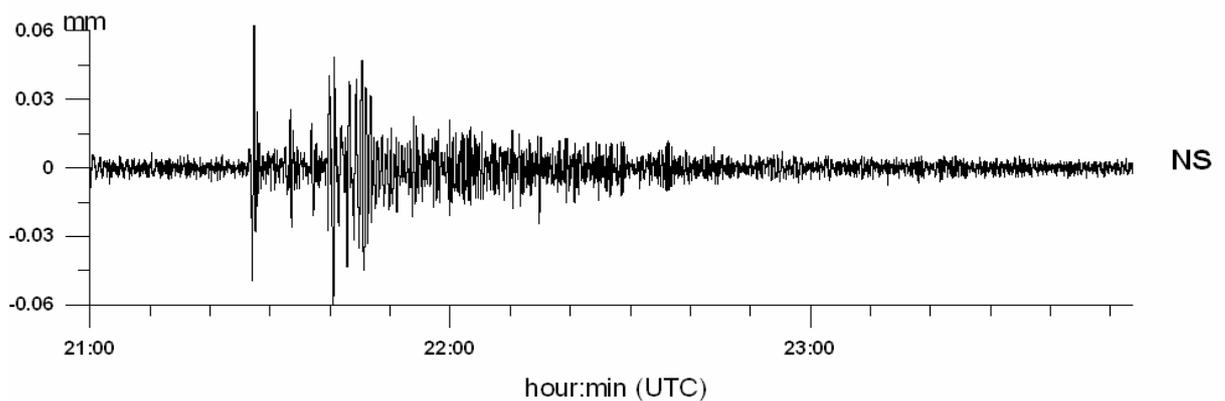
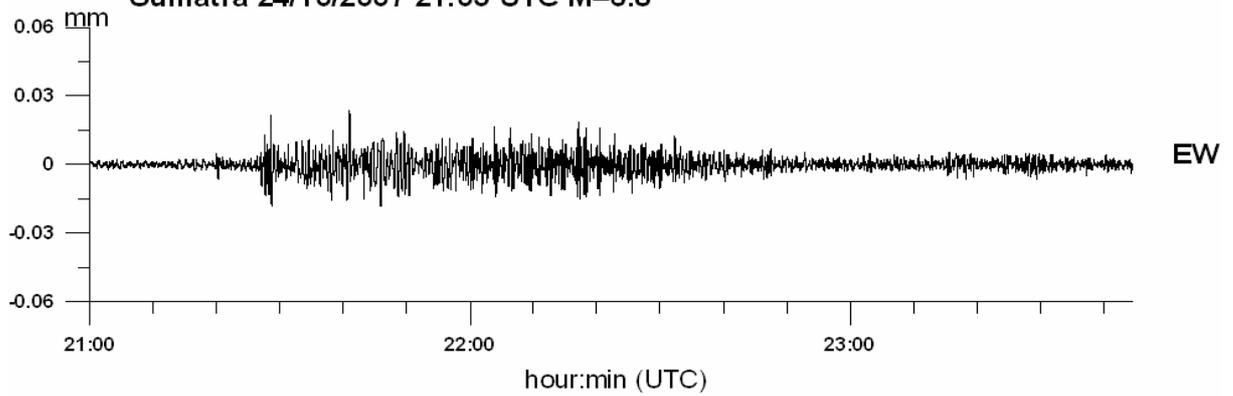
F)

Mariana Islands 28/09/2007 13:39 UTC M=7.4

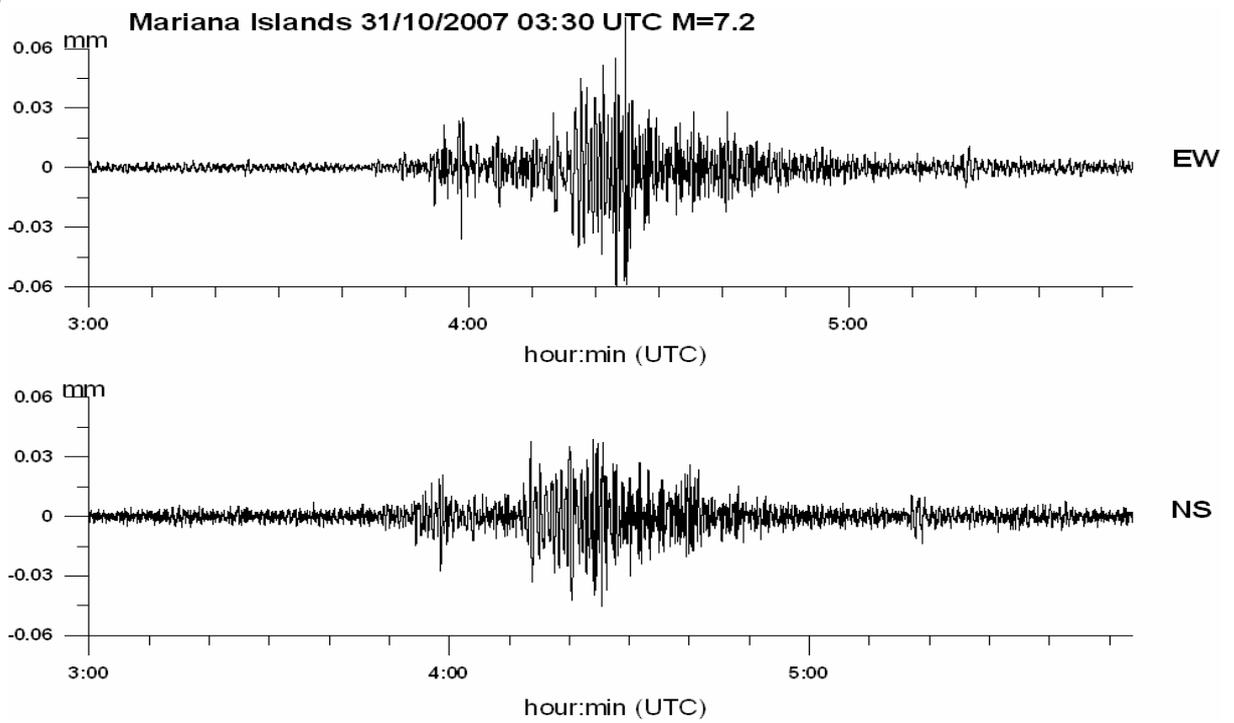


G)

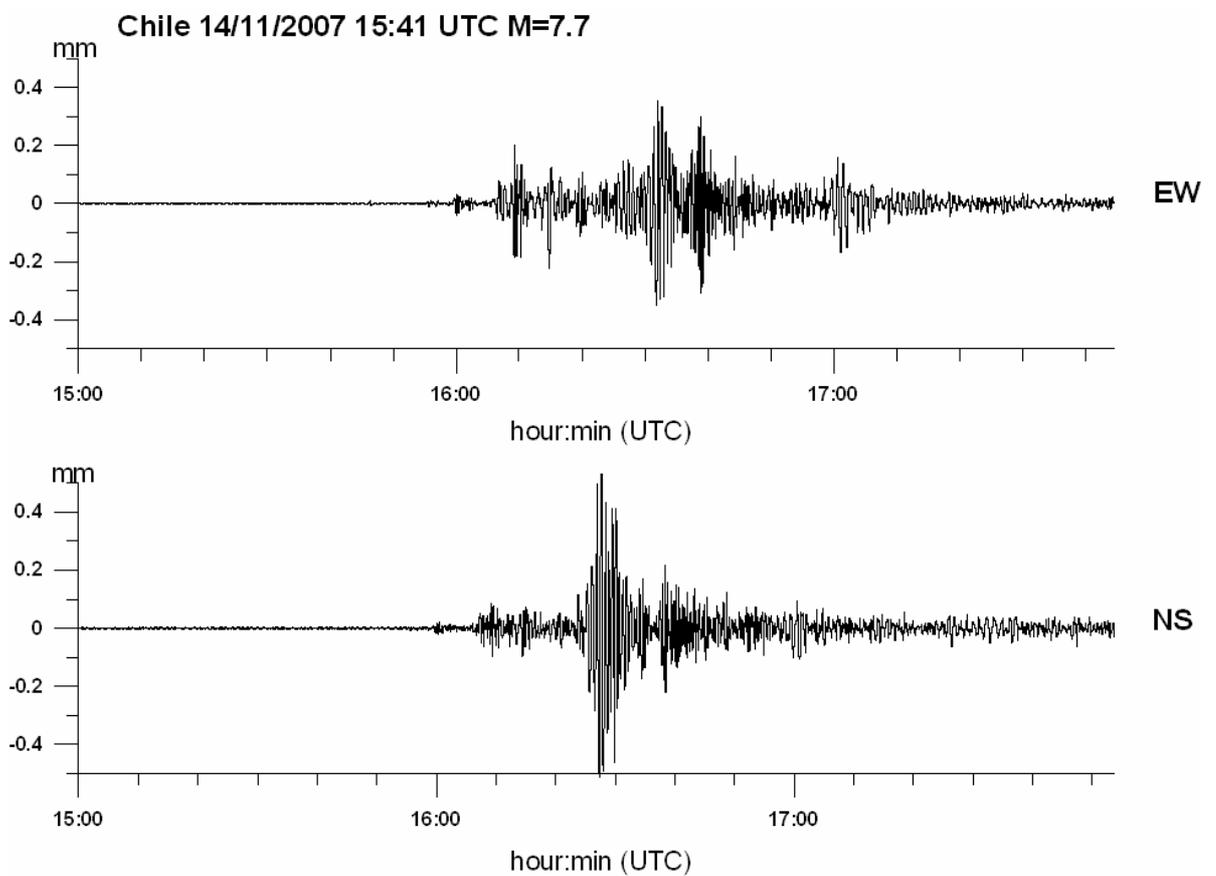
Sumatra 24/10/2007 21:03 UTC M=6.8



H)

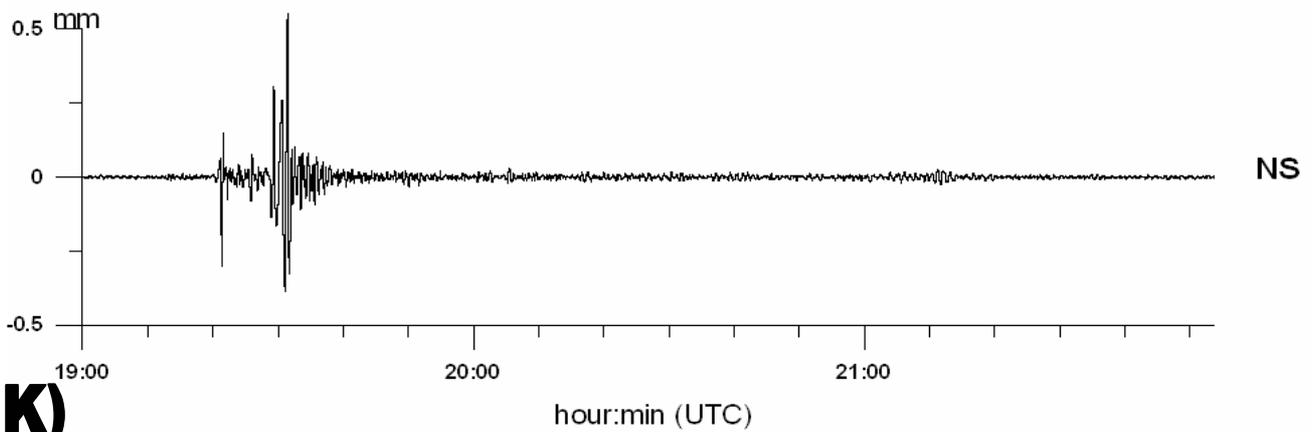
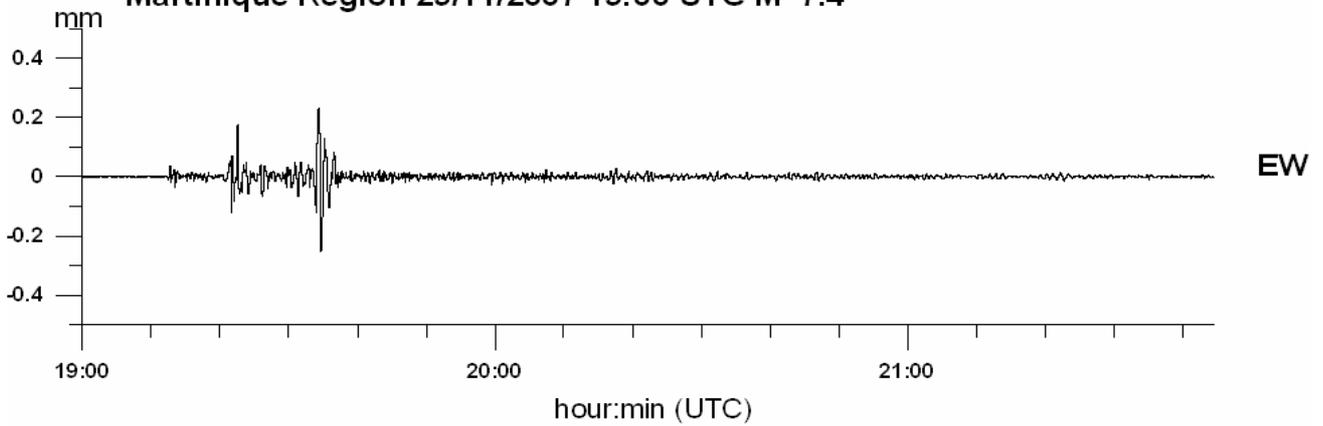


I)



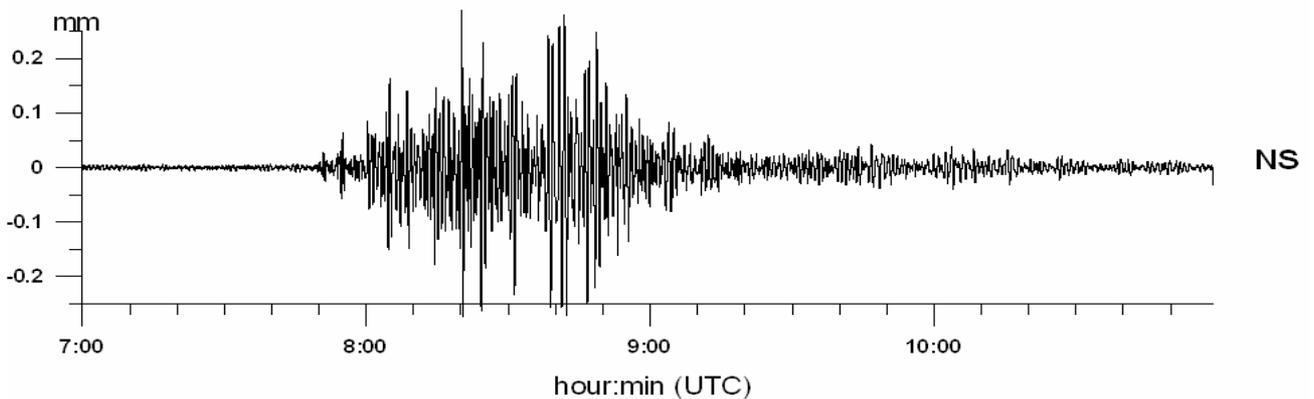
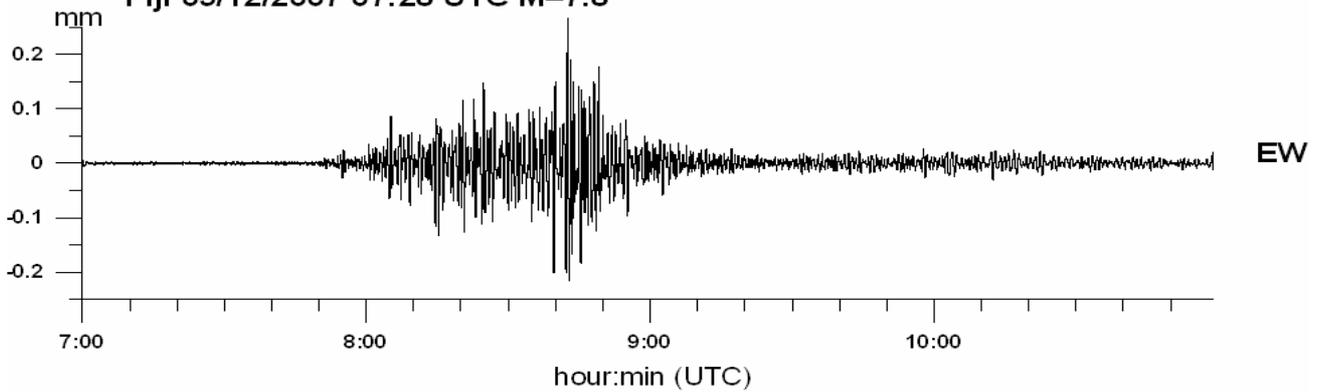
J)

Martinique Region 29/11/2007 19:00 UTC M=7.4

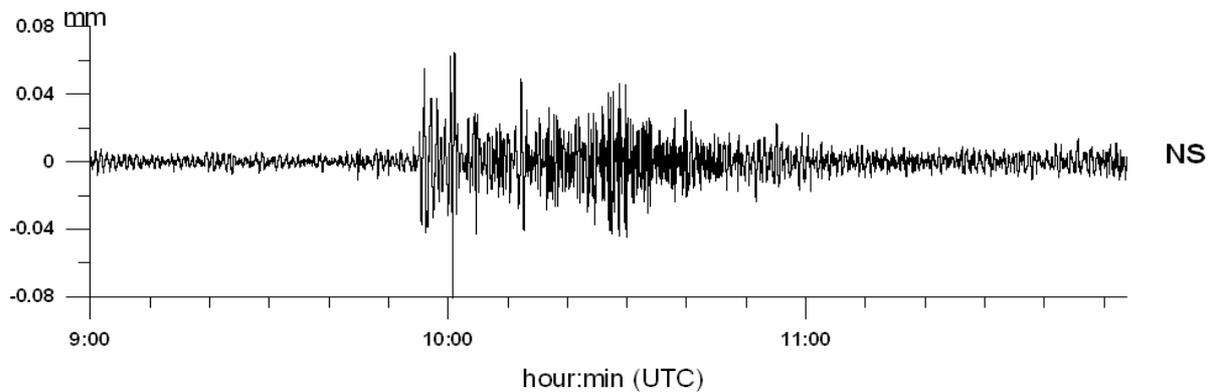
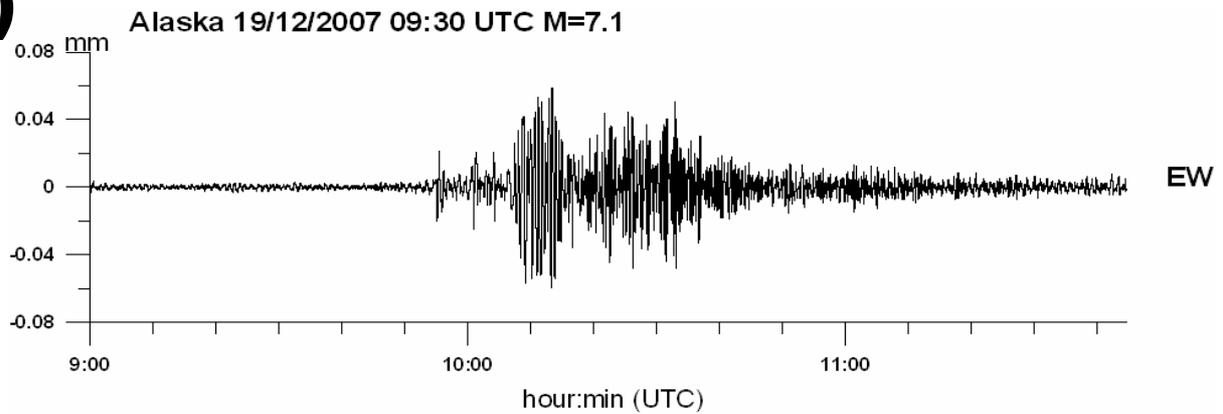


K)

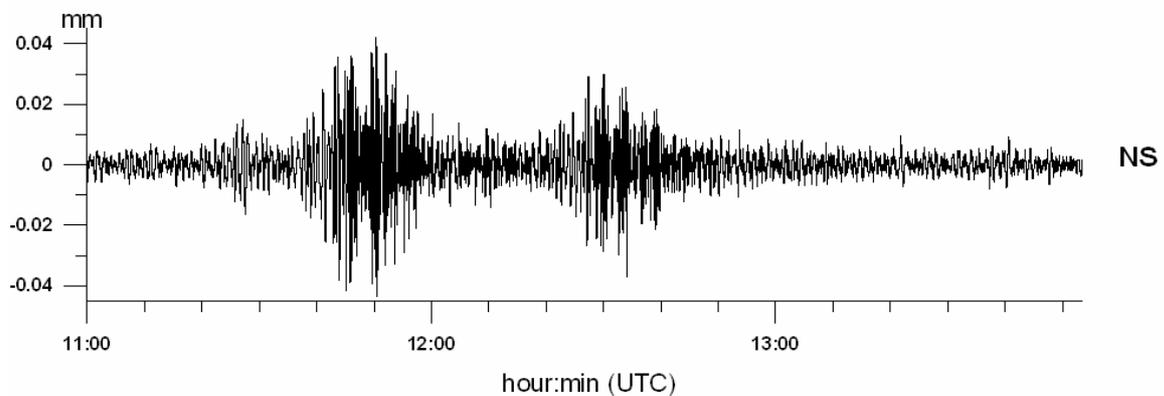
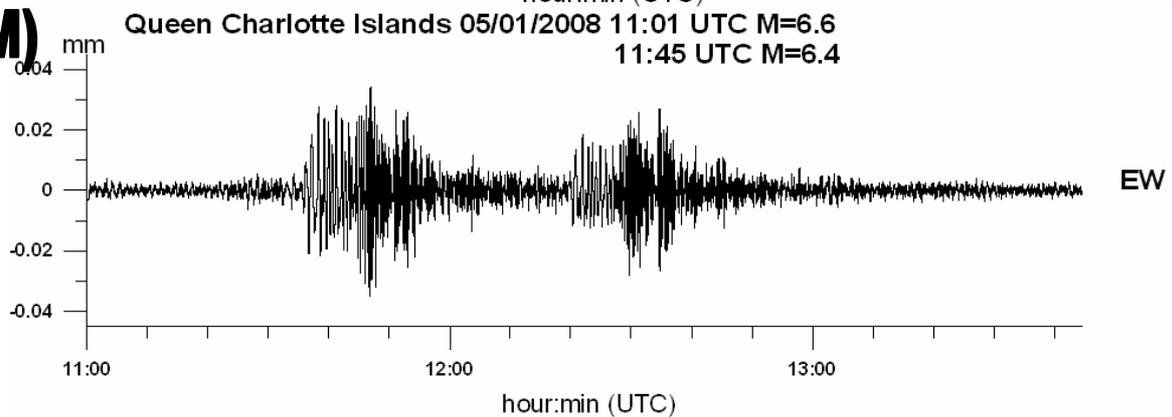
Fiji 09/12/2007 07:28 UTC M=7.8



L)

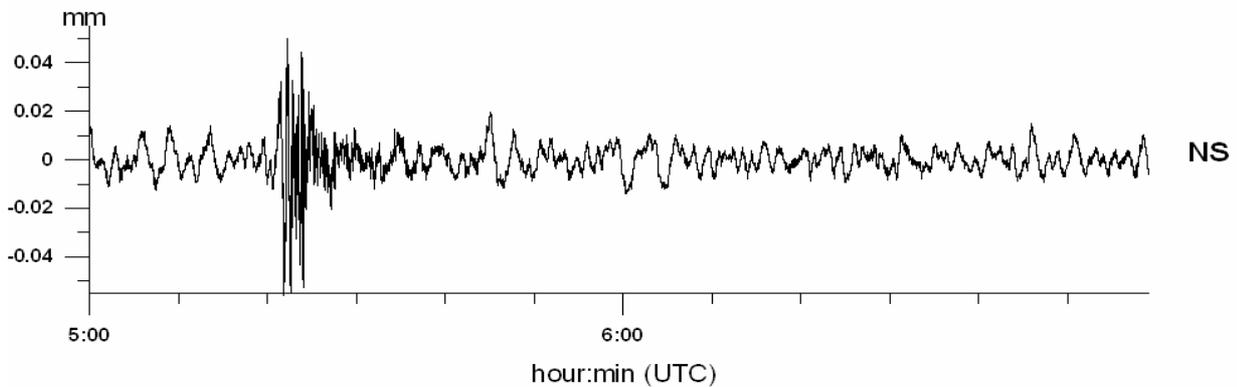
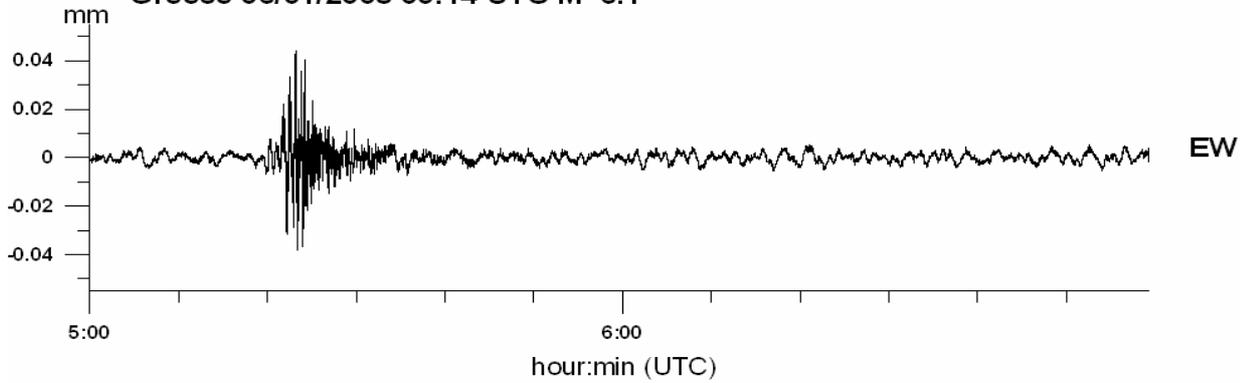


M)



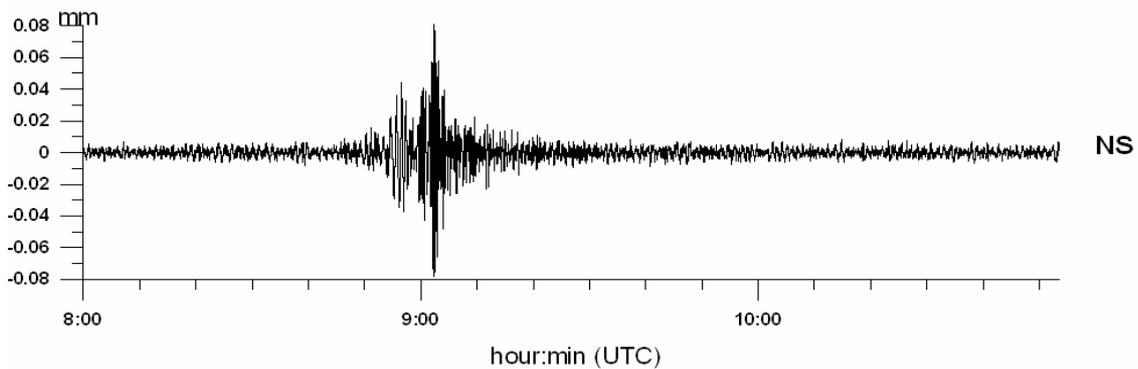
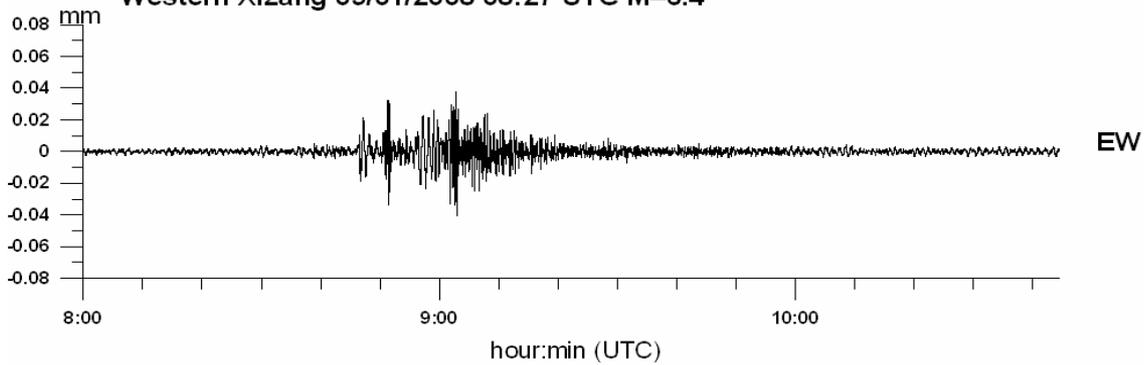
N)

Greece 06/01/2008 05:14 UTC M=6.1

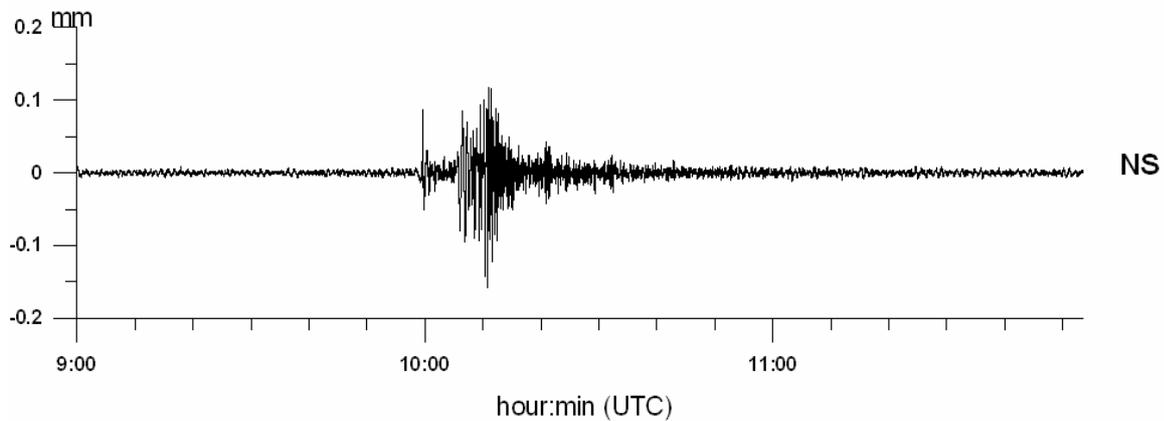
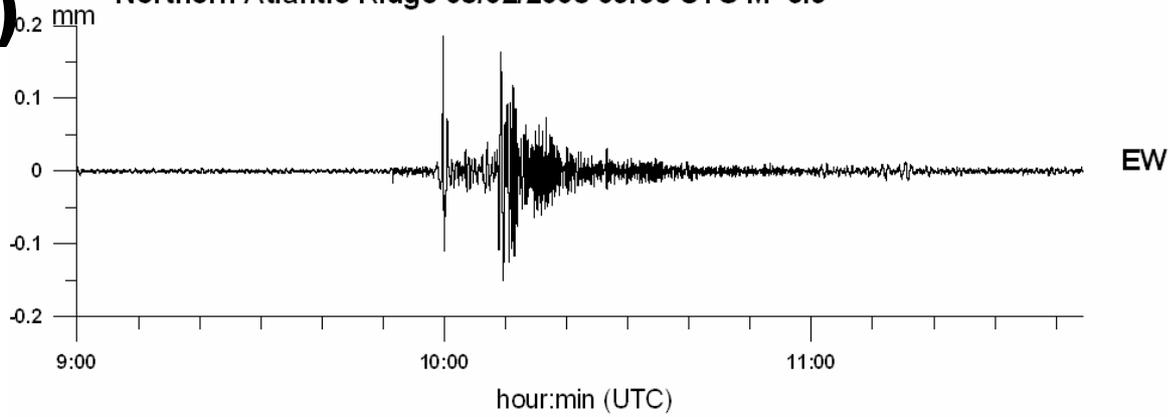


O)

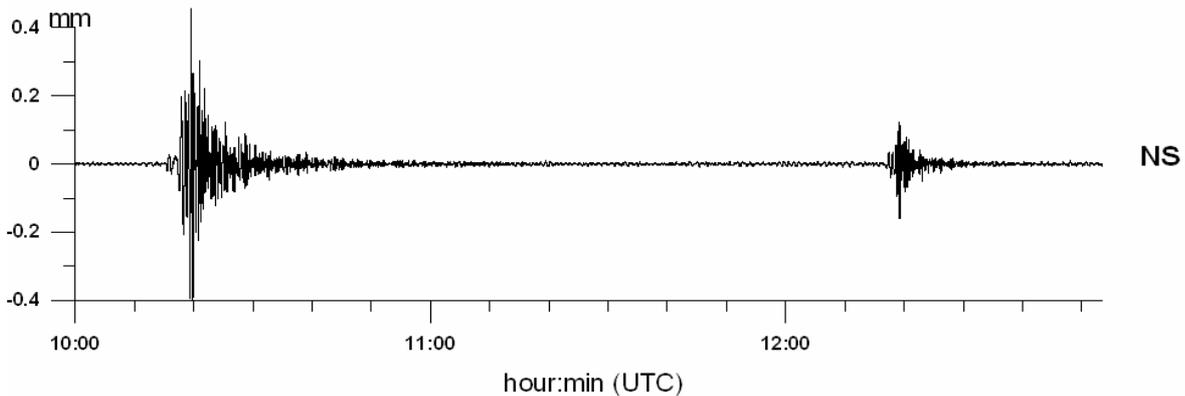
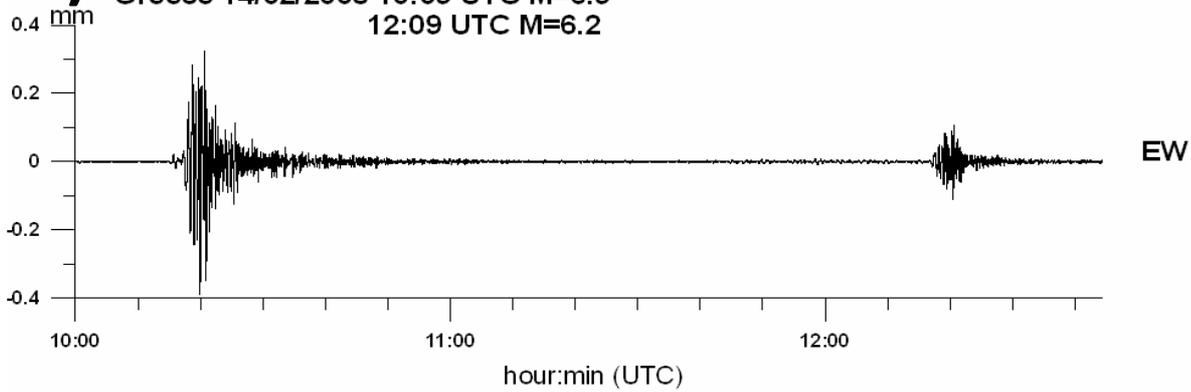
Western Xizang 09/01/2008 08:27 UTC M=6.4



P) Northern Atlantic Ridge 08/02/2008 09:38 UTC M=6.9

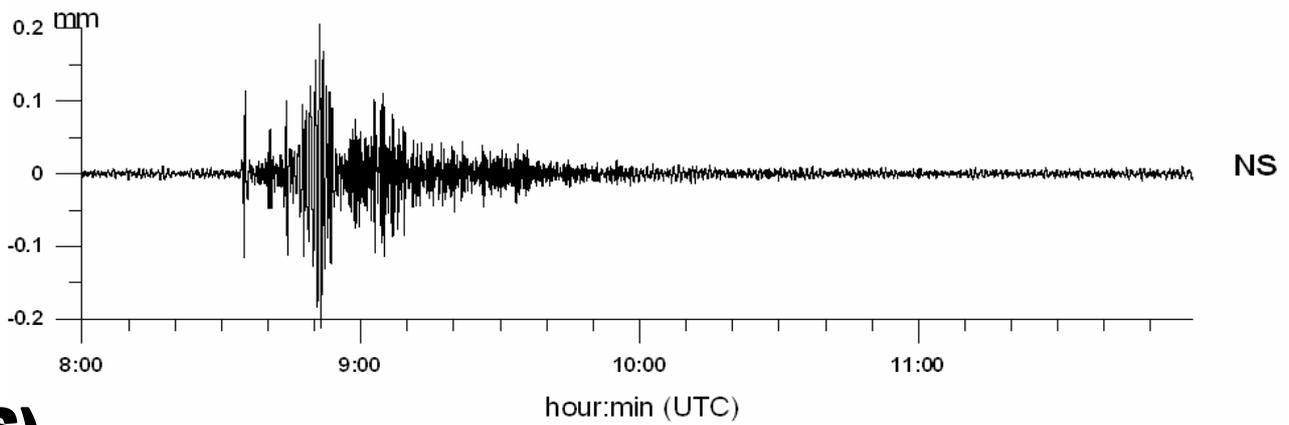
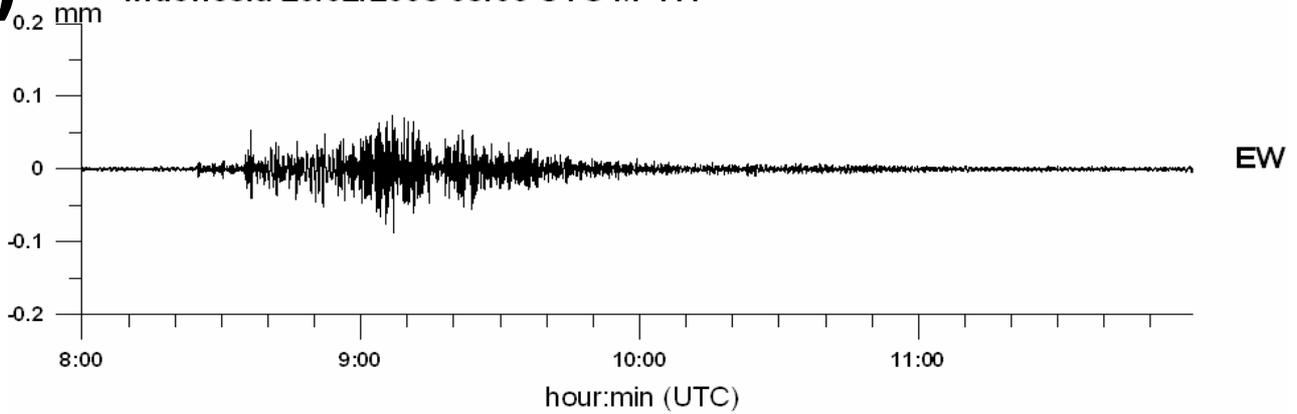


Q) Greece 14/02/2008 10:09 UTC M=6.9
12:09 UTC M=6.2



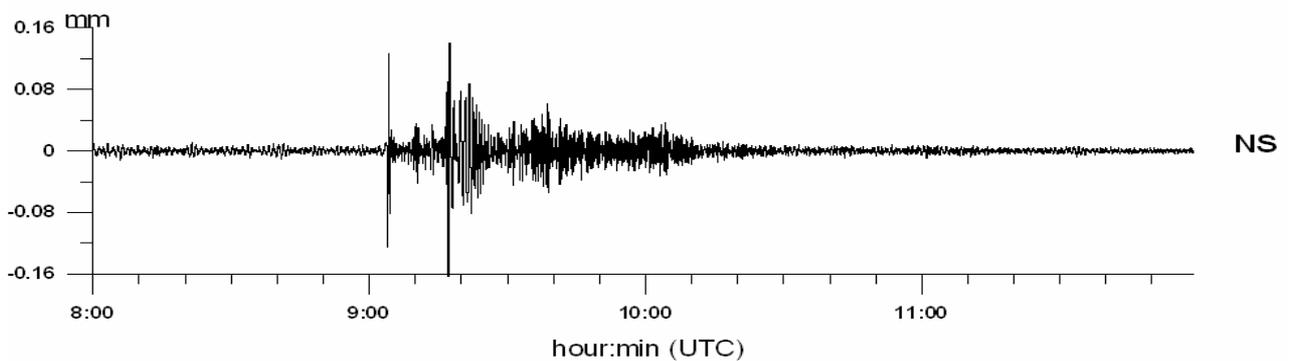
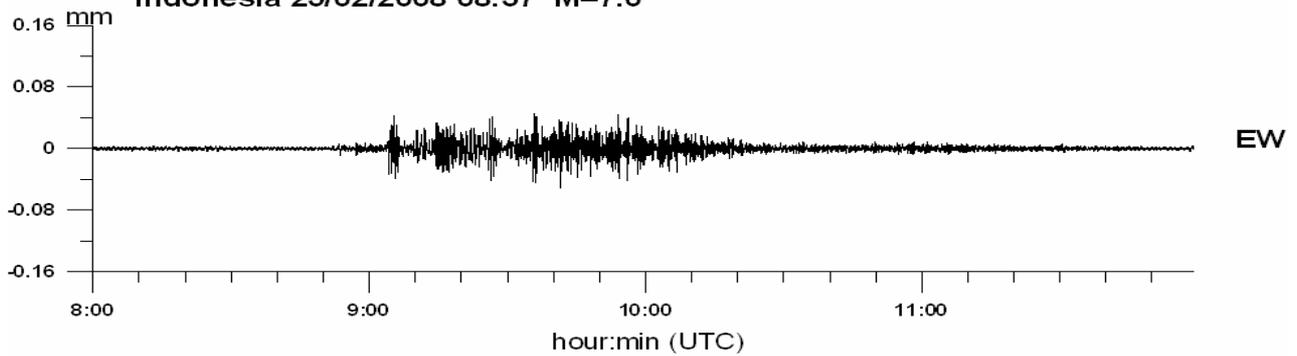
R)

Indonesia 20/02/2008 08:09 UTC M=7.4



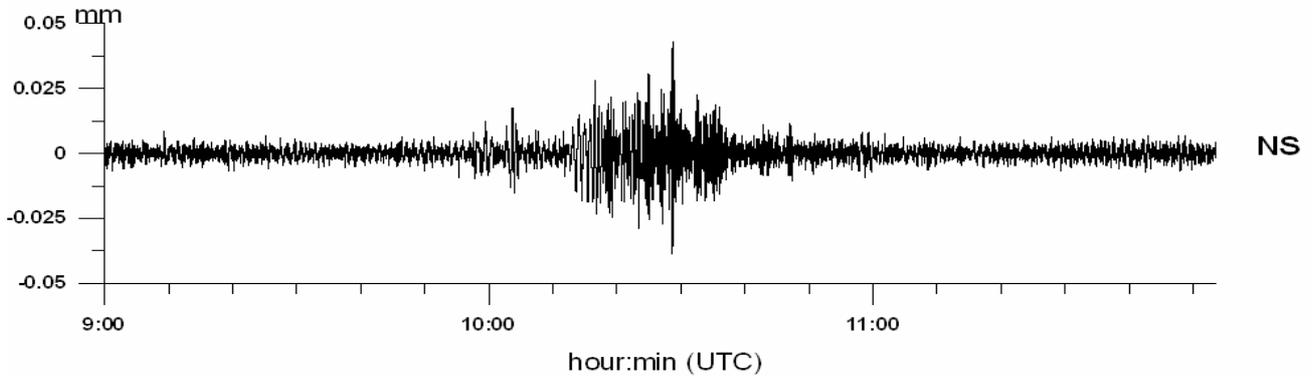
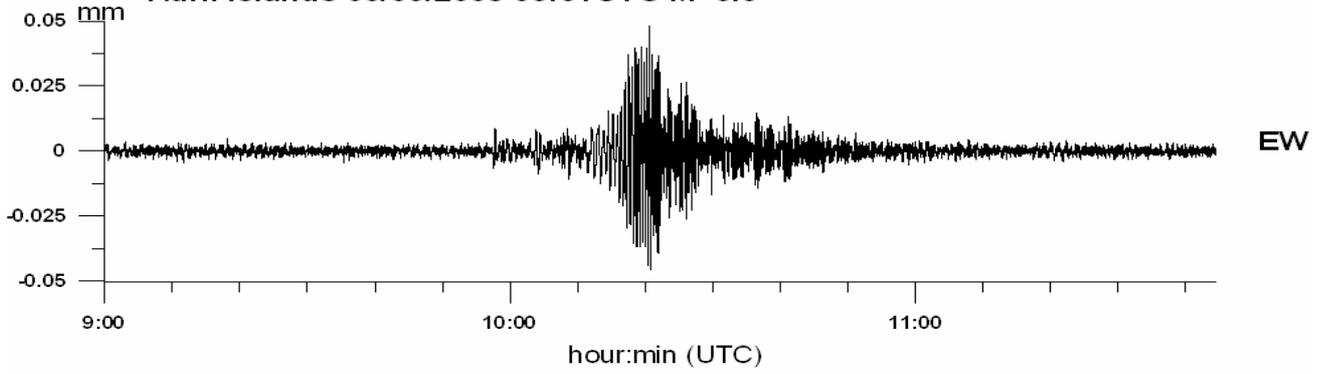
S)

Indonesia 25/02/2008 08:37 M=7.0



T)

Kuril Islands 03/03/2008 09:31 UTC M=6.5



7 I primi modi delle oscillazione libere generate da quattro eventi a confronto: Chile 1960, Sumatra 2004 e 2007, Martinique 2007

I pendoli orizzontali della Grotta Gigante sono particolarmente adatti a registrare i modi delle oscillazioni libere della terra, grazie al loro ampio periodo proprio d'oscillazione, che è intorno a 6 minuti. Di particolare interesse sono le osservazioni in corrispondenza dei primi modi di oscillazione, come la ${}_0S_2$ e la ${}_0T_2$. È nostro interesse individuare le frequenze principali dei modi d'oscillazione e lo splitting delle frequenze per effetto dell'ellitticità e della rotazione della terra.

L'oscillazione propria ${}_0S_2$ è composta da 5 modi identificati dal numero azimutale m . Per una sfera non-ruotante e a simmetria sferica i 5 modi degenerano ad una unica frequenza comune, mentre per una sfera ruotante ed ellissoidica, si dividono ed oscillano a frequenze diverse, date dalla relazione seguente (Dahlen and Tromp, 1998):

$$\omega_m = \omega_0 \left(1 + (a + bm + cm^2) 10^{-3} \right)$$

I parametri, calcolati per il modello terrestre 1066A sono: $a = 0.376$; $b = 14.905$; $c = -0.267$; $\omega_0 = 0.3093363$ mHz. ω_0 è la frequenza corrispondente al modello sferico.

Per il modo ${}_0T_2$ vale analoga espressione con parametri:

$$a = -1.335; b = 5.090; c = -0.231; \omega_0 = 0.3808486;$$

Riportiamo nelle tabelle 7.1 e 7.2 i valori delle frequenze teoriche secondo tre autori, Dahlen e Tromp (1998), Dahlen e Sailor (1979) e Zürn, comunicazione personale 2006. Il modello terrestre usato nei tre casi è il 1066A (Gilbert and Dziewonski, 1975).

A questo scopo provvediamo ad effettuare l'analisi spettrale delle sequenze temporali di eventi selezionati. Qui presentiamo i risultati che riguardano quattro eventi, che sono due eventi delle isole Sumatra-Andamane, del 2004 ($M_w = 9.3$; Stein e Okal, 2005; Park et al., 2005) e del 2007 ($M=8.4$, 12 settembre 2007, ore 11:10:26 UTC), rispettivamente, l'evento di Martinique del 2007 ($M=7.4$, 29 novembre 2007 ore 19:00 UTC), e l'evento storico del Cile 1960 ($M_w = 9.5$, Kanamori, 1977). Per l'evento del Cile 1960, e Sumatra 2004 e 2007 sono state usate 75 ore di registrazione (campionamento 30 sec per Cile, 15 sec per Sumatra); per l'evento di Martinique 2007 sono state analizzate 120 ore (campionamento 15 sec).

Il calcolo dello spettro è stato eseguito con il metodo descritto in Braitenberg e Zadro (2007), che si basa sul calcolo di una serie di spettri per serie temporali con lunghezze sistematicamente crescenti. I singoli spettri vengono successivamente uniti in un unico spettro composito, che ha il vantaggio di avere un potere risolutivo maggiore rispetto al singolo spettro.

Gli spettri corrispondenti ai quattro eventi sono riportati nella Figura 7.1a,b per la finestra spettrale 0.28-0.4 mHz. Tale finestra spettrale comprende i due multipletti ${}_0S_2$ e la ${}_0T_2$.

A queste basse frequenze lo spettro è ancora affetto da rumore, nonostante le operazioni di depurazione, e ciò in gran parte causa l'influenza degli effetti di carico marino (piccole sesse del golfo di Trieste del periodo di circa un'ora). Ciononostante si sono individuati per la ${}_0S_2$ i seguenti singlets, i cui valori si accordano con quelli di altri autori, con scarti dell'ordine di 10^{-4} (e.g. Rosat et al., 2005 per evento di Sumatra 2004). Sono stati meglio individuati i valori relativi al terremoto del Cile 1960 e Martinique 2007, rispetto al terremoto di Sumatra 2004. Nello spettro dell'evento di Sumatra 2007 invece i due modi sono difficilmente distinguibili.

${}_0S_2$

m =	-2	-1	0	+1	+2
Cile 1960-NS	---	0.3035	0.3095	0.3134	0.3183
Cile 1960 EW	---	---	0.3076	0.3137	0.3190
Sum. 2004-NS	0.3006(?)	---	----	0.3125	-----
Sum. 2004 EW	---	0.3023	0.3087	0.3140	0.3196
Mart. 2007-NS	0.2987	0.3047	0.3080	0.3135	0.3188
Mart. 2007-EW	---	0.3054	0.3099	0.3142	0.3176
Dahlen&Tromp, 1998	.29990	.30476	.30945	.31398	.31834
Dahlen & Sailor, 1979	.2999349	.3047940	.3094878	.3140164	.3183796
Zuern, p.c. 2006	.2999035	.3046725	.3093363	.3138950	.3183486

Tab. 7.1 Frequenze (mHz) dei singlets associati al modo d'oscillazione ${}_0S_2$. Valori osservati per gli eventi Cile 1960, Sumatra-Andamane 2004 e Martinique 2007. Valori calcolati secondo Dahlen e Tromp (1998), Dahlen e Sailor (1979) e Zürn (comunicazione personale 2006)

Per ${}_0T_2$ si sono potuti rilevare chiaramente alcuni multipleti in ambedue i terremoti (in parentesi il valore del singlet visibile ma quasi completamente inglobato nel picco del modo fondamentale):

${}_0T_2$

m=	-2	-1	0	+1	+2
Cile 1960-EW	---	0.378225	----	---	0.38404
Cile 1960-NS	0.3718 ?	0.3787	---	---	---
Sum. 2004-EW	---	---	0.3795	---	(0.3857)
Sum. 2004 -NS	0.3756	---	---	0.38135	---
Mart. 2007 EW	0.3754	0.3791	---	---	0.3838
Mart. 2007 NS	0.3754	---	0.3797	---	0.3840
Dahlen&Tromp, 1998	.37611	.37831	.38034	.38219	.38387
Dahlen & Sailor, 1979	.3752662	.3774641	.3794862	.3813325	.3830028
Zuern, p.c. 2006	.3754510	.3785321	.3808486	.3824007	.3831881

Tab. 7.2 Frequenze (mHz) dei singlets associati al modo d'oscillazione ${}_0T_2$. Valori osservati per gli eventi Cile 1960, Sumatra-Andamane 2004 e Martinique 2007. Valori calcolati secondo Dahlen e Tromp (1998), Dahlen e Sailor (1979) e Zürn (comunicazione personale 2006).

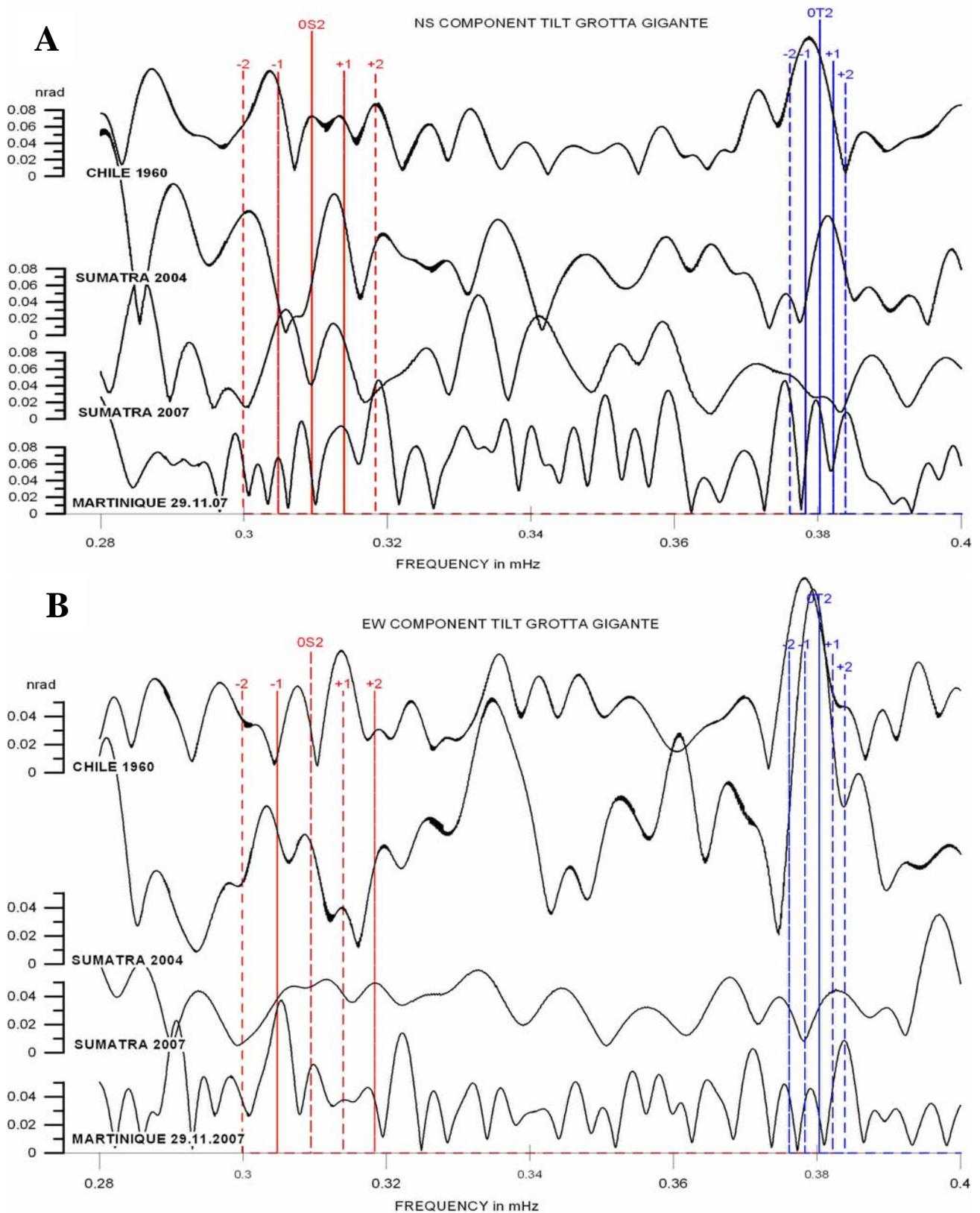


Fig. 7.1 Spettro di ampiezza per quattro eventi sismici. Sono riportate le frequenze teoriche dei modi $0S_2$ e $0T_2$ (vedi Braitenberg e Zadro, 2007) a) Componente NS b) Componente EW.

8 Tilting a lungo periodo della Grotta Gigante a confronto con due stazioni operanti nella fascia sismica pedemontana.

Il tasso di deformazione crostale e' strettamente legato all'evoluzione del ciclo sismico in area tettonicamente attiva. Segue che la conoscenza del tasso, insieme ad altri parametri di natura geologica e sismologica, permette la stima della pericolosita' sismica di un'area in esame. Nel Friuli e nel Veneto orientale sono a disposizione osservazioni geodetiche effettuate con strumentazioni molto diverse tra loro, che dovrebbero convergere ad un quadro d'insieme unico, che e' quello della deformazione in atto. Le diverse strumentazioni misurano a scale temporali molto diverse, che vanno da serie temporali di qualche anno a misure ripetute nell'arco di mezzo secolo. Infatti abbiamo a disposizione osservazioni geodetiche terrestri e spazio-geodetiche, che in particolare competono a misure continue di GPS, di clinometri ed estensimetri, e di dati di livellazione. Argomento importante e' di considerare le scale temporali diverse a disposizione e le implicazioni sui tassi di deformazione ottenibili. Infatti, le misure ripetute di livellazione coprono un arco di 50 anni, le osservazioni clinometriche ed estensimetriche 30-40 anni, e quelle GPS soltanto fino a 6 anni. Qui di seguito facciamo una comparazione fra i tassi di inclinazione trovati nella Grotta Gigante con quelli osservati in due stazioni clinometriche poste nella fascia sismica pedemontana: la stazione di Villanova e la stazione Bus de la Genziana, posta sull'Altipiano del Cansiglio.

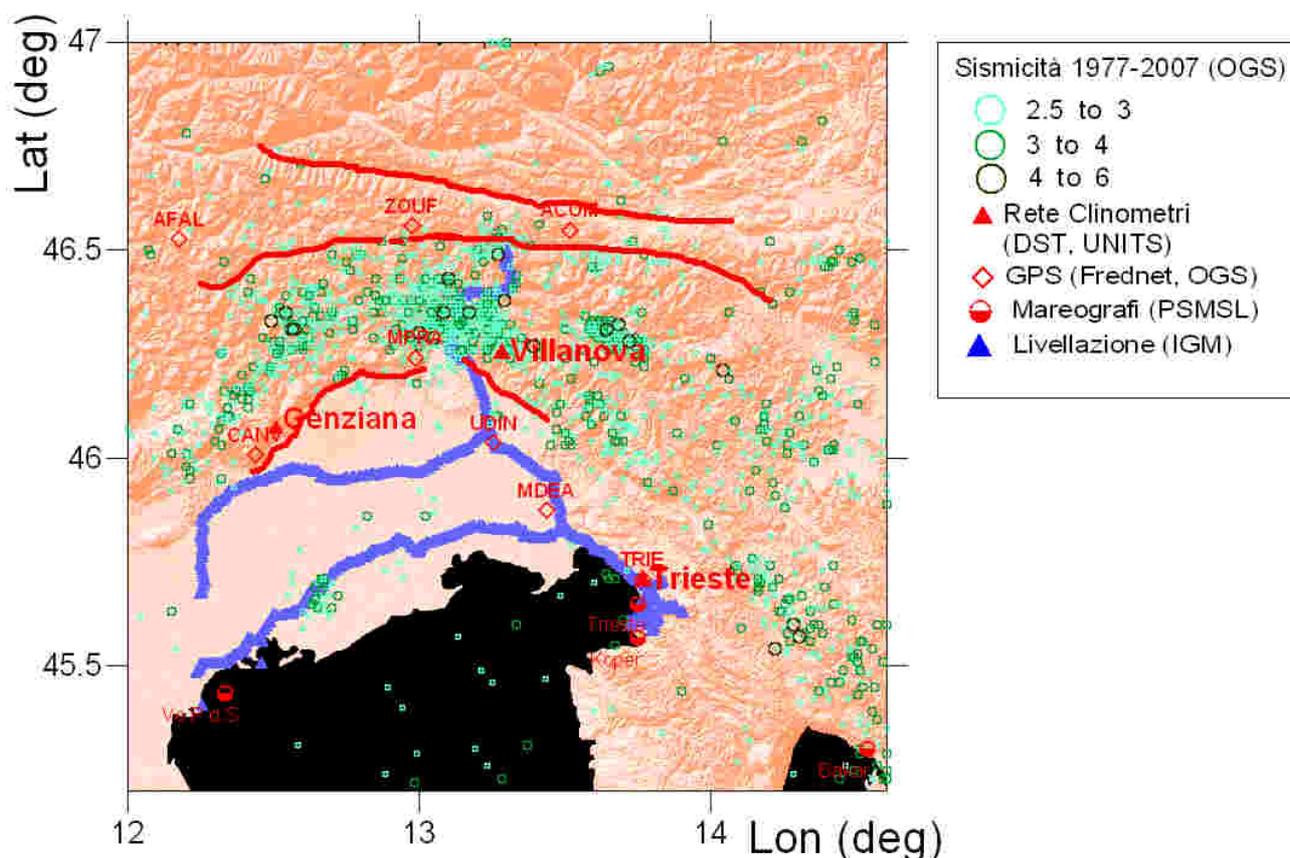


Fig. 8.1 Topografia (SRM, 2005) con stazioni clinometriche (Trieste, Villanova, Genziana), estensimetrica (Villanova), mareografiche e GPS. Sismicit  (OGS) per gli anni 1977-2007. I caposaldi delle linee di livellazione ripetute IGM ottenute finora sono indicate con triangoli blu. La stazione Genziana   stata installata alla fine del 2005.

8.1 Tasso d'inclinazione media nella stazione della Grotta Gigante- area a-sismica

Il tasso di deformazione media osservato nella stazione della Grotta Gigante, nel Carso triestino, e' il piu' basso fra le tre stazioni clinometriche disponibili. Qui il tasso d'inclinazione media (intervallo 1966-2007) e' di 27 nrad/a in direzione N57W. Il tasso d'inclinazione minore della stazione di Trieste e' attribuibile al fatto che la stazione e' situata sulla placca Adria, mentre la stazione Villanova e quella del Cansiglio, in piena fascia sismica, sono situate nella zona di elevata deformazione della placca Eurasiatica. Nella **Fig. 8.2** e' rappresentata la registrazione a lungo periodo delle due componenti NS ed EW dei pendoli. I dati originali sono stati ricampionati a 1 dato al giorno, previo filtraggio anti-aliasing. L'andamento del tilting a lungo periodo dei pendoli e' approssimabile ad una oscillazione con periodo di 33 anni, la quale si somma alla inclinazione media lineare citata sopra. Il periodo ed il tilting a lungo periodo sono stati determinati minimizzando lo scarto medio quadratico delle registrazioni da una funzione costituita dalla somma di una oscillazione a periodo compreso fra 55 e 25 anni ed una deriva lineare.

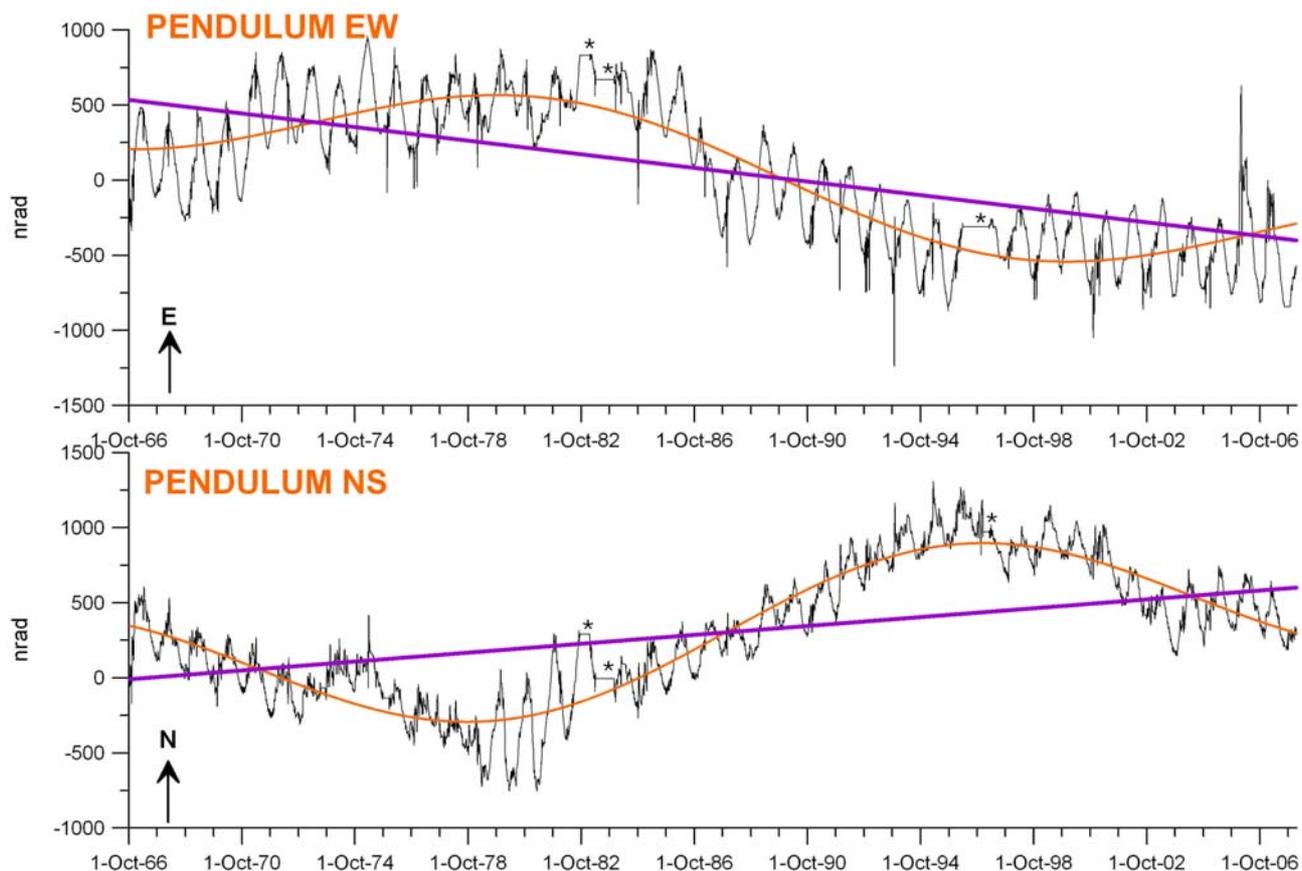


Fig. 8.2 – Rappresentazione della registrazione a lungo periodo delle due componenti NS ed EW dei pendoli a base lunga della Grotta Gigante dal 13/10/1966 al 15/01/2008. L'odogramma del vettore clinometrico e' riportato nella figura 8.3b.

8.2 Stazione Villanova, fascia sismica Friuli orientale

Le osservazioni della stazione di Villanova permettono di calcolare il tasso di deformazione da una terna di estensimetri e da una coppia di clinometri (operanti dal 1979) con un alto grado di affidabilità. La stazione di Villanova è localizzata nell'interno della fascia altamente sismica del Friuli (**Fig.8.1**). La stazione si trova a 60m di profondità dal piano campagna.

La coppia di clinometri della stazione di Villanova è attiva dal 1979. Nella **Fig. 8.3a** è rappresentata l'evoluzione temporale dell'inclinazione, le diverse colorazioni indicanti successivi intervalli temporali. Il tilt medio è di 1950 nrad/a in direzione N80E. La direzione dell'inclinazione rimane stabile dopo il 1983, che potrebbe essere un indice del fatto che dopo tale data si è esaurita la fase post-sismica dell'evento del 1976 ed è iniziato un nuovo ciclo sismico. Tale differenza nel comportamento temporale si osserva anche nella sismicità, che ha perdurato per diversi anni dopo l'evento del 1976 a essere concentrata nell'area epicentrale dell'evento.

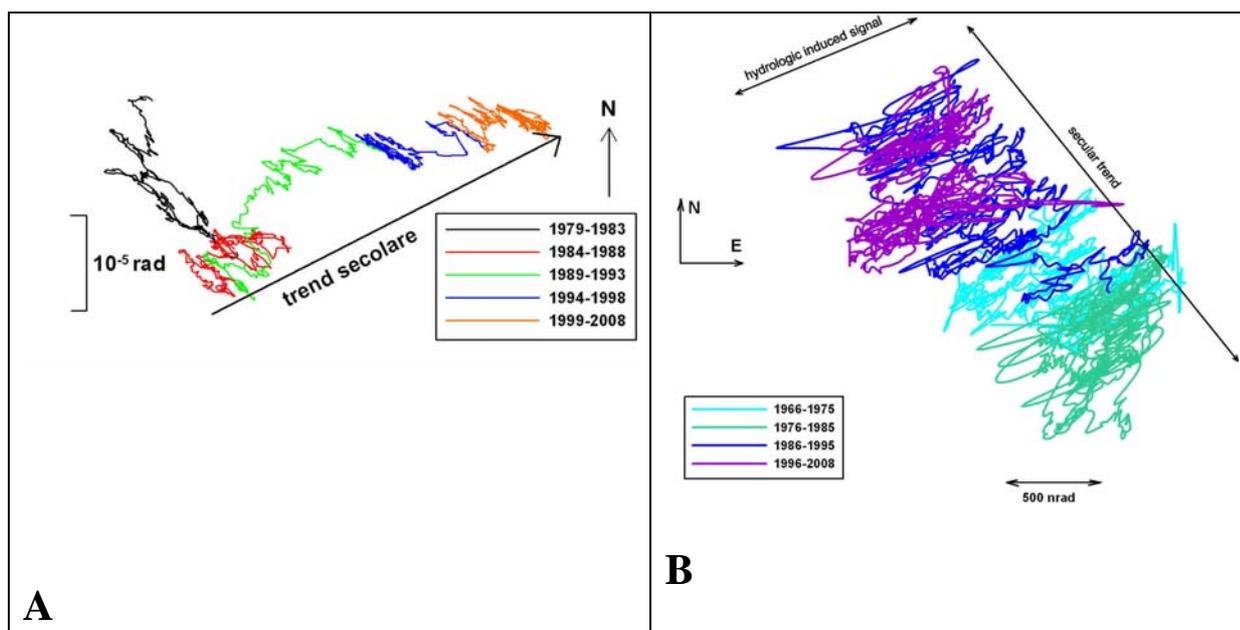


Fig. 8.3- Inclinazione osservata nella stazione di (A) Villanova (anni 1979-2008) e nella (B) Grotta Gigante (anni 1966-2008). A Villanova l'inclinazione media è di 1950 nrad/a nella direzione N80E, a Grotta Gigante ammonta a 27 nrad/a in direzione N57W. La stazione di Villanova si trova in piena fascia sismica, mentre la stazione di Trieste si trova sul Carso Triestino, sulla placca Adria.

8.3 Tilting al confine occidentale del Friuli-Venezia Giulia- Veneto orientale

Nel 2005 è stata installata una nuova stazione geofisico – geodetica ipogea nel Bus de la Genziana (1000VTV), nella Riserva Naturale Ipogea del Cansiglio (Veneto Orientale) secondo il D.M. del 12 luglio 1987.

Abbiamo a disposizione le registrazioni effettuate da dicembre 2005 a maggio 2008.

La localizzazione di questa cavità, situata nella parte veneta del Pian Cansiglio nel comune di Fregona (Treviso), è in posizione strategica in quanto completa verso Ovest la rete di stazioni clinometriche già esistenti, costituita dalla stazione della Grotta Gigante (TS) e della Grotta Nuova di Villanova (UD). La cavità inoltre si trova in zona sismica, che ha avuto il più recente evento di magnitudo considerevole nel 1936.

Il movimento lento registrato è la somma del movimento tettonico, e l'effetto annuale di temperatura e delle acque sotterranee. In **fig. 8.4** l'andamento dell'inclinazione è rappresentato per il periodo dal 13 febbraio 2006 al 1 maggio 2008. Il periodo precedente, da dicembre 2005 a febbraio 2006, è da considerarsi di prova e non può essere utilizzato per la rappresentazione del movimento tettonico lento, causa alcune interruzioni e messe a punto strumentali.

Normalmente il ciclo annuale delle altre due stazioni, Grotta Gigante (TS) e Grotta Nuova di Villanova (UD), compie una traccia ad ellisse. In questo caso non è evidente, ma all'inizio delle registrazioni si è accennata un semiellisse con asse in direzione NNW-SSE, con inclinazione verso SE in inverno ed inclinazione verso NW in estate.

Il 3 settembre 2006 la stazione ha subito un movimento improvviso (durata minore di 1 ora) verso SE, preceduto da un movimento accelerato nei 14 giorni precedenti. Questo segnale è attribuibile ad un movimento tettonico, che è avvenuto asismicamente, cioè in assenza di un evento sismico apprezzabile. È da escludere che tale movimento sia un artefatto strumentale, in quanto è stato osservato con due strumenti indipendenti. Si è osservata una deriva verso Sud, con inizio il 20 agosto, ed un'inclinazione permanente brusca verso Sud e verso Est il giorno 3 settembre. Complessivamente il movimento era di 4.75 microrad verso sud e 2.75 microrad verso est per il periodo fra 20 agosto e 3 settembre. Successivamente il movimento ha continuato verso sud; il tasso di inclinazione media da febbraio 2006 fino ad oggi è di 22 microrad/anno verso sud, un valore che è 1000 volte il tasso che troviamo in Grotta Gigante. Per appurare se tale deriva fosse un effetto locale oppure riscontrabile anche nelle vicinanze, abbiamo provveduto ad installare in giugno 2008 una seconda coppia di clinometri nella stazione Forestale del Cansiglio, a qualche centinaia di metri dalla Grotta Genziana.

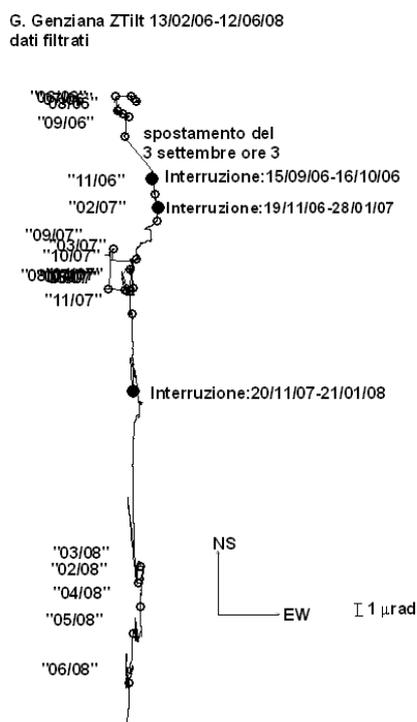


Fig 8.4 – Andamento dell'inclinazione- stazione Bus de la Genziana. La stazione inizia a derivare verso sud dal 3 settembre 2006, a seguito della dislocazione osservata con inclinazione verso SE e continua a derivare verso sud. I dati sono stati ridotti da un campionamento orario ad un campionamento giornaliero previo filtraggio.

9 Ringraziamenti

Si ringrazia il Gruppo di Oceanografia e Meteorologia del DST ed in particolare il prof. Franco Stravisi, per la disponibilità dei dati meteorologici e mareografici di Trieste. I dati pluviometrici e di temperatura registrati nei pressi della Grotta Gigante si riferiscono alla stazione meteorologica di Borgo Grotta (Trieste) della Commissione Grotte “Eugenio Boegan”, Società Alpina delle Giulie, Sezione Trieste del C.A.I. e ci sono stati forniti da Renato R. Colucci, ISMAR, CNR. Si ringrazia l'Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale, Centro Ricerche Sismologiche, per la disponibilità dei dati sismici in Friuli.

10 Riferimenti bibliografici- References

- Braitenberg, C. (1999). The Friuli (NE Italy) tilt/strain gauges and short term observations. *Annali di Geofisica*, **42**, 1-28.
- Braitenberg, C., 1999. Estimating the hydrologic induced signal in geodetic measurements with predictive filtering methods. *Geophys. Res. Letters* **26**, 775-778.
- Braitenberg, C., and M. Zadro (1999). The Grotta Gigante horizontal pendulums – instrumentation and observations, *Boll. Geof. Teor. Appl.*, **40**, 577-582.
- Braitenberg C., Zadro M. (2007) Amplitude ratios of the free oscillations generated by the Sumatra-Andaman Islands 2004 and the Chile 1960 earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97, No. 1A, pp. S6–S17, January 2007, doi: 10.1785/0120050624.

- Braitenberg, C., G. Romeo, Q. Taccetti, and Nagy I. (2005). The very-broad-band long-base tiltmeters of Grotta Gigante (Trieste, Italy): secular term tilting and the great Sumatra-Andaman Islands earthquake of December 26, 2004, *J. of Geodynamics*, in press.
- Braitenberg, C., I. Nagy, G. Romeo, and Q. Taccetti (2004). The very broad-band data acquisition of the long-base tiltmeters of Grotta Gigante (Trieste, Italy) in: *Progress in Geodesy and Geodynamics*, Zhu Yaozhong and Sun Heping (Eds.), 457-462, Hubei Science and Technology Press, Wuhan, ISBN 7-5352-3194-2/P.10.
- Braitenberg, C., Nagy, I., Negusini, M., Romagnoli, C., Zadro, M., Zerbini S., 2001. Geodetic measurements at the northern border of the Adria plate, *J. of Geodynamics*, 32, 267-286
- Brusatin M., (2002) Osservazioni geodesico-geofisiche in cavità nella banda $4 \cdot 10^{-7} - 1$ Hz ed effetti di sito, Tesi di laurea in Scienze Geologiche, a.a. 2001-2002.
- Dahlen, F.A. and Sailor, R.V. (1979) Rotational and elliptical splitting of the free oscillations of the Earth, *Geophysical Journal International*, 58, 609-623.
- Dahlen F.A. and Tromp J. (1998) *Theoretical global seismology*, Princeton University press, Princeton New Jersey, pp. 1 - 1025.
- Ebblin C. and M.Zadro, (1980) Strain determination with tiltmeters in cavities, *Tectonophysics*, 68 T25-T29.
- Gilbert, F. and Dziewonski, A.M. (1975) An application to normal mode theory to the retrieval of structural parameters and source mechanisms from seismic spectra, *Phil Trans. Roy. Soc. Lond. Ser. A*, 278, 187-269.
- Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 82, 2981-2987.
- Marple, S. L. (1987). *Digital spectral analysis*. Prentice-Hall International, London (UK), 1-492.
- Neic (2007) National Earthquake Information Center – NEIC, <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/>
- Pagot E., (2002) Effetti mareali, atmosferici e tettonici rilevati nelle stazioni clinometriche al bordo NE della placca adriatica, Tesi di laurea in Scienze Geologiche, Università di Trieste, a.a. 2000-2001.
- Park, J., T. A. Song, J. Tromp, E. Okal, S. Stein, G. Roullet, E. Clevede, G. Laske, H. Kanamori, P. Davis, J. Berger, C. Braitenberg, M. Van Camp, X. Lei, H. Sun, H. Xu, and S. Rosat (2005). Earth's free oscillations excited by the 26 December 2004 Sumatra-Andaman earthquake, *Science*, **308**, 1139-1144.
- Romeo G., (2000) Digitization of optical lever instruments – *Annali di Geofisica*, Vol 43 545-557
- Rosat S., Sato T., Imanishi Y., Hinderer J., Tamura Y., McQueen H. and Ohashi M. (2005) High-resolution analysis of the gravest seismic normal modes after the 2004 Mw = 9 Sumatra earthquake using superconducting gravimeter data, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L13304, doi:10.1029/2005GL023128.
- SRTM (2005) Shuttle Radar Topography Mission. <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
- Stein, S., and E. Okal (2005). Speed and size of the Sumatra earthquake, *Nature*, **434**, 581-582.
- Stravisi F., Purga N. (2006): Dati meteorologici di Trieste - anno 2005, Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Trieste, internal report, 114, (06/1), 49 pag.
- Zadro, M., and C. Braitenberg (1999). Measurements and interpretations of tilt-strain gauges in seismically active areas. *Earth Science Reviews*, **47**, 151-187.

11 Pubblicazioni recenti del gruppo di lavoro (dal 2002)

- Braitenberg, C., Ebbing, J., Götze H.-J. (2002). Inverse modeling of elastic thickness by convolution method - The Eastern Alps as a case example, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 202, 387-404.
- Braitenberg, C., Wang, Y., Fang, J., Hsu, H.T. (2003) Spatial Variations of flexure parameters over the Tibet-Quinghai Plateau, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 205, 211-224.
- Braitenberg, C., Ebbing, J., Götze, H.-J. (2003) New inputs from the transalp transect to the understanding of isostasy in the Eastern Alps, (Extended Abstract), *Transalp Conference, Trieste (Italy)*, 10-12 February, 2003, *Memorie di Scienze Geologiche*, Vol. 54, 75-78.
- Götze H.-J., Schmidt S., Braitenberg, C. (2003) A new buried Maar near Kreckwitz (East-Saxony)? *Z. geol. Wiss.*, Berlin, 31, 4-6: 343-352.
- Zille (2004) 3-D imaging of active structures with earthquake locations, Friuli seismic region, NE-Italy, *Tesi di Dottorato*, Tutore: Prof. C. Ebblin.
- Braitenberg, C., Pagot, E., Wang, Y., Fang, J. (2004) Bathymetry and crustal thickness variations from gravity inversion and flexural isostasy, in: *Satellite Altimetry for Geodesy, Geophysics and Oceanography*, C. Hwang, C.K. Shum, J. Li (Eds.), Springer Verlag, 143-149, ISBN 3-540-420211-0.
- Braitenberg, C., Nagy I., Romeo G., Taccetti Q. (2004) The very broad-band data acquisition of the long-base tiltmeters of Grotta Gigante (Trieste, Italy) in: *Progress in Geodesy and Geodynamics*, Zhu Yaozhong and Sun Heping (Eds.), 457-462, Hubei Science and Technology Press, Wuhan, ISBN 7-5352-3194-2/P.10.
- Braitenberg C., I. Nagy, S. Papacchioli (2004) I pendoli della Grotta Gigante, *Rassegna Tecnica del Friuli Venezia Giulia*, anno LV, 16-20.
- Ebblin C., Zille A., Rossi G. (2005). The running-cone method for the interpretations of conical fold geometries: an example from the Badia valley, Northern Dolomites (NE Italy). *J. of Structural Geology*, 27, 139-144.
- Rossi G., Ebblin C., Zadro M. (2005). 3D finite - elements kinematic model of the Adria northern region : stress analysis. *Bollettino di geofisica Teorica ed Applicata*, 46, 23-46.
- Caporali A., Braitenberg C., Massironi M. (2005) Geodetic and Hydrological Aspects of the Merano Earthquake of July 17, 2001, *J. of Geodynamics*, 39, 317-336.
- Park J., Song T. A., Tromp J., Okal E., Stein S., Rault G., Clevede E., Laske G., Kanamori H., Davis P., Berger J., Braitenberg C., Van Camp M., Lei X., Sun H., Xu H., Rosat S., 2005, Earth's free oscillations excited by the 26 december 2004 Sumatra-Andaman earthquake, *Science*, 308, 1139-1144.
- Ebbing J., C. Braitenberg and H.-J. Götze (2005) The lithospheric density structure of the Eastern Alps, *Tectonophysics* 414, 145-155.
- Zanolla C., Braitenberg C., Ebbing J., Bernabini M., Bram K., Götze H.-J., Giammetti S., Longoni R., Meurers B., Nicolich R., Palmieri F. (2005) New gravity maps of the Eastern Alps and significance for the crustal structures, *Tectonophysics*, 414, 127-143

- Braitenberg C., Romeo G., Taccetti Q., Nagy I. (2005) The very-broad-band long-base tiltmeters of Grotta Gigante (Trieste, Italy): secular term tilting and the great Sumatra-Andaman Islands earthquake of December 26, 2004, *J. of Geodynamics*, 41, 164-174.
- Braitenberg, C., Wienecke, S., Wang, Y. (2006) Detection of buried structures along a ridge axis from satellite derived gravity field, *Journ. Geophys. Res.*, in press
- Pinato Gabrieli C., Braitenberg C., Nagy I., Zuliani D. (2006) Tilting and horizontal movement at and across the northern border of the Adria plate, Edts. Gil A.J. e Sansò F., *Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles*, 306 pp., Springer Verlag. 129-137. ISBN-10: 3-540-38595-9. (IAG Symposium Jaén, Spain, March 7-19,2005; Series: International Association of Geodesy Symposia , Vol. 131) <http://www.springer.com/italy/home/generic/search/results?SGWID=6-40109-22-173674905-0>
- Braitenberg C., Zadro M. (2007) Amplitude ratios of the free oscillations generated by the Sumatra-Andaman Islands 2004 and the Chile 1960 earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97, No. 1A, pp. S6–S17, January 2007, doi: 10.1785/0120050624.
- Wienecke S., Braitenberg C., Goetze H.-J. (2007) A new analytical solution estimating the flexural rigidity in the Central Andes, *Geophys. J. Int.*, 169, 789-794, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.3396.x.
- Shin, H. Xu, C. Braitenberg, J. Fang, Y. Wang (2007) Moho undulations beneath Tibet from GRACE-integrated gravity data, *Young H. Geophys. J. Int.*, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03457.x, 1-15.
- J. Ebbing, C. Braitenberg & S. Wienecke (2007) Insights into the lithospheric structure and the tectonic setting of the Barents Sea region from isostatic considerations, *Geophys. J. Int.*, Vol. 171, pp. 1390-1403, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03602.x

Riviste nazionali

- Braitenberg C., Nagy I., Grillo B. (2005). Alcune informazioni sulla stazione geofisica ipogea della Grotta Gigante (Carso Triestino). *Progressione 52, ATTIVITA' E RIFLESSIONI DELLA COMMISSIONE GROTTA "E. BOEGAN"*, Supplemento semestrale ad "ATTI E MEMORIE"- Anno XXVIII, n.1-2, 2005, 60-69.
- Braitenberg C., Grillo B., Nagy I. , Zidarich S., Piccin A., (2007) La stazione geodetico-geofisica ipogea del Bus de la Genziana (1000VTV) - Pian Cansiglio, *Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan", Società Alpina della Giulie CAI, Trieste, Italia*, Vol. 41:105-120.