

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
Ottobre 2009

Responsabile Scientifico: Dr. Carla Braitenberg

Collaboratori:

DST:

Prof. Maria Zadro

Dr. Ing. Ildikò Nagy

Dott. Barbara Grillo

Dott. Daniele Tenze

Dott. Patrizia Mariani

Dipl. Tecn. Sergio Zidarich

INGV:

Dr. Gianni Romeo

Dr. Quintilio Taccetti

Calibrazione dell'acquisizione digitale



Indice

1 Introduzione

2 Installazione del sistema di calibrazione dell'acquisizione digitale

3 Osservazioni delle inclinazioni della verticale e di parametri ambientali per il periodo 2008- 2009.

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

5 Deformazioni indotte da flussi idrici sotterranei nel Carso triestino - Elaborato di tesi di Daniele Tenze, relatore Carla Braitenberg, correlatore Franco Cucchi

5.1 Introduzione

5.2 Inquadramento geografico geomorfologico del Carso triestino

5.2.1 Il Timavo

5.2.2 L'Abisso di Trebiciano

5.2.3 La Grotta Gigante

5.3 La Stazione Geofisica ipogea della Grotta Gigante

5.3.1 I pendoli ed i Clinometri

5.3.2 Principio di funzionamento del clinometro del tipo Zöllner

5.3.3 Acquisizione digitale dei dati

5.3.4 Il segnale clinometrico negli ultimi quarant'anni

5.4 Presentazione, elaborazione ed analisi del segnale idrologico sui pendoli

5.4.1 Presentazione dei dati idrologici

5.4.2 Presentazione dei dati clinometrici

5.4.3 Elaborazione dati dei pendoli e dei clinometri della grotta Gigante

5.4.4 Caratterizzazione del segnale clinometrico associato alle piene

5.5 Presentazione dei dati di piena

5.5.1 Eventi di piena isolati

5.5.2 Riassunto del segnale clinometrico indotto dalle piene

5.5.3 Eventi di piena multipli



5.6 Relazione Ampiezza livello dell'acqua

5.7 Conclusioni

5.8 Appendice

5.9 Bibliografia relativa all'elaborato di tesi del Dott. Tenze

6 Ringraziamenti

7 Riferimenti bibliografici

8 Pubblicazioni recenti del gruppo di lavoro (dal 2004)

9 Seminari di divulgazione inerenti a osservazioni clinometriche ed alla Grotta Gigante e non solo. Anni 2008-2009

1 - Introduzione

Nell'anno 2009 si è introdotto una importante miglioria all'acquisizione digitale dei pendoli della Grotta Gigante. Il dispositivo ottico ed elettronico permette di effettuare una calibrazione dei dati digitali acquisiti allo scopo di controllare la stabilità ed il perfetto funzionamento del sistema digitale. Inoltre è possibile effettuare un reset da remoto dell'acquisitore elettronico, il che è qualvolta necessario a seguito di problemi sulla linea di alimentazione elettrica, come quelli causati da fulmini. Il dispositivo è stato progettato dal Dott. Gianni Romeo ed alla sua materializzazione ed installazione hanno partecipato inoltre il Dott. Quintilio Taccetti in collaborazione con il Dott. Giuseppe Spinelli e Paolo Benedetti. Presentiamo qui il sistema e le misure di calibrazione effettuate in agosto e in novembre 2009.

Notevole interesse si è sviluppato di recente riguardo alla comprensione degli effetti di acque sotterranee in sistemi carsificati sulle osservazioni clinometriche e di GPS. Avendo il nostro archivio ormai 43 anni di continue registrazioni clinometriche, la stazione della Grotta Gigante è ideale per studiare questi fenomeni. Nel 2009 abbiamo effettuato uno studio di dettaglio dei segnali clinometrici generati dalle acque sotterranee del Carso triestino. A tal scopo abbiamo analizzato in parallelo le registrazioni delle piene del fiume sotterraneo Timavo e le registrazioni dei pendoli. Abbiamo trovato che esiste una netta correlazione fra le due misure, e che senza dubbio le piene causano un caratteristico segnale clinometrico. Esso è caratterizzato da una inclinazione verso Sudovest, con successivo recupero in direzione Nordest. Troviamo che il massimo tilting arriva solitamente due giorni di ritardo rispetto alla piena registrata in una stazione posta a 6 km dalla Grotta Gigante, mentre qualvolta si è trovata essere in anticipo. L'anticipo indica che in qualche caso il deflusso delle acque sotterranee prende una via alternativa, per cui raggiunge la posizione della Grotta Gigante a tempi anticipati. Si è trovato che ad un segnale di tilting di 100 nrad corrisponde un innalzamento del livello dell'acqua nella Grotta a 6 km di distanza di 9.8 m. Nell'ambito delle escursioni di piene di circa 30 m, il segnale clinometrico indotto ha una risposta pressoché lineare.

Lo studio dell'effetto delle acque sotterranee sulle registrazioni dei pendoli è stato eseguito in gran parte nell'ambito di una tesi di Laurea in Scienze geologiche del Dott. Daniele Tenze, per cui si è scelto di riportare l'elaborato di tesi integralmente nella presente edizione del rapporto annuale della stazione geodetica della Grotta Gigante. L'elaborato comprende una parte introduttiva sulla stazione della Grotta Gigante, per cui si sono omessi i capitoli del rapporto che descrivono in dettaglio la strumentazione e la stazione. All'interessato si consiglia di consultare il rapporto della stazione geodetica relativa all'anno 2008, disponibile anche in rete (http://www.lithoflex.org/listing/INGV/rapporto_INGV_2008.pdf).

2 – Lavori di calibrazione per l'acquisizione digitale

In questo capitolo descriviamo il nuovo sistema di calibrazione che è stato installato il giorno 6 agosto 2009 e che ha lo scopo di monitorare la stabilità del sistema digitale di acquisizione. Nella seconda parte del capitolo confrontiamo i dati digitali con quelli acquisiti su carta fotografica, che determina il fattore di conversione da count registrati a nrad, in quanto i valori registrati su carta fotografica erano stati calcolati a suo tempo.

2.1 Installazione del sistema di calibrazione dell'acquisizione digitale

Nei giorni 4-6 agosto 2009 è stata installato un dispositivo di calibrazione dell'acquisizione digitale dati dei pendoli della Grotta Gigante. L'installazione è stata effettuata da Gianni Romeo, Quintilio Taccetti, Giuseppe Spinelli e Paolo Benedetti dell'INGV con la presenza della scrivente. Il sistema di calibrazione consiste in una sorgente luminosa fissa, il cui segnale viene periodicamente registrato e che permette di monitorare la stabilità del sistema digitale dei dati. La sorgente luminosa è costituita da quattro laser, che sono stati montati in un tubo di alluminio e la cui luce viene modificata da un sistema di lenti. Il fascio risultante è un segnale a forma di barra verticale. Il cilindro di alluminio è stato montato in pianta stabile sulla colonna di sostegno del sistema di acquisizione digitale. Per ciascuna delle due componenti EW e NS compete una quaterna di laser. Nella Fig. 2.1 si vede a destra il cilindro di alluminio, a sinistra il laser di acquisizione ed il contenitore grigio che ospita il digitalizzatore ottico.

Il sistema di calibrazione consiste inoltre dell'elettronica di gestione dove un microcontrollore, accettando comandi da una linea seriale proveniente dal computer di acquisizione, sovrintende alle operazioni di calibrazione (Fig. 2.2).

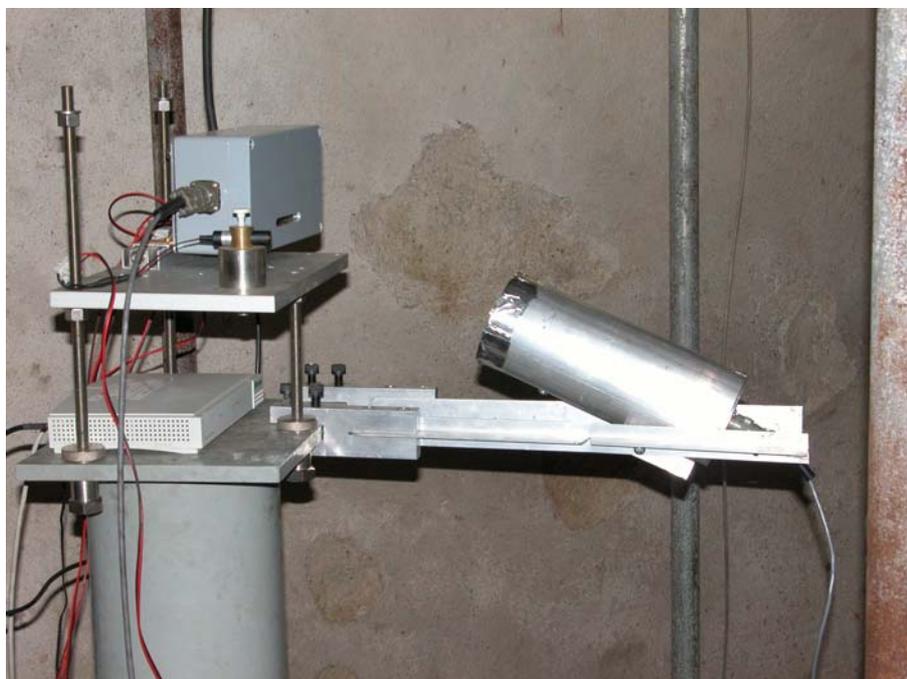


Figura 2.1 – Il dispositivo di calibrazione con il tubo in alluminio contenente i quattro di Laser di calibrazione.

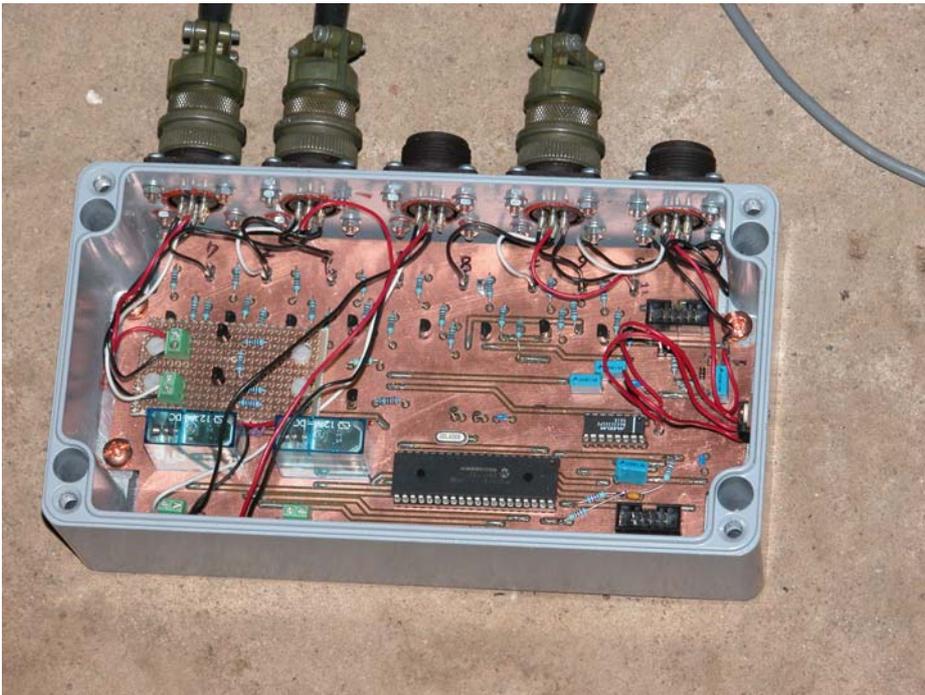


Figura 2.2 Visione dell'elettronica di gestione del dispositivo di calibrazione.

Per accedere all'elettronica di gestione, si colloquia via la seriale ttys0 tramite il programma di sistema linux "minicom".

Per completezza riportiamo qui anche i comandi da inviare tramite il programma minicom. Su minicom: @h#, questa istruzione mostra tutte le opzioni accettate.

L'utilizzo della calibrazione e' la seguente: si spengono i laser di misura, si accendono in sequenza i otto laser di calibrazione, si rileva il segnale, e si riaccendono i due laser di misura.

In dettaglio, i comandi da trasferire tramite minicom sono:

Spengnere i due laser di misura,
componente NS corrisponde a componente 1
componente EW corrisponde a componente 2

@s# per componente 1,
@t# per componente 2.

Accendere sequenza di calibrazione, che accende in sequenza i quattro laser di calibrazione
@n# per componente 1,
@o# per componente 2.

Attendere 1 minuto perche' si completa la sequenza.
Riaccendere i laser di misura

@u# per componente 1,
@v# per componente 2.

Il sistema di calibrazione puo' anche essere utilizzato per resettare il sistema digitale di acquisizione, interrompendo tramite un relais il circuito di alimentazione. Questo procedimento si rende qualvolta necessario, quando il PC e' stato riavviato per mancanza di corrente.

- @a# reset per componente 1,
- @b# reset per componente 2,
- @c# reset per componente 1 e 2.

2.2 Risultati della calibrazione:

Abbiamo effettuato ad oggi tre calibrazioni, una in grotta (6 agosto) e due da remoto (10 agosto 2009 e 9 novembre 2009). Di seguito ne riportiamo i risultati. E' emerso che la calibrazione effettuata da remoto riporta delle differenze rispetto a quella effettuata il giorno 6 agosto.

I dati acquisiti vengono salvati su file orari, che hanno approssimativamente 109366 campioni, che corrisponde ad una frequenza di campionamento di 30.3794 campioni al secondo, e un intervallo di campionamento $dt= 0.0329$ sec. Troviamo che la calibrazione del giorno 6 agosto ha la durata del segnale di calibrazione dimezzata (circa 2 secondi) rispetto a quelle successive (circa 4 secondi). Troviamo inoltre che nelle calibrazioni successive manca il primo segnale di calibrazione sulla componente EW. Troviamo che i valori registrati il 10 agosto e il 9 novembre corrispondono molto bene, e differiscono nell'ordine di 2/100 di count digitale, e che coincidono se teniamo conto dell'errore medio quadratico. Troviamo che l'errore medio quadratico e' minore per la componente NS rispetto alla componente EW. Le differenze sono leggermente maggiori (fino a 6/100 di count), se confrontiamo la misura del 6 agosto con quelle successive. Non e' del tutto chiaro cosa ha provocato questa variazioni dal 6 al 10 agosto, ma potrebbe essere stato causato da variazioni di tensione sulla linea di alimentazione causata da un fulmine.

| | NS | | NS | NS | EW | | EW | EW |
|---------------------------------|--------------------|-----------|---------------------|----------------------|---------------------|--------|---------------------|----------------------|
| Laser Calibrazione | N. Campioni/t(sec) | | Valor medio (count) | Dev.standard (count) | N. Campioni T/(sec) | | Valor medio (count) | Dev.standard (count) |
| Calibrazione in data 6/8/2009 | | | | | | | | |
| 1 | 66 | 2.1714 | 0.365 | 0.023 | 56 | 1.8424 | 0.145 | 0.025 |
| 2 | 66 | 2.1714 | 0.750 | 0.009 | 57 | 1.8753 | 0.536 | 0.013 |
| 3 | 60 | 1.974 | 1.088 | 0.008 | 63 | 2.0727 | 0.930 | 0.009 |
| 4 | 61 | 2.0069 | 1.358 | 0.014 | 60 | 1.974 | 1.157 | 0.008 |
| Calibrazione in data 10/8/2009 | | | | | | | | |
| 1 | 130 | 4.277 | 0.193 | 0.028 | - | - | Manca | - |
| 2 | 131 | 4.3099 | 0.712 | 0.009 | 131 | 4.3099 | 0.464 | 0.018 |
| 3 | 122 | 4.0138 | 1.068 | 0.013 | 131 | 4.3099 | 0.960 | 0.012 |
| 4 | 121 | 3.9809 | 1.400 | 0.011 | 120 | 3.948 | 1.266 | 0.009 |
| Calibrazione In data 09/11/2009 | | | | | | | | |
| 1 | 129 | 4.2441 | 0.224 | 0.027 | - | - | Manca | - |
| 2 | 131 | 4.3099 | 0.726 | 0.010 | 131 | 4.3099 | 0.417 | 0.026 |
| 3 | 121 | 3.9809 | 1.072 | 0.009 | 130 | 4.277 | 0.953 | 0.011 |
| 4 | 123 | 4.0467350 | 1.406 | 0.010 | 120 | 3.948 | 1.223 | 0.015 |

Tabella 2.1 Risultati delle tre calibrazioni effettuate il 6 e 10 Agosto e 9 novembre 2009.

2.3 Registrazione parallela su carta fotografica e con il sistema digitale

La registrazione in parallelo su carta fotografica e con il sistema digitale è stata effettuata per cinque anni, dal 2003 al 2008, dopo di che la registrazione su carta fotografica è stata chiusa, in quanto non era più sostenibile dal punto di vista finanziario. La registrazione parallela è stata molto utile nel determinare la linearità del sistema digitale, e controllarne il funzionamento. Nel corso del 2008 è emerso un problema riguardo all'acquisizione digitale, che comportava una variazione del fattore di amplificazione a seguito di interruzione di corrente. Questo fatto è legato ad instabilità dell'alimentazione durante la accensione del PC ed una erronea calibrazione del sistema. In sostituzione dell'acquisizione in parallelo su carta è stato installato un sistema di calibrazione ottico, illustrato nel paragrafo seguente.

Si sono confrontate le registrazioni ottiche su carta fotografica con quelle digitali per gli anni a disposizione (2004-2008). 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'ultimo anno a disposizione, che è l'anno 2008 (vedi **Fig. 2.3**). Nella **Fig. 2.3** 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 2008. Durante il periodo da 17 marzo a 10 luglio 2008, si osserva la riduzione dell'ampiezza del segnale nei dati digitali, dovuta probabilmente ad una precedente interruzione di tensione. Il calcolo del fattore di regressione per l'anno 2008 (componente NS e EW) è illustrato nella **Fig. 2.4 a,b**. Nella **tab. 2.2** riportiamo i coefficienti della relazione lineare, risultato della regressione per gli anni a disposizione. I coefficienti indicano la relazione di conversione dall'unità count a msec di registrazione, ottenuta dalla regressione delle serie temporali per gli anni 2004 - 2008. 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 count 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).

| | 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 count di registrazione digitale all'inclinazione dell'asse del pendolo (anno 2004). (Movimenti quasi-statici) | $-1.94 \cdot 10^{-3}$ msec/count $-9.40 \cdot 10^{-12}$ rad/count | $-1.54 \cdot 10^{-3}$ msec/count $-7.47 \cdot 10^{-12}$ rad/count |
| Fattore di conversione da un count di registrazione digitale all'inclinazione dell'asse del pendolo (anno 2005). (Movimenti quasi-statici) | $-1.88 \cdot 10^{-3}$ msec/count $-9.092 \cdot 10^{-12}$ rad/count | $-1.50 \cdot 10^{-3}$ msec/count $-7.291 \cdot 10^{-12}$ rad/count |

| | | |
|--|--|--|
| Fattore di conversione da un count di registrazione digitale all'inclinazione dell'asse del pendolo (anno 2006). (Movimenti quasi-statici) | -1.85 10 ⁻³ msec/count -8.946 10 ⁻¹² rad/count | Causa guasto alla guaina non e' possibile ricalcolare il fattore. Viene mantenuto quello del 2005. |
| Fattore di conversione da un count di registrazione digitale all'inclinazione dell'asse del pendolo (anno 2007). (Movimenti quasi-statici) | -1.87 10 ⁻³ msec/count -9.059 10 ⁻¹² rad/count | Ripristino guaina a metà anno- Viene mantenuto fattore del 2005. |
| Fattore di conversione da un count di registrazione digitale all'inclinazione dell'asse del pendolo (anno 2008; per EW utilizzato anche dati del 2007, per NS esclusivamente dati del 2008). (Movimenti quasi-statici) | -1.63 10 ⁻³ msec/count -7.890 10 ⁻¹² rad/count | -1.64 10 ⁻³ msec/count -7.960 10 ⁻¹² rad/count |
| 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. | | |
| Numero totale di dati orari nel 2007: 8760. Periodi tralasciati nel calcolo del fattore di conversione causa interruzione nel 2007. Indice in ore dal 1 gennaio 2007 ore 00:00 locali | 597-959 2608-2621 2914-2915 4140-8760 | Viene mantenuto fattore del 2005 causa rifacimento guaina |
| Numero totale di dati orari nel 2008: 8784. Periodi tralasciati nel calcolo del fattore di conversione causa interruzione nel 2008. Indice in ore dal 1 gennaio 2008 ore 00:00 locali . Per EW utilizzato anche i seguenti periodi del 2007: 7960-7904; 7930-8482; 8656-8760 | 1631-1633 1636-1654 1660-1696 1840-4599 4882-4892 4914-4958 5531-5534 6299-8784 | 400- 404 407- 409 413- 424 1094-1100 1764-1795 1840-8784 |
| 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.2.2: Fattore di conversione per il pendolo LPHP nel caso della registrazione ottica e quella digitale per il sistema digitale di seconda generazione.

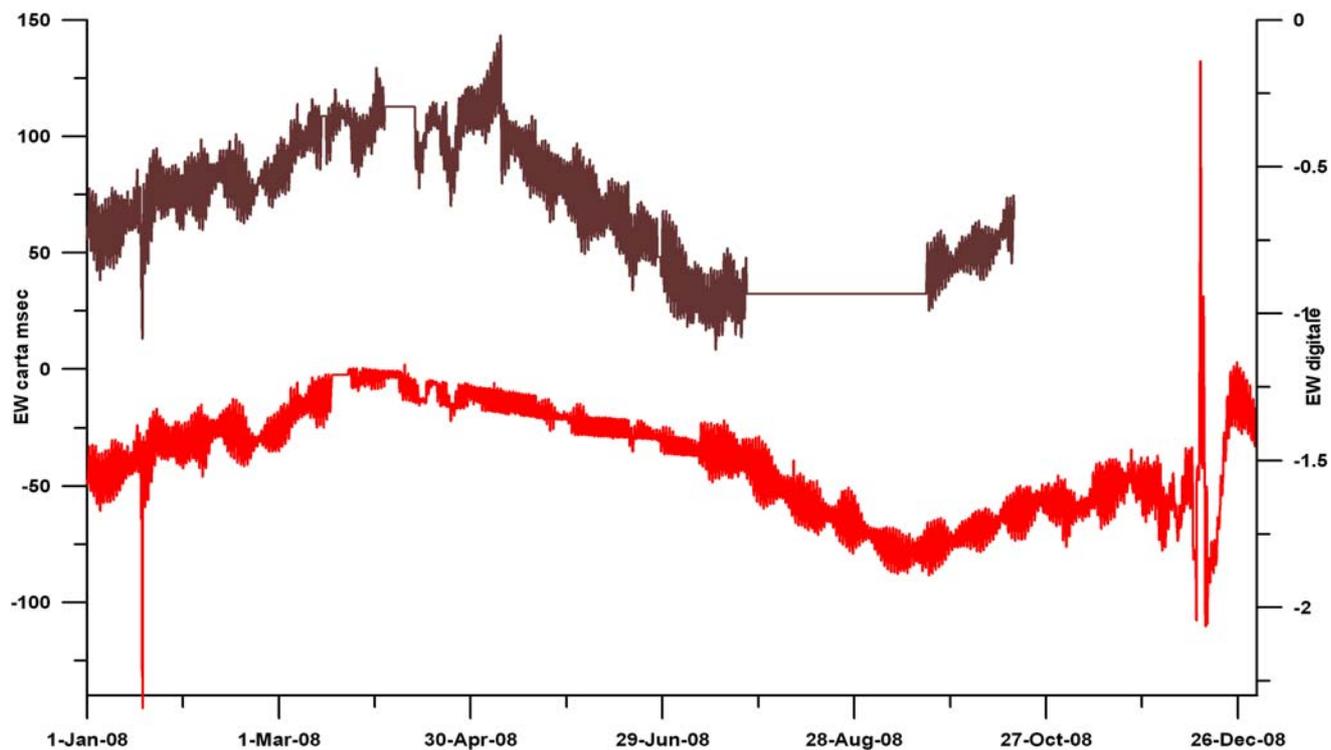


Fig. 2.3 – Confronto fra le registrazioni del pendolo LPHP) ottenute dall'acquisizione su carta fotografica (in nero) e digitale (rosso) per l'anno 2008, campionamento 1 ora. I valori digitali vengono letti con 5 cifre significative, per cui l'unità digitale(1 count) è pari a 10^{-5} . a) componente EW.

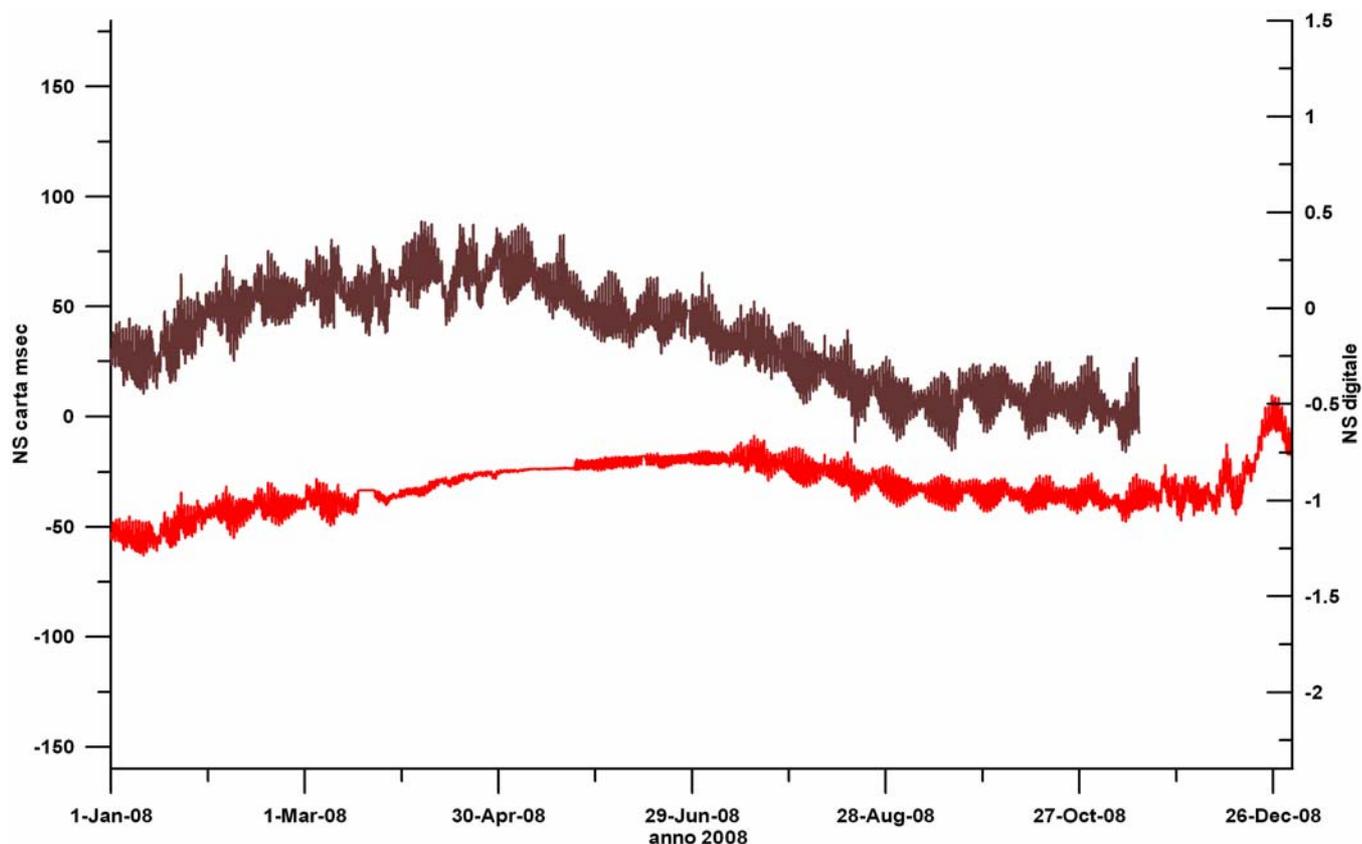


Fig. 2.3 B) componente NS.

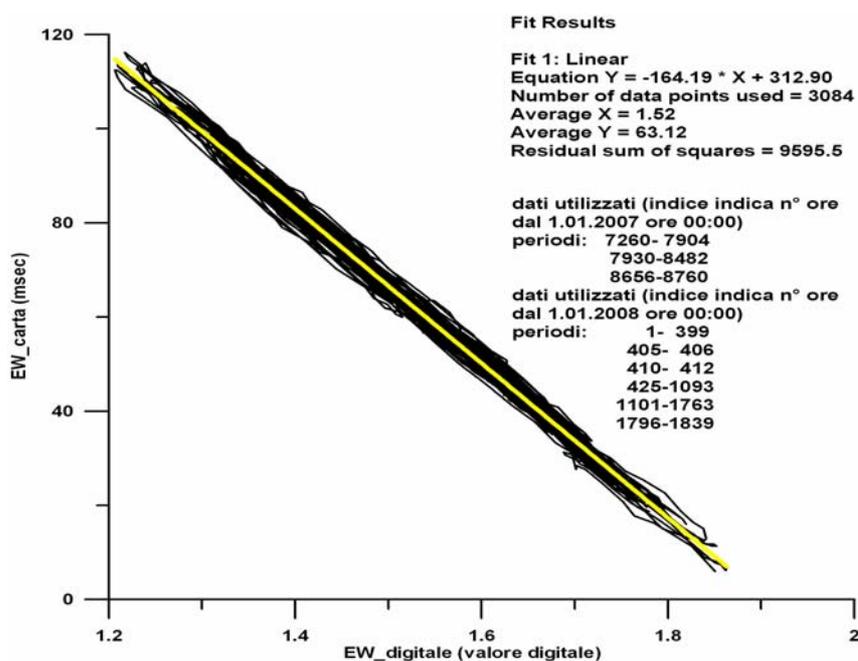


Fig. 2.4 Retta di regressione fra le registrazioni dei pendoli LPHP ottenute dall'acquisizione su carta fotografica e digitale. A) Componente NS anno 2008.

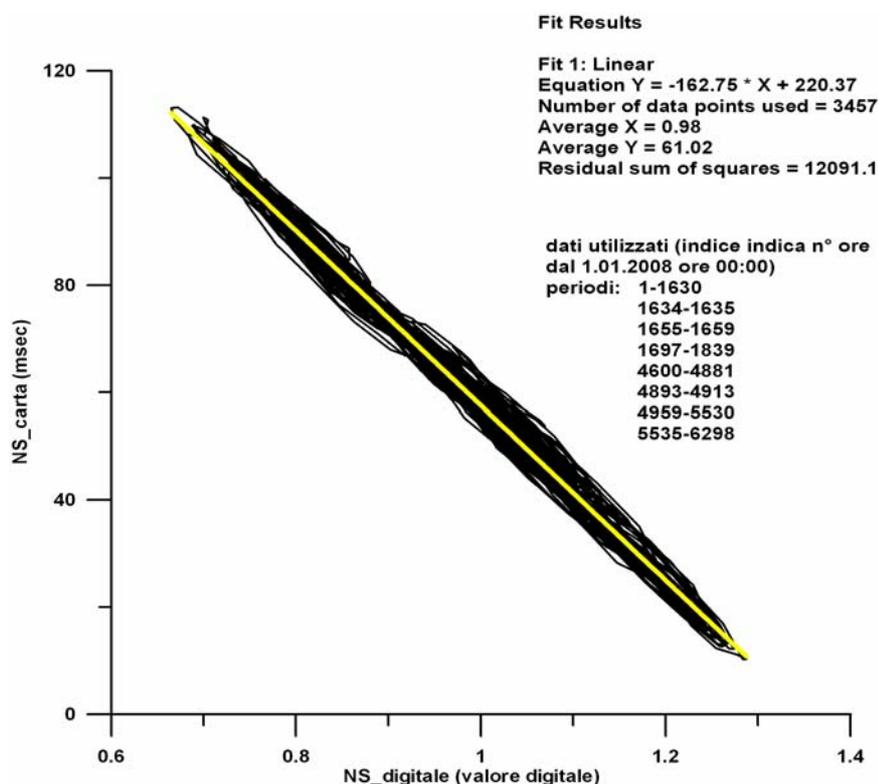


Fig. 2.4 B) Componente NS anno 2008.

3 - Osservazioni delle inclinazioni della verticale e di parametri ambientali per il periodo 2007 - 2009.

Qui di seguito vengono riportate le registrazioni effettuate con i pendoli (LPHP) e con i clinometri (MPT) della Grotta Gigante per il periodo 2007-2009. I pendoli si riferiscono ai pendoli orizzontali che hanno dimensione di 95 m in altezza, mentre con i clinometri si intende la coppia di strumenti di dimensioni piu' piccole (altezza di 0.5 m). Ambedue strumenti sono collocati nella stazione geodetica della Grotta Gigante, ma causa la loro diversa costruzione hanno risposte diverse a seconda delle deformazioni in atto. 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.

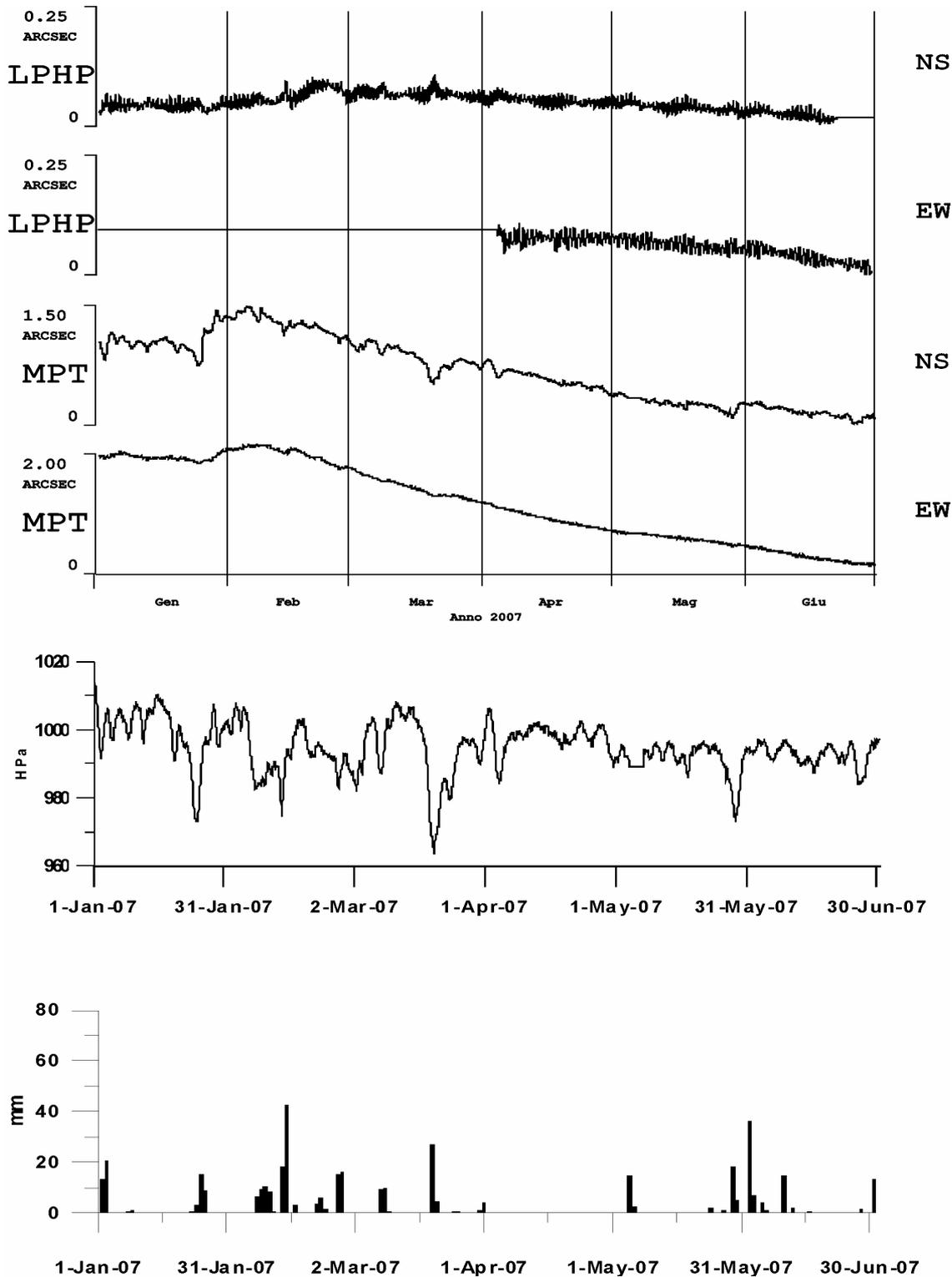


Fig. 3.1- Grafico delle registrazioni effettuate con i pendoli LPHP e con i clinometri MPT della Grotta Gigante per il periodo 2007-2009. Nella parte inferiore del grafico è riportata la registrazione pluviometrica giornaliera (stazione di Trieste. Stravisì, comunicazione personale) e la pressione barometrica. A) Periodo gennaio-giugno 2007

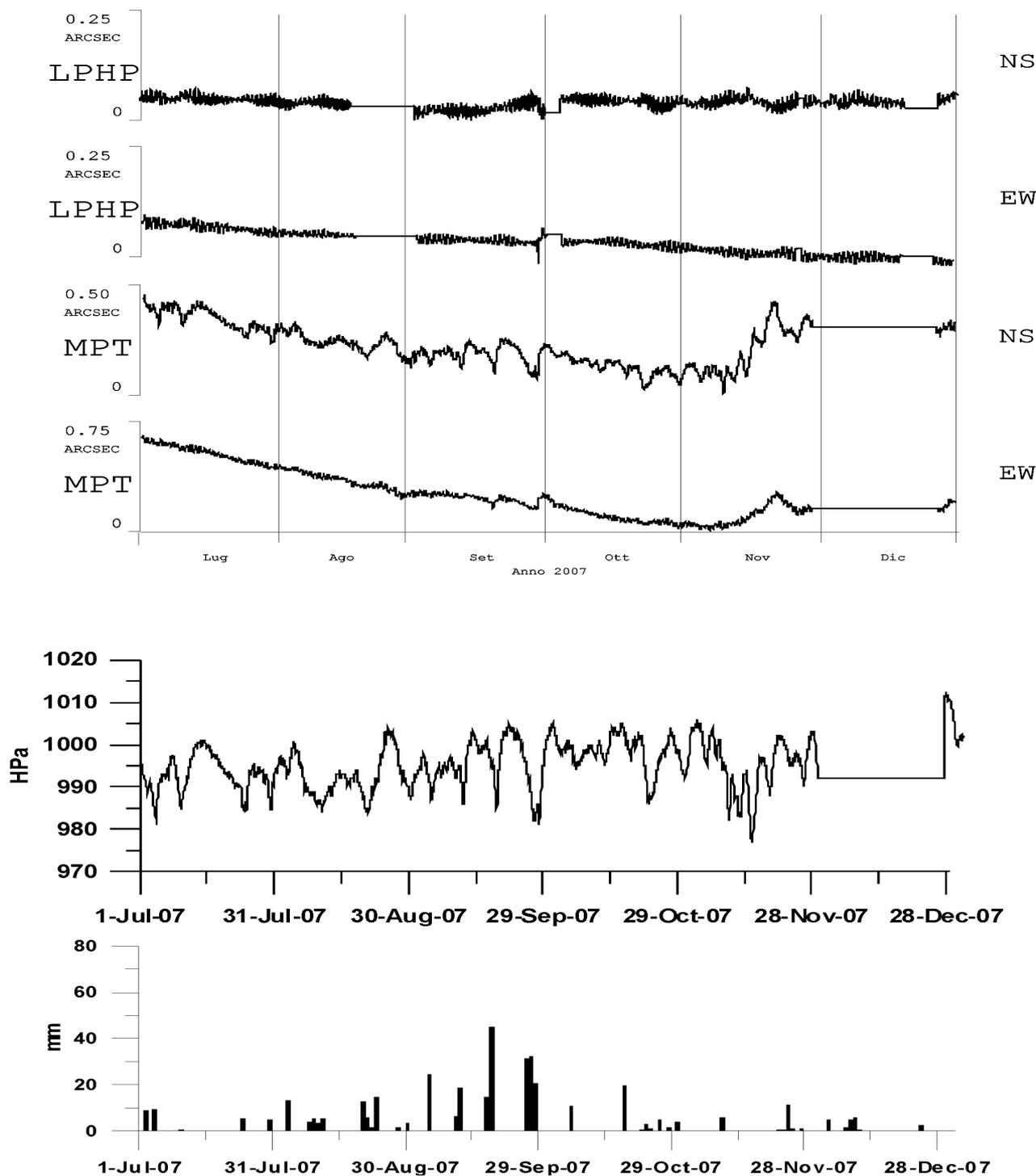
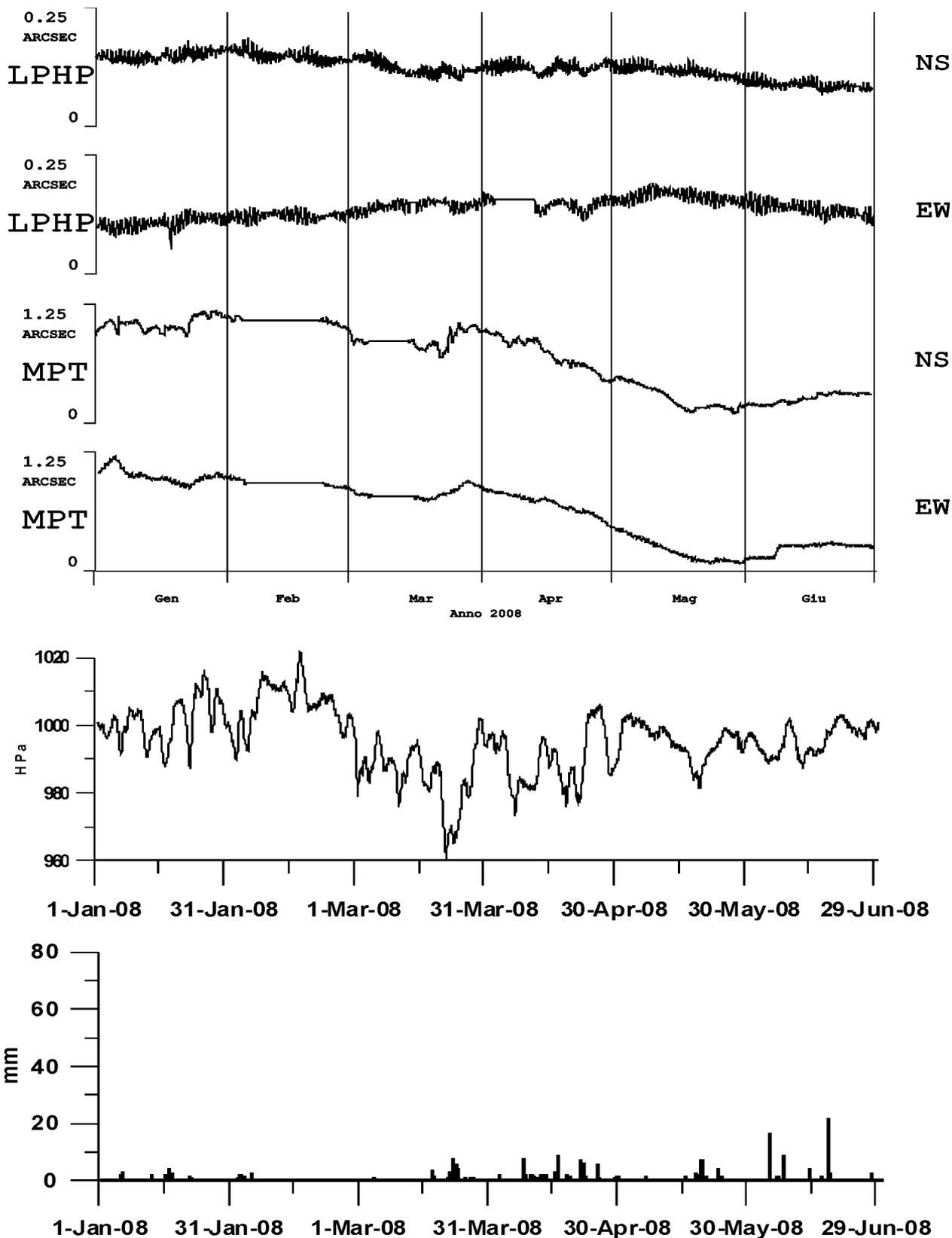


Fig. 3.1b - Grafico delle registrazioni effettuate con i pendoli LPHP e con i clinometri MPT della Grotta Gigante per il periodo 2007-2009. Nella parte inferiore del grafico è riportata la registrazione pluviometrica giornaliera (stazione di Trieste. Stravisi, comunicazione personale) e la pressione barometrica. B) periodo luglio-dicembre 2007



1-Jan-08 31-Jan-08 1-Mar-08 31-Mar-08 30-Apr-08 30-May-08 29-Jun-08
Fig. 3.1c - Grafico delle registrazioni effettuate con i pendoli LPHP e con i clinometri MPT della Grotta Gigante per il periodo 2007-2009. 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 2008

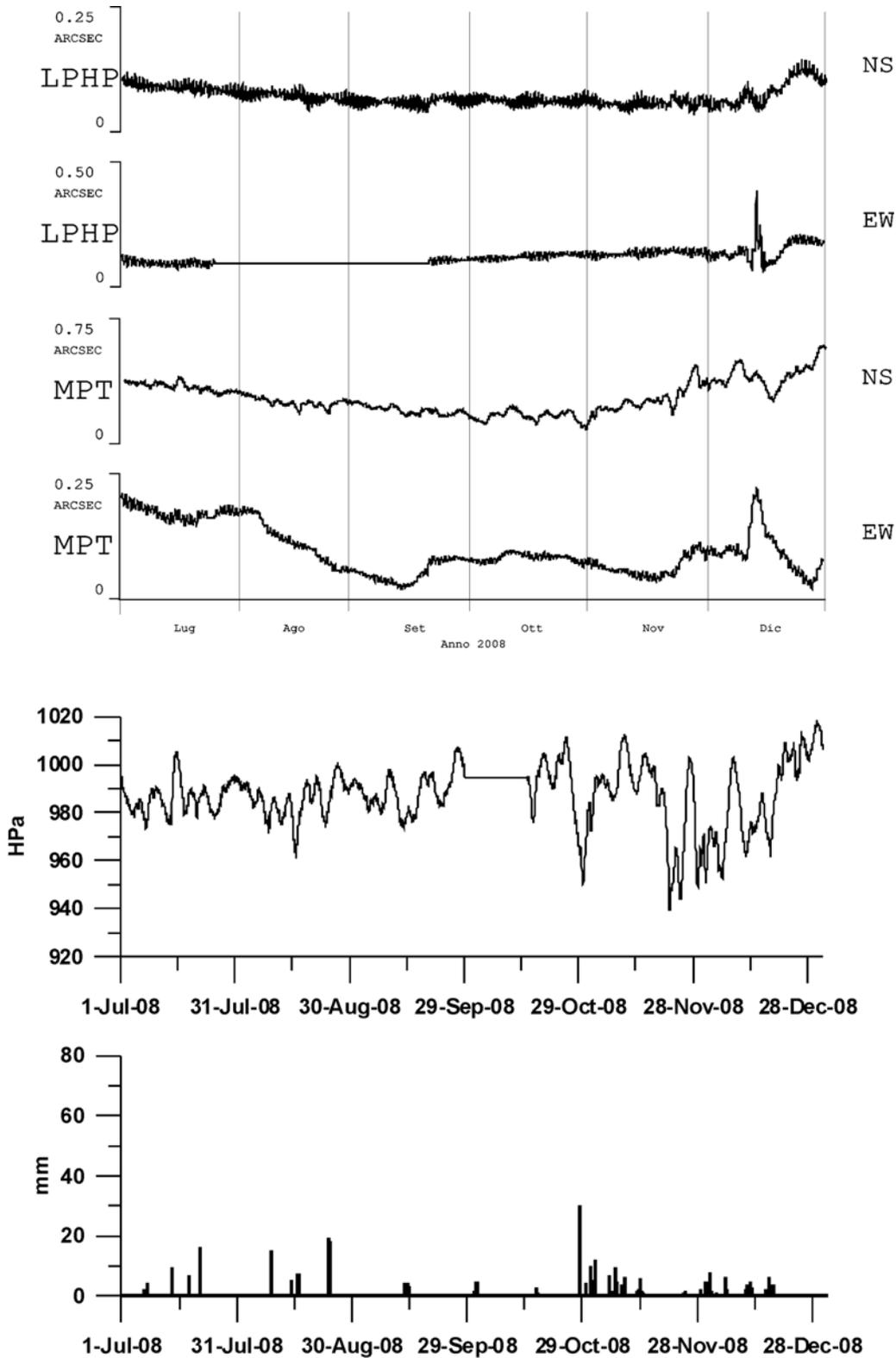


Fig. 3.1d - Grafico delle registrazioni effettuate con i pendoli LPHP e con i clinometri MPT della Grotta Gigante per il periodo 2007-2009. Nella parte inferiore del grafico è riportata la registrazione pluviometrica giornaliera (stazione di Trieste. Stravisi, comunicazione personale) e la pressione barometrica. D) Periodo luglio-dicembre 2008.

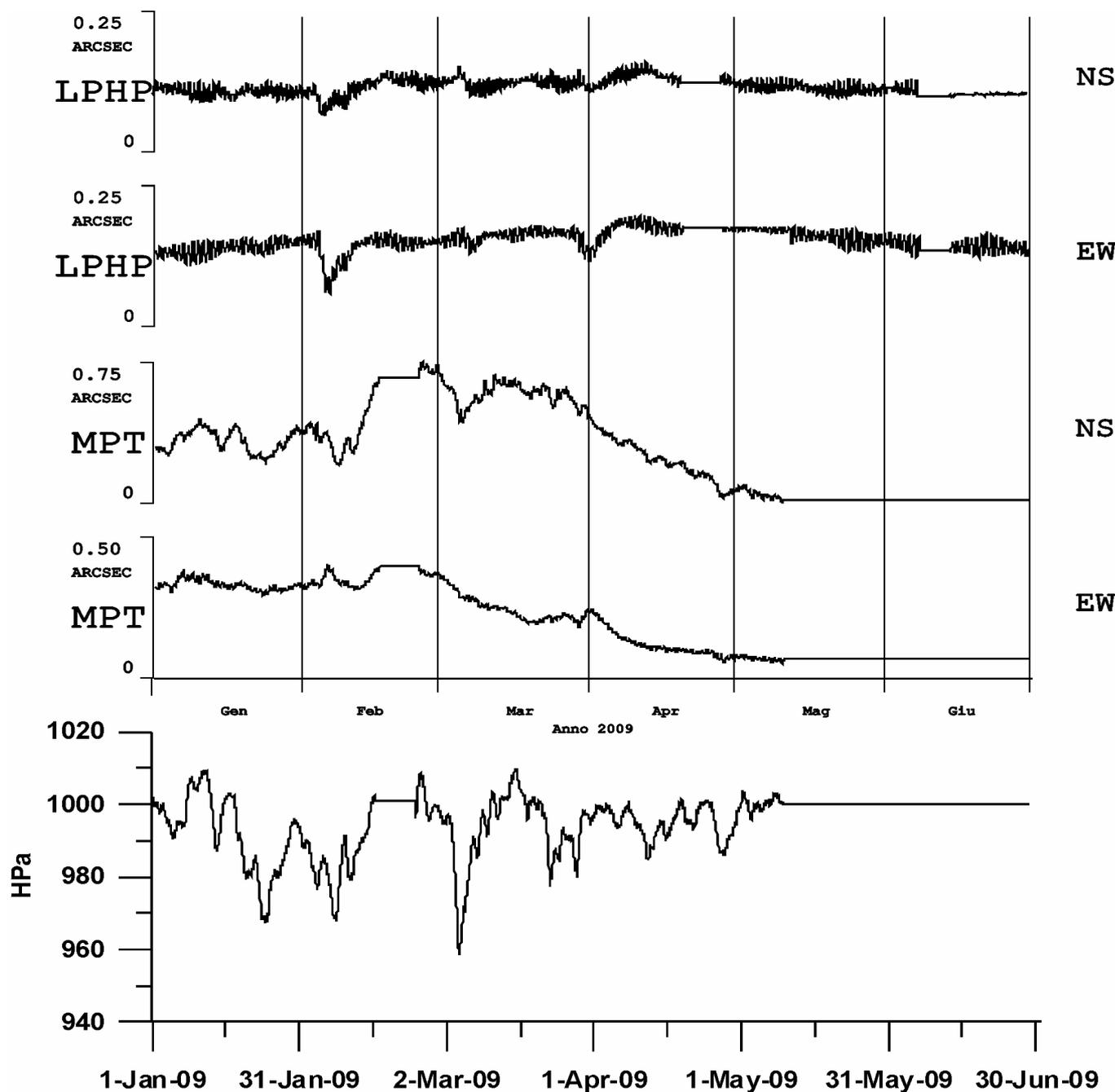


Fig. 3.1e - Grafico delle registrazioni effettuate con i pendoli LPHP e con i clinometri MPT della Grotta Gigante per il periodo 2007-2009. E) Periodo gennaio-giugno 2009. Per questo intervallo temporale attendiamo i dati della precipitazione.

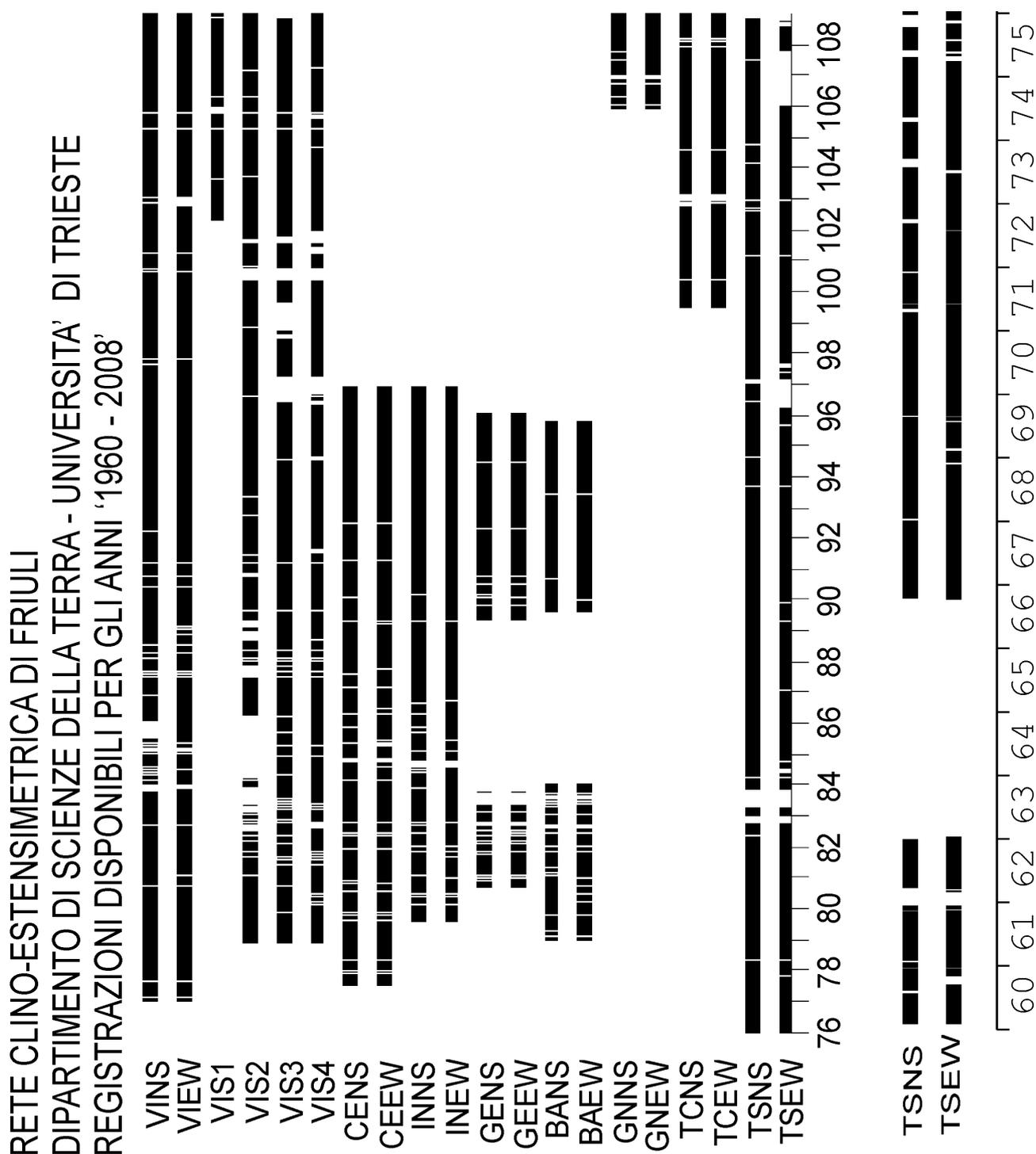


Fig. 3.2 - Quadro d'insieme della disponibilità delle registrazioni della rete strumentale clino-estensimetrica del Friuli e della Grotta Gigante gestita dal DST. Le sigle si riferiscono a: VI: Villanova, CE: Cesclans, IN: Invillino, GE: Gemona, BA: Barcis, GN: Genziana. I clinometri (pendoli orizzontali) 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.

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

Come accennato nel paragrafo 2, 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. 4.1**, e le rispettive registrazioni sono disponibili a richiesta. Gli eventi sono stati selezionati basandosi sul database del NEIC (2009).

Tab.4.1 Maggiori eventi sismici rilevati dai pendoli della Grotta Gigante durante il periodo 01/01/08-13/10/09 (NEIC). Selezione: Telesismi: $M \geq 6$, eventi Mediterraneo, Adriatico, Alpi: $M \geq 4$. I dati sono stati archiviati e sono disponibili a richiesta.

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

TABELLA GRAFICI TERREMOTI DATI DIGITALI INGV

| No. | 6.4 Località | Data | Ora | Mag | File grf, dat |
|-----|---------------|----------|----------------|------------|--------------------------------------|
| 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.grf |
| 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 |
| 310 | Vanuatu | 12/03/08 | 11:24 11:37 | 6.4 6.3 | 8072-1113fil.dat 120308Vanuatu.grf |
| 311 | Greece | 14/03/08 | 07:10 | 4.9 | 8074-0708fil.dat 140308Greece.grf |
| 312 | Bonin Islands | 14/03/08 | 22:32 | 6.2 | 8072-2200fil.dat 140308Bonin.grf |
| 313 | Crete | 28/03/08 | 00:16 | 5.6 | 8088-0001fil.dat 280308Crete.grf |
| 314 | Indonesia | 29/03/08 | 17:31 | 6.3 | 8089-1719fil.dat 290308Indonesia.grf |
| 315 | Loyalty Isl. Vanuatu | 09/04/08 | 12:46 14.48 | 7.3 6.3 | 8100-1315fil.dat 090408Loyalty.grf |
| 316 | Macquarie Is. | 12/04/08 | 00:30 | 7.1 | 8103-0003fil.dat 120408Macquarie.gr |
| 317 | Guatemala | 15/04/08 | 03:03 | 6.1 | 8106-0305fil.dat 150408Guatemala.gr |
| 318 | Alaska Tonga | 15/04/08 16/04/08 | 23:00 00:36 | 6.4 6.3 | 8106-2301fil.dat 150408Alaska.grf |
| 319 | Alaska | 16/04/08 | 05:54 | 6.6 | 8107-0608fil.dat 160408Alaska.grf |
| 320 | Fiji | 18/04/08 | 20:39 | 6.4 | 8109-2022fil.dat 180408Fiji.grf |
| 321 | Alaska | 02/05/08 | 01:34 | 6.6 | 8123-0103fil.dat 020508Alaska.grf |
| 322 | Japan | 07/05/08 | 16:02 16:17 16:45 | 6.2 6.1 6.8 | 8128-1618fil.dat 070508Japan.grf |
| 323 | Guam | 09/05/08 | 21:52 | 6.7 | 8130-2200fil.dat 090508Guam.grf |
| 324 | China | 12/05/08 | 06:28 06:43 | 7.9 6.0 | 8133-0609fil.dat 120508China.grf |
| 325 | C.Mid-Atl.R. | 23/05/08 | 19:36 | 6.4 | 8144_1921fil.dat 230508CMAtlR.grf |
| 326 | China | 25/05/08 | 08:22 | 6.0 | 8146-0810fil.dat 250508China.grf |
| 327 | Iceland | 29/05/08 | 15:46 | 6.3 | 8150-1517fil.dat 290508Iceland.grf |
| 328 | Philippines | 01/06/08 | 01:57 | 6.4 | 8153-0204fil.dat 010608Philip.grf |
| 329 | Greece | 08/06(08 | 12:25 | 6.3 | 8160-1213fil.dat 080608Greece.grf |
| 330 | Greece | 21/06/08 | 11:36 | 5.4 | 8173-1112fil.dat 210608Greece.grf |
| 331 | Andaman Isl. | 27/06/08 | 11:40 | 6.6 | 8179-1113fil.dat 270608Andaman.grf |
| 332 | S.Sandwich I | 30/06/08 | 06:18 | 6.7 | 8182-0608fil.dat 300608Sandwich.grf |
| 333 | Sea Okhotsk | 05/07/08 | 02:12 | 7.7 | 8187-0205fil.dat 050708Okhotsk.grf |

| | | | | | |
|-----|--------------------|----------|----------------|------------|--------------------------------------|
| 334 | Taiwan | 13/07/08 | 14:59 | 6.1 | 8195-1517fil.dat 130708Taiwan.grf |
| 335 | Dodecanese | 15/07/08 | 03:27 | 6.4 | 8197-0305fil.dat 150708Dodeca.gef |
| 336 | Japan | 19/07/08 | 02:39 | 7.0 | 8201-0205fil.dat 190708Japan.grf |
| 337 | S. Cruz Isl. | 19/07/08 | 09:27 11:01 | 6.6 6.2 | 8201-0205fil.dat 190708SCruz.grf |
| 338 | Japan | 21/07/08 | 11:31 | 6.0 | 8203-1113fil.dat 210708Japan.grf |
| 339 | Japan | 23/07/08 | 15:26 | 6.8 | 8205-1517fil.dat 230708Japan.grf |
| 340 | Kuril Islands | 24/07/08 | 01:43 | 6.2 | 8206-0103fil.dat 240708Kuril.grf |
| 341 | Greece | 30/07/08 | 05:03 | 4.7 | 8212-0506fil.dat 300708Greece.grf |
| 342 | Aegean Sea | 03/08/08 | 00:39 00:53 | 5.2 4.1 | 8216-0001 fil.dat 030808Aegean.grf |
| 343 | Crete Banda Sea | 04/08/08 | 19:39 20:45 | 5.4 6.3 | 8217-1921 fil.dat 040808Crete.grf |
| 344 | China | 05/08/08 | 09:49 | 6.0 | 8218-0911 fil.dat 050808China.grf |
| 345 | Philippines | 15/08/08 | 10:25 | 6.0 | 8228-1012fil.dat 150808Philippines.g |
| 346 | Mauritius | 22/08/08 | 07:48 | 6.0 | 8235-0709fil.dat 220808Mauritius.grf |
| 347 | China | 25/08/08 | 13:22 | 6.7 | 8238-1315fil.dat 250808China.grf |
| 348 | Lake Baykal | 27/08/08 | 01:36 | 6.2 | 8240-0103fil.dat 270808Baykal.grf |
| 349 | Ascension Is. | 28/08/08 | 15:22 | 6.3 | 8241-1517fil.dat 280808Ascension.gr |
| 350 | Papua China | 30/08/08 | 06:54 08:30 | 6.4 5.9 | 8243-0709fil.dat 300808Papua.grf |
| 351 | Vanuatu | 08/09/08 | 18:52 | 6.9 | 8252-1921 fil.dat 080908Vanuatu.grf |
| 352 | Iran | 10/09/08 | 11:01 | 6.1 | 8254-1112fil.dat 100908Iran.grf |
| 353 | C.M.Atl. Rid. | 10/09/08 | 13:08 | 6.6 | 8254-1315fil.dat 100908CentralMAR. |
| 354 | Indonesia Japan | 11/09/08 | 00:00 00:21 | 6.6 6.8 | 8255-0002fil.dat 110908Ind-Jap.grf |
| 355 | Mexico | 24/09/08 | 02:33 | 6.4 | 8268-0204fil.dat 240908Mexico.grf |
| 356 | New Zealand | 29/09/08 | 15:20 | 7.0 | 8273-1518fil.dat 290908NZeland.grf |
| 357 | Kyrgyzstan | 05/10/08 | 15:53 | 6.6 | 8279_1517fil.dat 051008Kyrgyzstan. |
| 358 | China | 06/10/08 | 08:31 | 6.4 | 8280-0810fil.dat 061008China.grf |
| 359 | Greece | 14/10/08 | 02:07 02:17 | 4.9 4.5 | 8288-0203fil.dat 141008Greece.grf |
| 360 | Mexico | 16/10/08 | 19:41 | 6.6 | 8290-1921 fil.dat 161008Mexico.grf |
| 361 | Tonga | 19/10/08 | 05:11 | 6.9 | 8293-0508fil.dat 191008Tonga.grf |
| 362 | Papua | 23/10/08 | 10:05 | 6.3 | 8297-1012fil.dat 231008Papua.grf |
| 363 | New Guinea | 28/10/08 | 16:00 | 6.0 | 8302-1618fil.dat 281008NGuinea.grf |
| 364 | Pakistan | 28/10/08 | 23:10 | 6.4 | 8302-2301 fil.dat 281008Pakistan.grf |
| 365 | Pakistan | 29/10/08 | 11:33 | 6.4 | 8303-1113fil.dat 291008Pakistan.grf |
| 366 | Vanuatu | 07/11/08 | 07:20 | 6.4 | 8312-0709fil.dat 071108Vanuatu.grf |
| 367 | Banda Sea | 07/11/08 | 16:04 | 6.2 | 8312-1618fil.dat 071108Banda.grf |

| | | | | | |
|-----|---------------|----------|----------------|------------|---|
| 368 | China | 10/11/08 | 01:22 | 6.3 | 8315-0103fil.dat 101108China.grf |
| 369 | Indonesia | 16/11/08 | 17:03 | 7.5 | 8321-1720fil.dat 161108Indonesia.grf |
| 370 | Panama C.R. | 19/11/08 | 06:11 | 6.1 | 8324-0608fil.dat 191108Panama.grf |
| 371 | Sumatra | 22/11/08 | 16:01 16:02 | 6.3 6.3 | 8327-1618fil.dat 221108Sumatra.grf |
| 372 | Ascension Is. | 22/11/08 | 18:50 | 6.2 | 8327-1820fil.dat 221108Ascension.gr |
| 373 | S. of Okhotsk | 24/11/08 | 09:03 | 7.3 | 8329-0912fil.dat 241108Okhotsk.grf |
| 374 | Kermadec Is. | 09/12/08 | 06:24 | 6.8 | 8344-0608fil.dat 091208Kermadec.gr |
| 375 | Japan | 20/12/08 | 10:29 | 6.5 | 8355-1012fil.dat 201208Japan.grf |
| 376 | Japan | 21/12/08 | 09:17 | 6.0 | 8356-0911fil.dat 211208Japan.grf |
| 377 | North. Italy | 23/12/08 | 15:22 1:58 | 5.3 5.0 | 8358-1516fil.dat 231208Italy.grf 8358-2122fil.dat 231208Italy2.grf |
| 378 | Indonesia | 03/01/09 | 19:44 | 7.6 | 9003-1922fil.dat 030109Indonesia.grf |
| 379 | Indonesia | 03/01/09 | 22:34 | 7.4 | 9003-2201fil.dat 030109Indonesia_2. |
| 380 | Costa Rica | 08/01/09 | 19:22 | 6.1 | 9008-1921fil.dat 080109CRica.grf |
| 381 | Loyalty Isl. | 15/01/09 | 07:27 | 6.7 | 9015-0709fil.dat 150109Loyalty.grf |
| 382 | Kuril Islands | 15/01/09 | 17:50 | 7.4 | 9015-1720fil.dat 150109Kuril.grf |
| 383 | Kermadec Is. | 18/01/09 | 14:12 | 6.4 | 9018-1416fil.dat 180109Kermadec.gr |
| 384 | Loyalty Isl. | 19/01/09 | 03:35 | 6.5 | 9019-0305fil.dat 190109Loyalty.grf |
| 385 | Indonesia | 11/02/09 | 17:35 18:25 | 7.2 6.0 | 9042-1720fil.dat 110209Indonesia.grf |
| 386 | Indonesia | 12/02/09 | 13:15 | 6.4 | 9043-1315fil.dat 120209Indonesia.grf |
| 387 | Kermadec Is. | 18/02/09 | 21:54 | 6.9 | 9049-2200fil.dat 180209Kermadec.gr |
| 388 | Svalbard | 06/03/09 | 10:50 | 6.5 | 9065-1012fil.dat 060309Svalbard.grf |
| 389 | Indonesia | 16/03/09 | 14:16 | 6.3 | 9075-1416fil.dat 160309Indonesia.grf |
| 390 | Tonga | 19/03/09 | 18:18 | 7.6 | 9078-1821fi.dat 190309Tonga.grf |
| 391 | New Guinea | 01/04/09 | 03:55 | 6.4 | 9091-0406fil.dat 010409NGuinea.grf |
| 392 | Philippine | 04/04/09 | 05:32 | 6.3 | 9094-0507fil.dat 040409Philippine.gr |
| 393 | Central Italy | 06/04/09 | 01:33 02:37 | 6.3 4.6 | 9096-0103fil.dat 060409CItaly.grf |
| 394 | Central Italy | 07/04/09 | 17:48 | 5.5 | 9097-1718fil.dat 070409CItaly.grf |
| 395 | Central Italy | 09/04/09 | 00:53 | 5.3 | 9099-0001ful.dat 090409CItaly.grf |
| 396 | Central Italy | 09/04/09 | 19:38 | 5.2 | 9099-1920fil.dat 090409CItaly_2.grf |
| 397 | Central Italy | 13/04/09 | 21:14 | 5.0 | 9103-2122fi.dat 130409CItaly.grf |
| 398 | S.Sandwich I | 16/04/09 | 14:57 | 6.6 | 9106-1517.dat 160409Sandwich.grf |
| 399 | Chile | 17/04/09 | 02:08 | 6.1 | 9107-0204fil.dat 170409Chile.grf |
| 400 | Kuril Islands | 18/04/09 | 19:18 | 6.6 | 9108-1921fil.dat 180409Kuril.grf |
| 401 | Indonesia | 19/04/09 | 05:23 | 6.1 | 9109-0507fil.dat 190409Indonesia.grf |
| 402 | Hokkaido | 05/06/09 | 03:31 | 6.3 | 9156-0305fil.dat 050609Hokkaido.grf |
| 403 | N. Atlantic R | 06/06/09 | 20:33 | 6.0 | 9157-2022fil.dat 060609NARidge.grf |

| | | | | | |
|-----|--|----------|----------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| 404 | Papua | 23/06/09 | 14:19 | 6.7 | 9174-1416fil.dat 230609Papua.grf |
| 405 | Crete | 01/07/09 | 09:30 | 6.4 | 9182-0910fil.dat 010709Crete.grf |
| 406 | G. of Califor. | 03/07/09 | 11:00 | 6.0 | 9184-1113fil.dat 030709Califor.grf |
| 407 | Alaska | 96/97/09 | 14:53 | 6.1 | 9187-1416fil.dat 060709Alaska.grf |
| 408 | Baffin Bay | 07/07/09 | 19:12 | 6.1 | 9188-1921fil.dat 070709Baffin.grf |
| 409 | Taiwan | 13/07/09 | 18:05 | 6.3 | 9194-1820fil.dat 130709Taiwan.grf |
| 410 | New Zealand | 15/07/09 | 09:22 | 7.8 | 9196-0912fil.dat 150709NZelanda.grf |
| 411 | Papua | 15/07/09 | 20:11 | 6.1 | 9196-2022fil.dat 150709Papua.grf |
| 412 | Gulf of Calif. | 03/08/09 | 18:00 18:42 | 6.9 6.2 | 9215-1820fil.dat 030809GCalif.grf |
| 413 | Japan | 05/08/09 | 00:18 | 6.1 | 9217-0002fil.dat 050809Japan.grf |
| 424 | Japan | 09/08/09 | 10:56 | 7.1 | 9221-1114fil.dat 090809Japan.grf |
| 425 | Andaman Isl. Japan | 10/08/09 | 19:56 20:07 | 7.5 6.4 | 9222-2023fil.dat 100809Andaman.grf |
| 426 | Japan | 12/08/09 | 22:49 | 6.6 | 9224-2200fil.dat 120809Japan.grf |
| 427 | Indonesia | 16/08/09 | 07:38 | 6.6 | 9228-0709fil.dat 160809Indonesia.grf |
| 428 | Japan | 17/08/09 | 10:11 | 6.0 | 9229-1012fil.dat 170809Japan.grf |
| 429 | Banda Sea China | 28/08/09 | 01:51 01:52 | 6.8 6.2 | 9240-0103fil.dat 280809Banda.grf |
| 430 | Samoa Islan. | 30/08/09 | 14:52 | 6.6 | 9242-1517fil.dat 300809Samoa.grf |
| 431 | Java | 02/09/09 | 07:55 | 7.0 | 9245-0811fil.dat 020909Java.grf |
| 432 | Albania | 06/09/09 | 21:50 | 5.5 | 9249-2122fil.dat 060909Albania.grf |
| 433 | Georgia | 07/09/09 | 22:42 | 5.9 | 9250-2123fil.dat 070909Georgia.grf |
| 434 | Venezuela | 12/09/09 | 20:06 | 6.4 | 9255-2022fil.dat 120909Venezuela.gr |
| 435 | Bhutan | 21/09/09 | 08:53 | 6.1 | 9264-0810fil.dat 210909Bhutan.grf |
| 436 | Mexico | 24/09/09 | 07:16 | 6.3 | 9267-0709fil.dat 240909Mexico.grf |
| 437 | Samoa Islan. | 29/09/09 | 17:48 | 8.0 | 9272-1821fil.dat 290909Samoa.grf |
| 438 | Sumatra | 30/09/09 | 10:16 | 7.6 | 9273-1013fil.dat 300909Sumatra.grf |
| 439 | Sumatra | 01/10/09 | 01:52 | 6.6 | 9274-0204fil.dat 011009Sumatra.grf |
| 440 | Celebes Sea Vanuatu Santa Cruz I. Vanuatu | 07/10/09 | 21:41 22:03 22:18 23:14 | 6.7 7.8 7.7 7.3 | 9280-2201fil.dat 071009Celebes.grf |
| 441 | Santa Cruz I. | 08/10/09 | 02:13 | 6.6 | 9281-0204fil.dat 081009SCruz.grf |
| 442 | Vanuatu Santa Cruz I. | 08/10/09 | 08:29 08:35 | 6.8 6.5 | 9281-0810fil.dat 081009Vanuati.grf |
| 443 | Mauritius | 12/10/09 | 03:16 | 6.0 | 9285-0305fil.dat 121009Mauritius.grf |
| 444 | Alaska | 13/10/09 | 05:37 | 6.2 | 9286-0507fil.dat 131009Alaska.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. 4.1 A-Z**, per una selezione degli eventi disponibili..

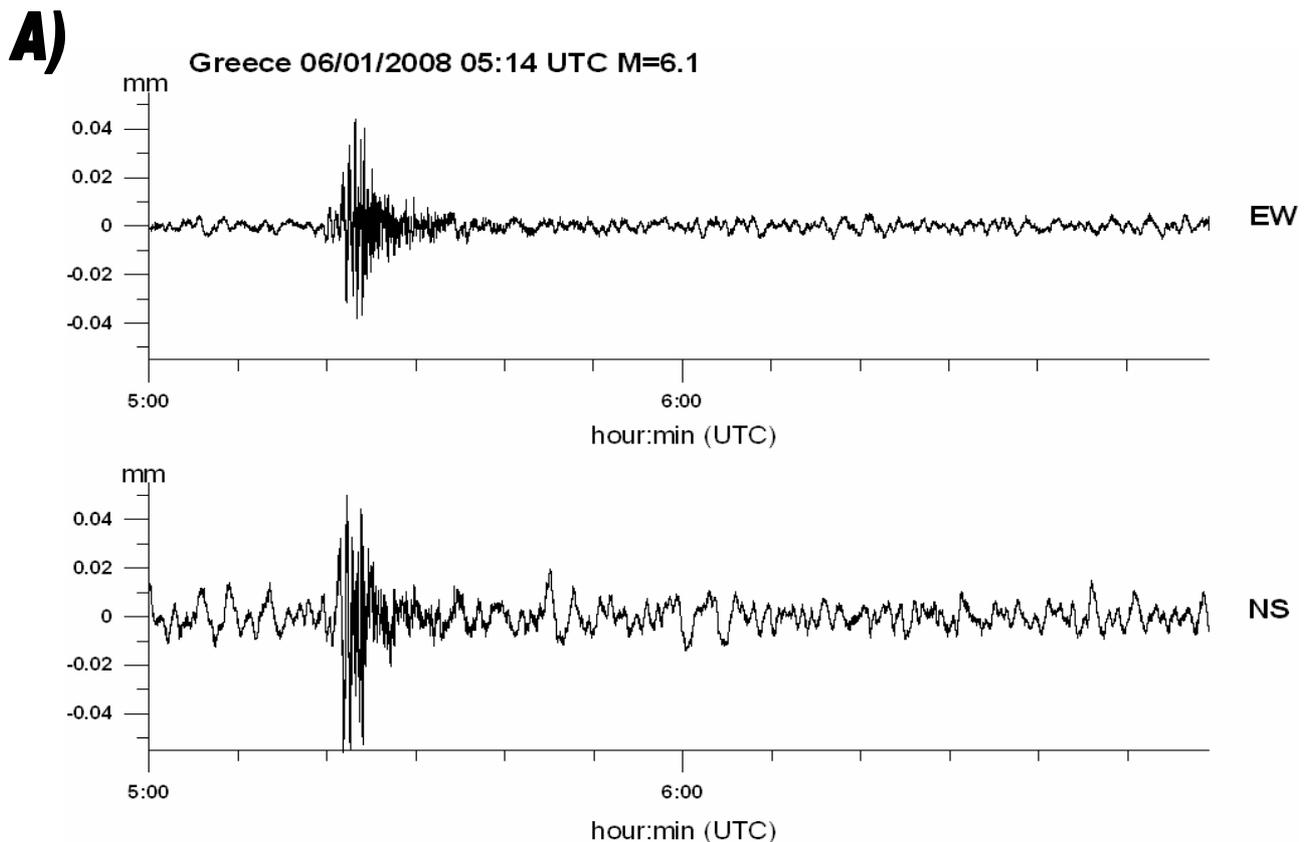
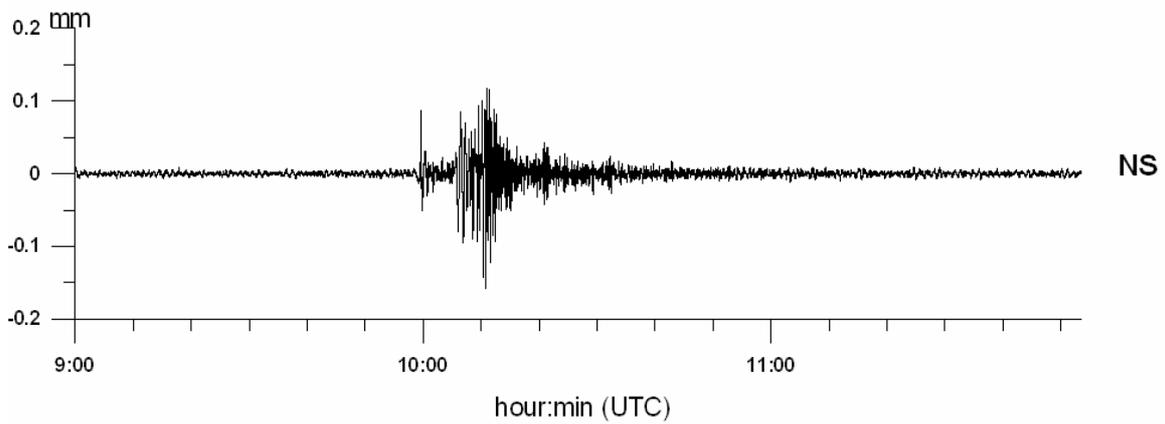
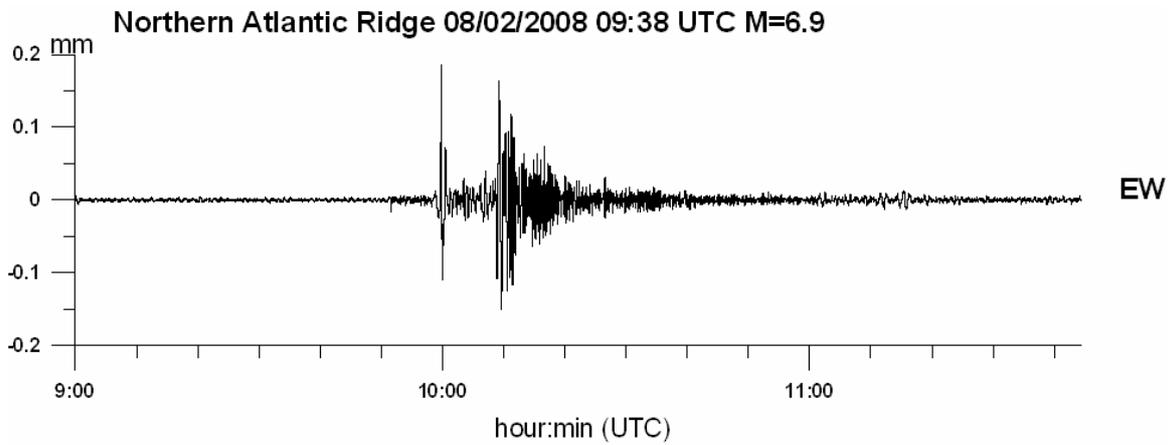
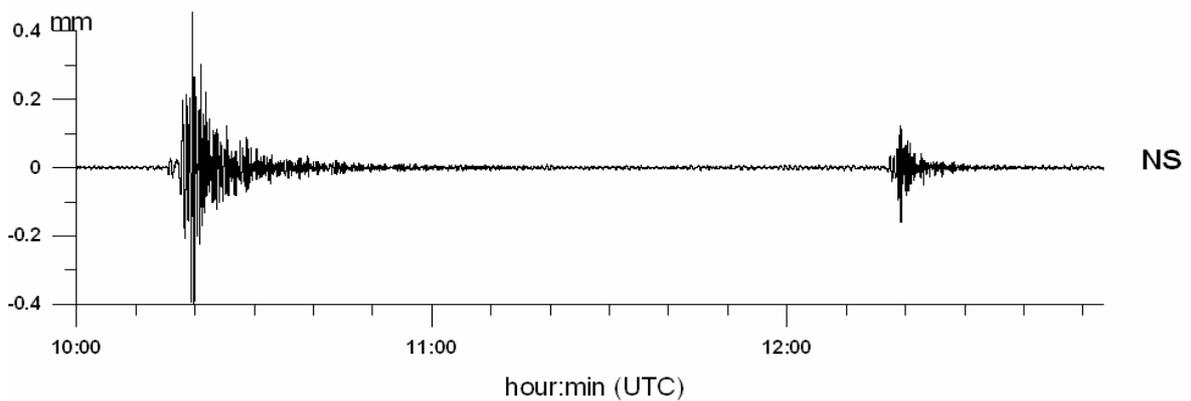
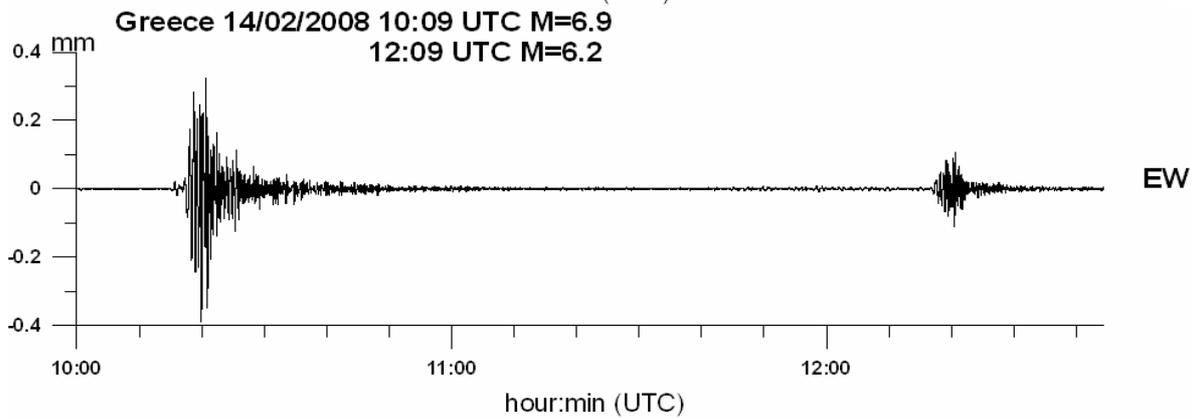


Fig. 4.1 (A-Z) – Registrazione di alcuni eventi sismici di magnitudo rilevante avvenuti durante il periodo dal 01 gennaio 2008 a 13 ottobre 2009 (vedi Tab. 4.1). I dati originali sono stati filtrati con un filtro passa banda con banda passante per le frequenze comprese fra 0.0167 Hz e .25 Hz.

B)

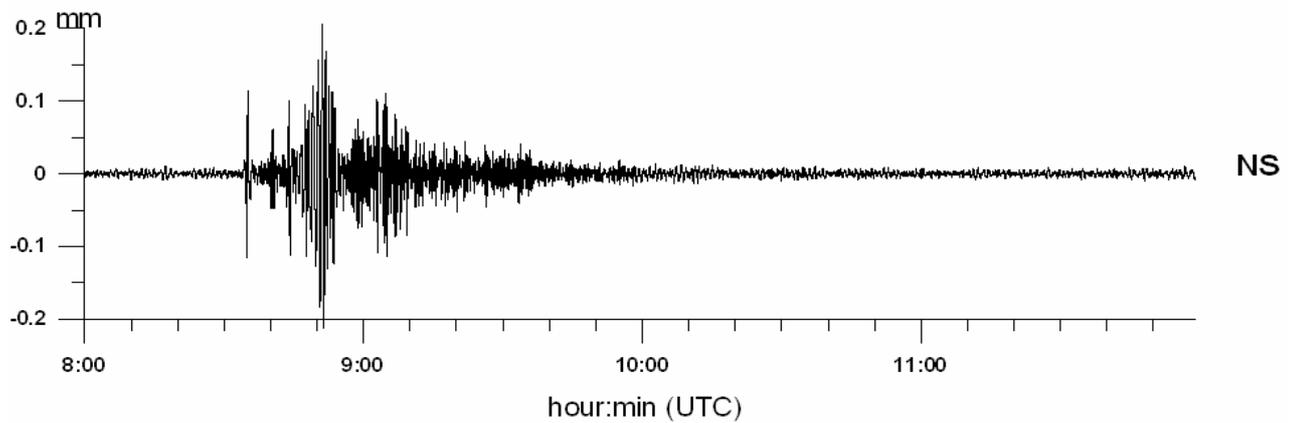
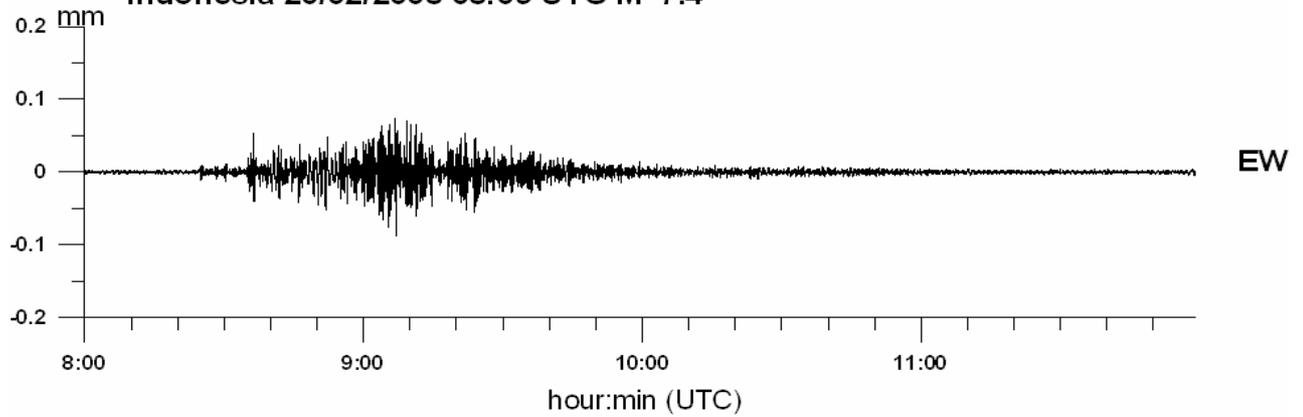


C)



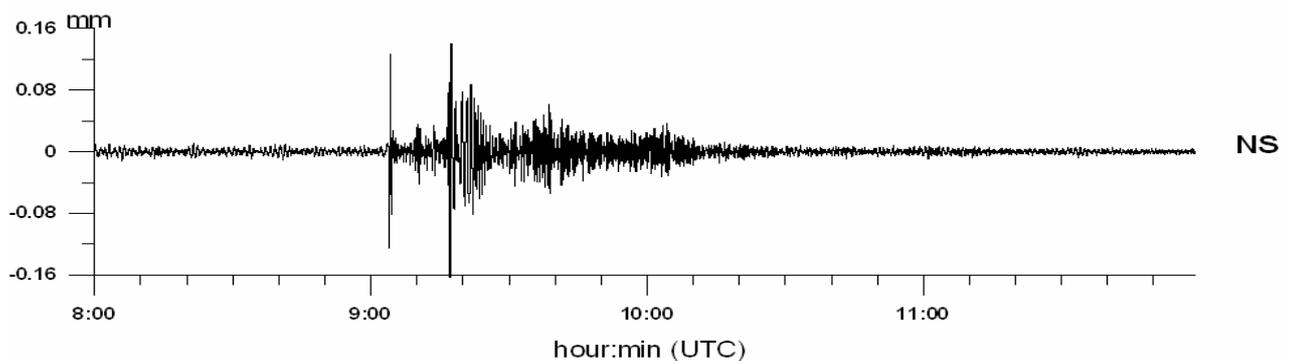
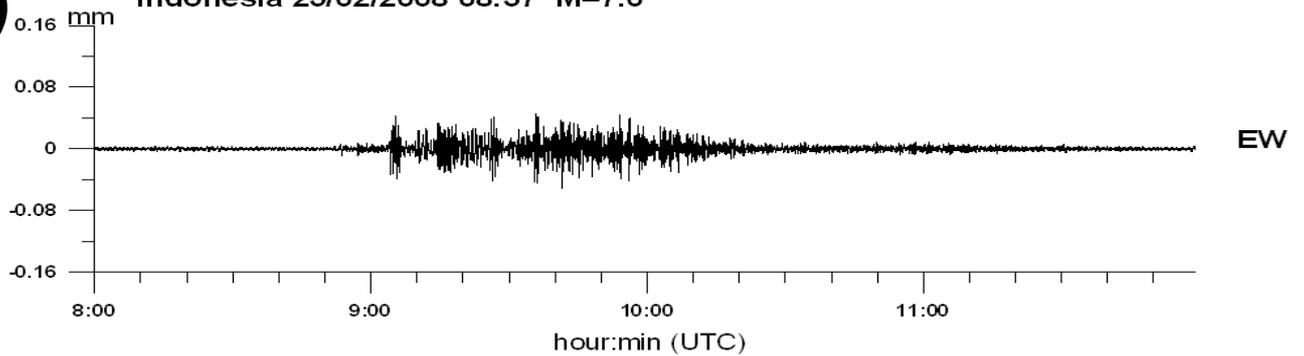
D)

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

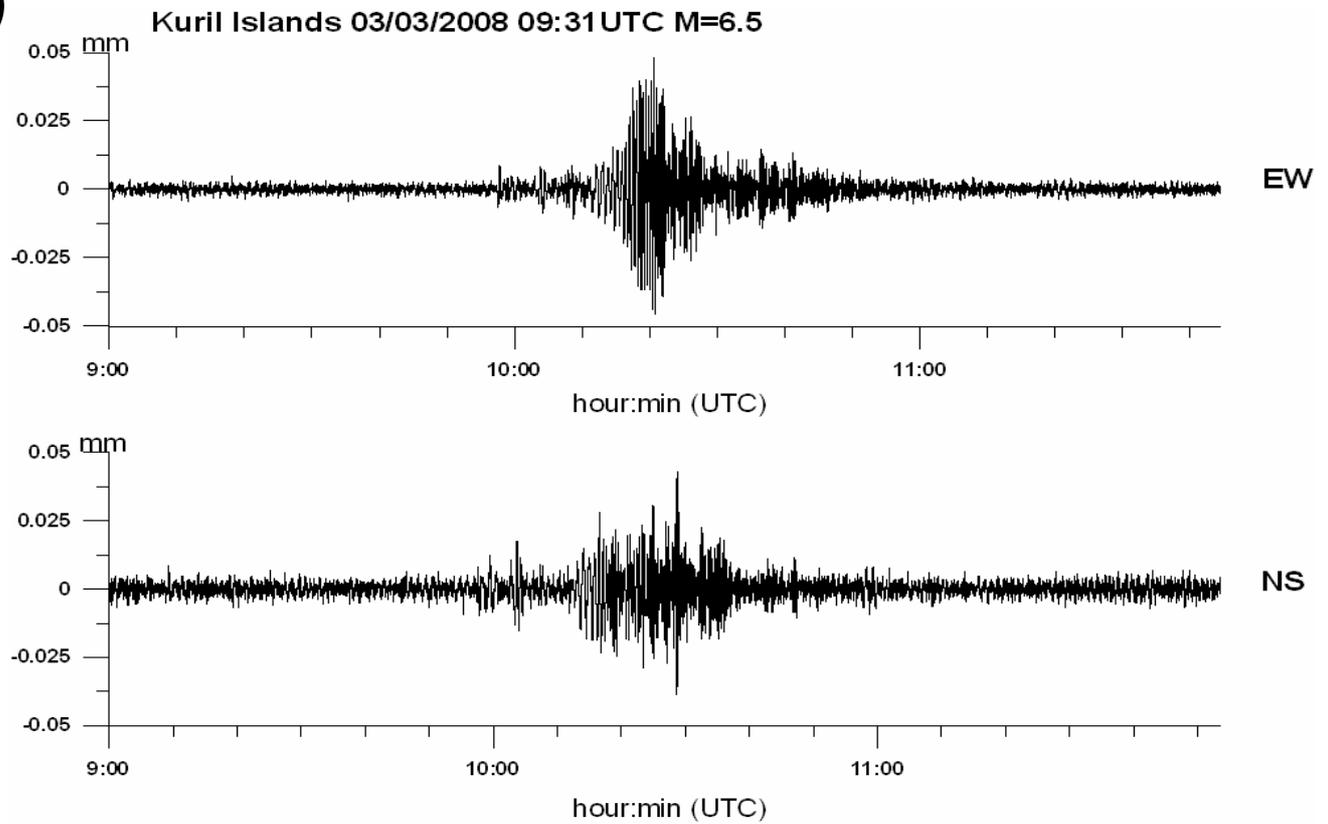


E)

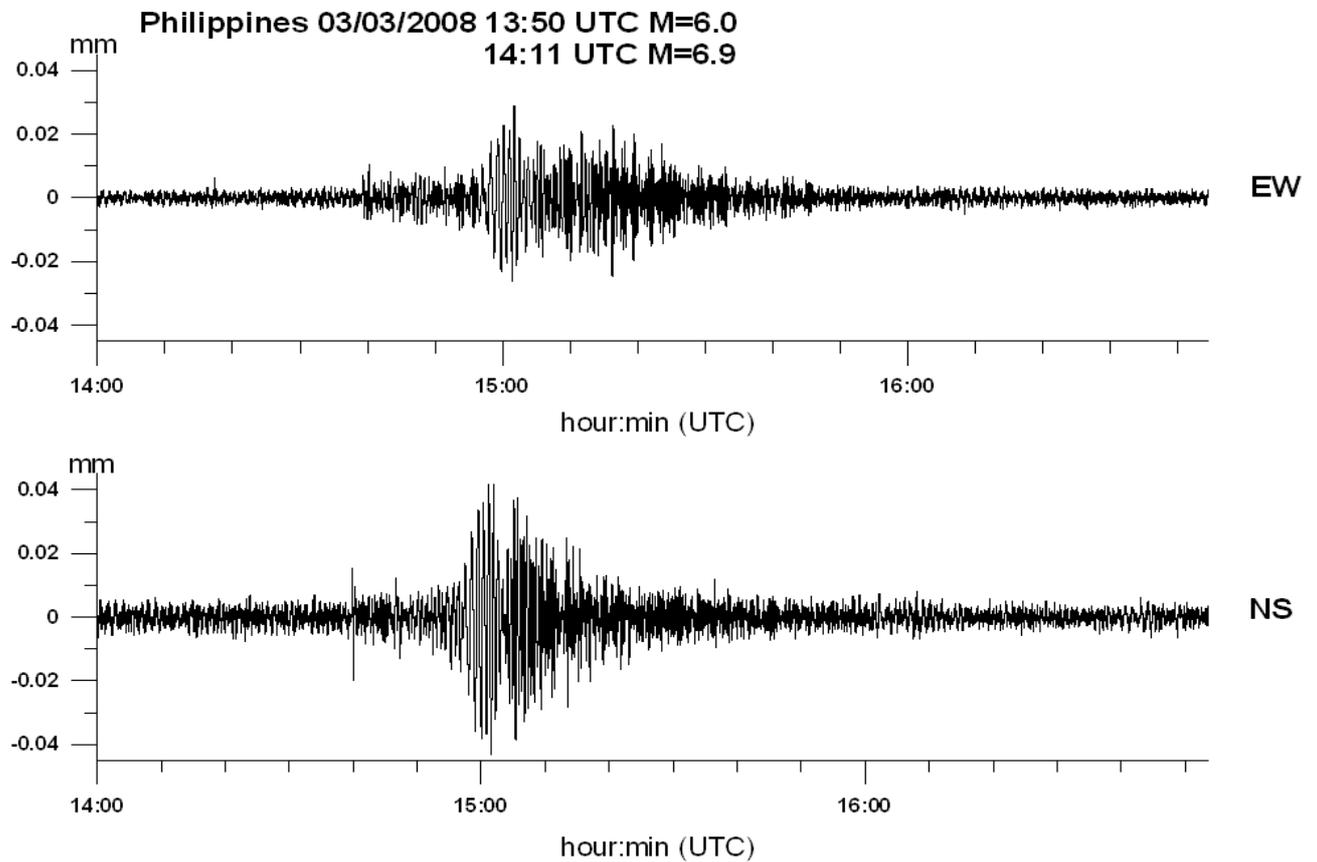
Indonesia 25/02/2008 08:37 M=7.0



F)

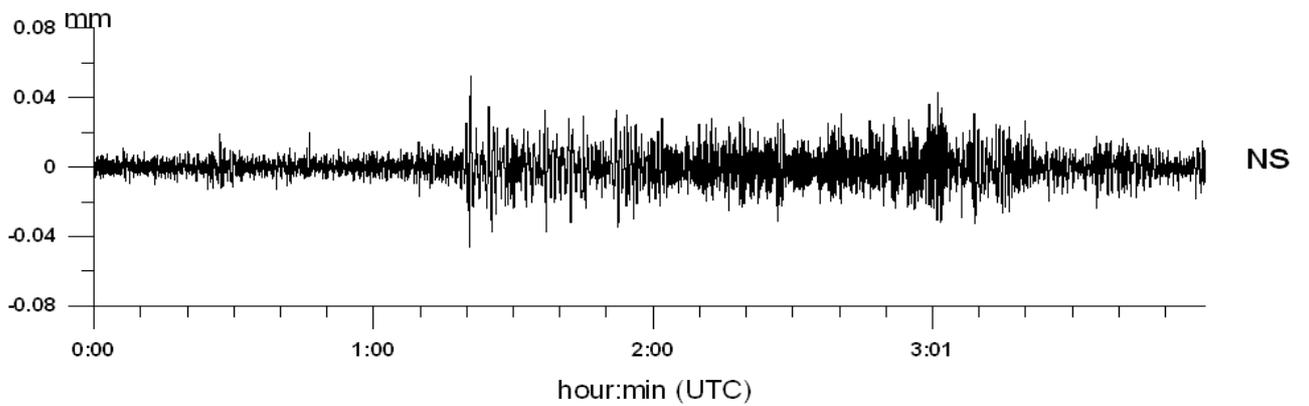
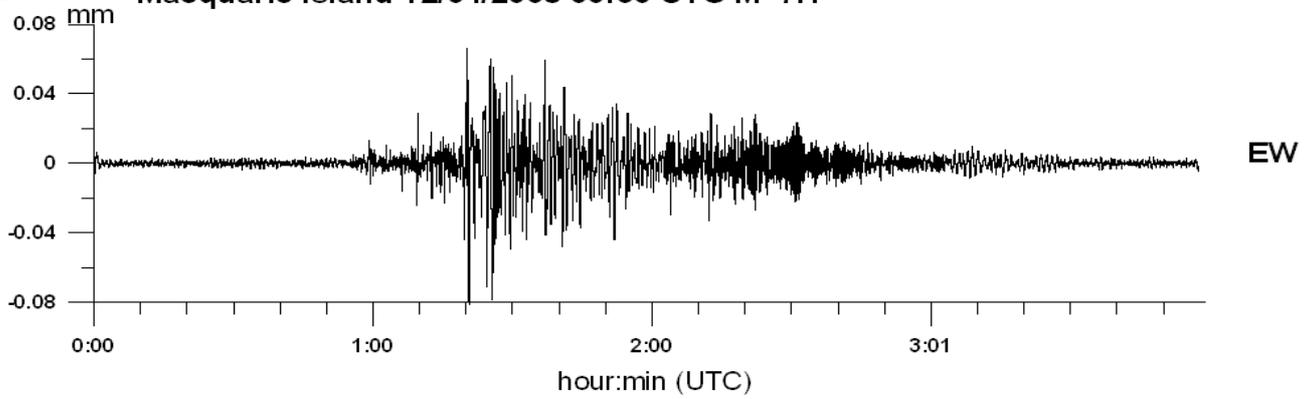


G)



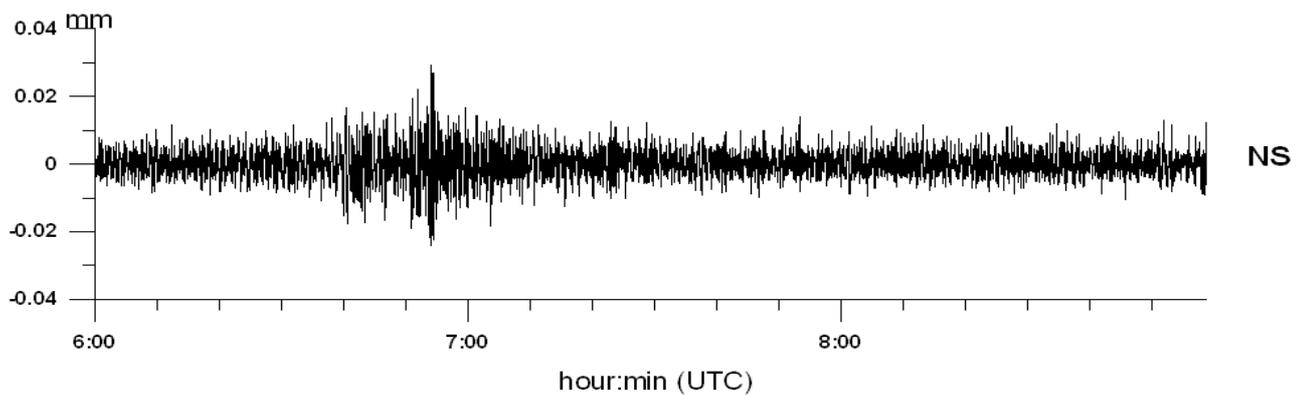
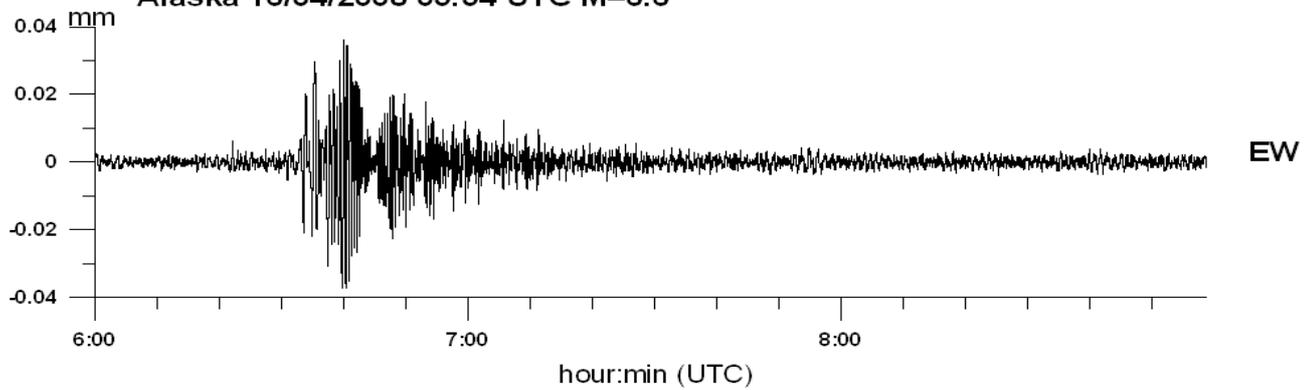
H)

Macquarie Island 12/04/2008 00:30 UTC M=7.1



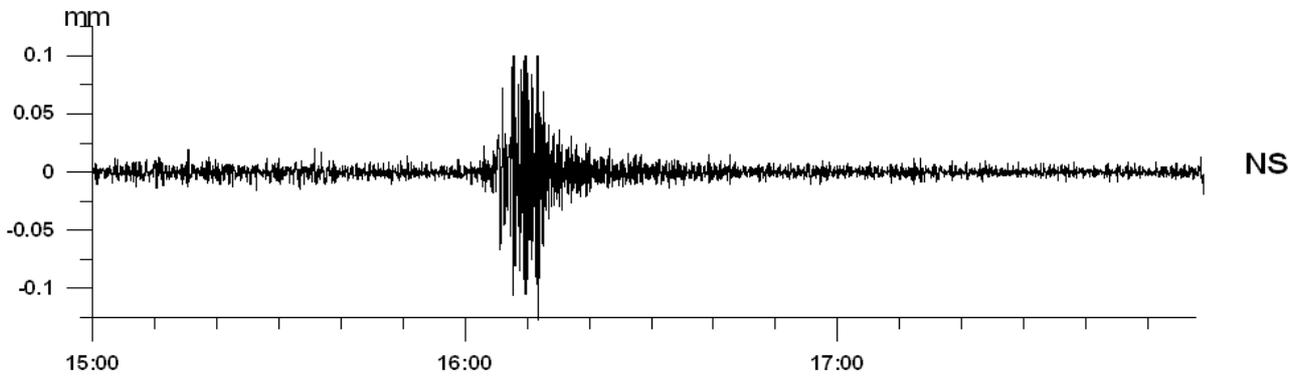
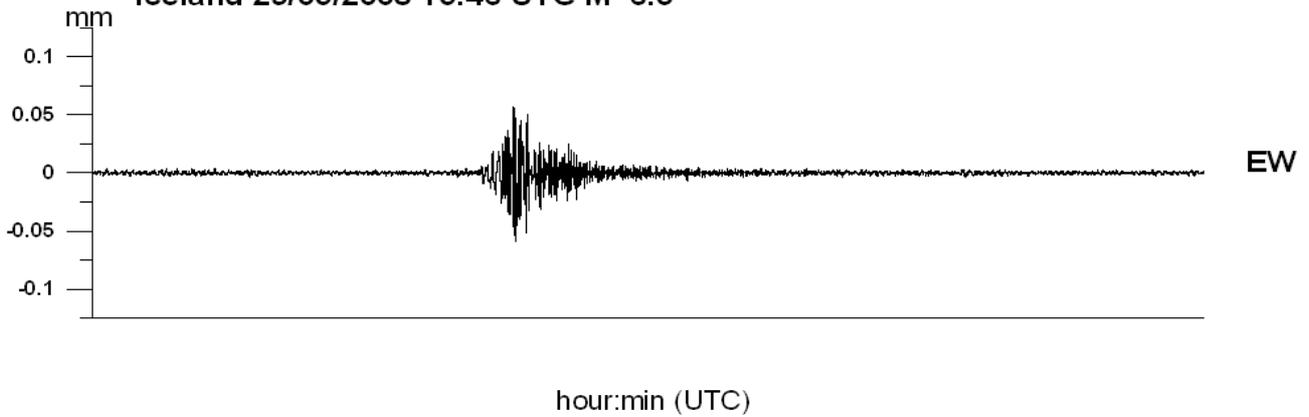
I)

Alaska 16/04/2008 05:54 UTC M=6.6



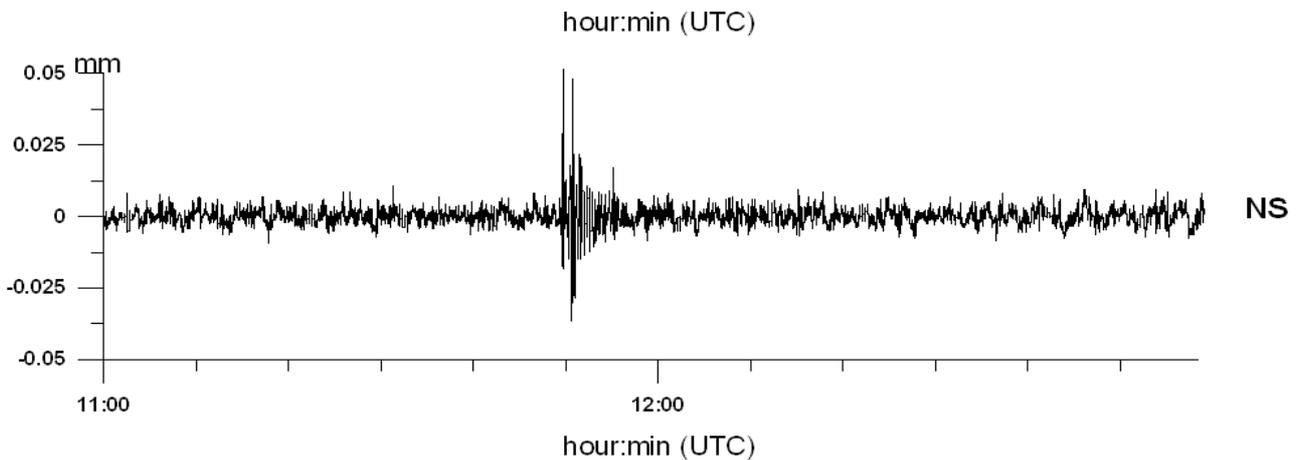
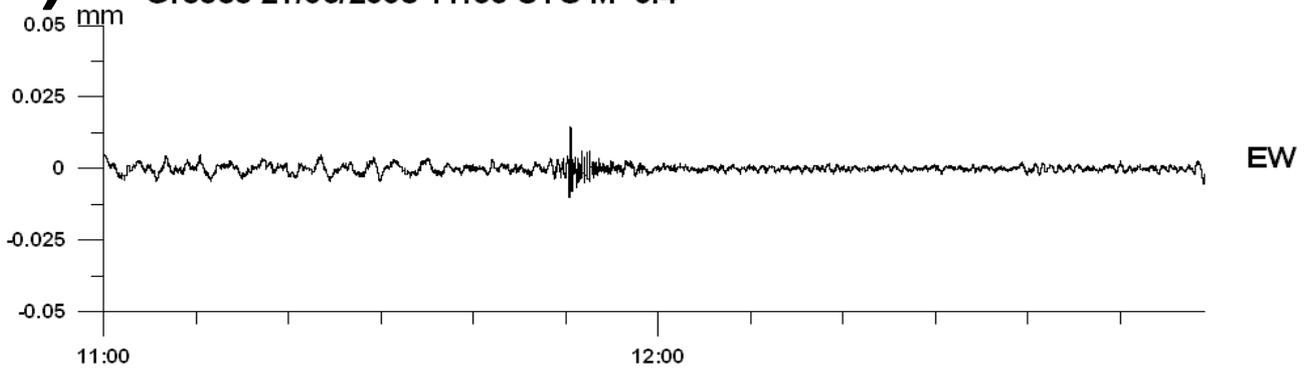
J)

Iceland 29/05/2008 15:46 UTC M=6.3

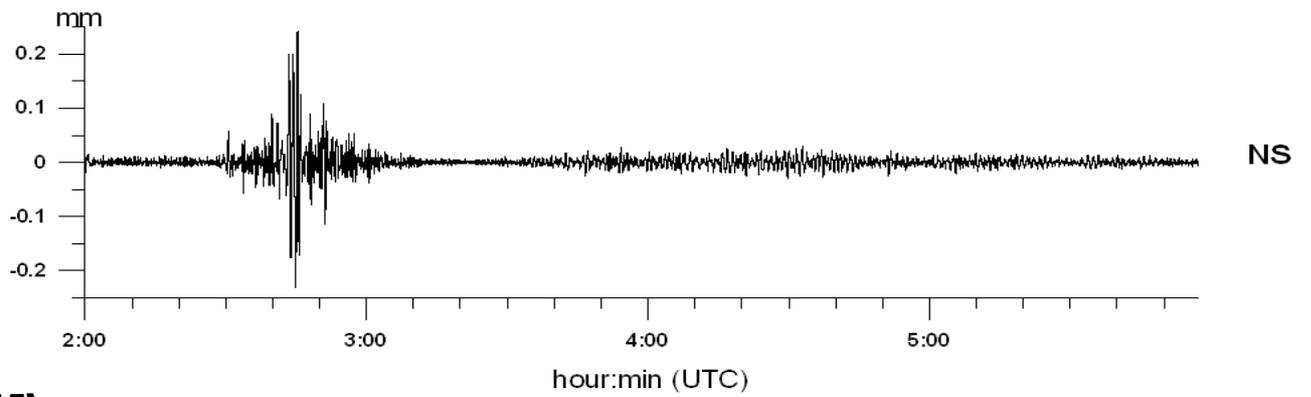
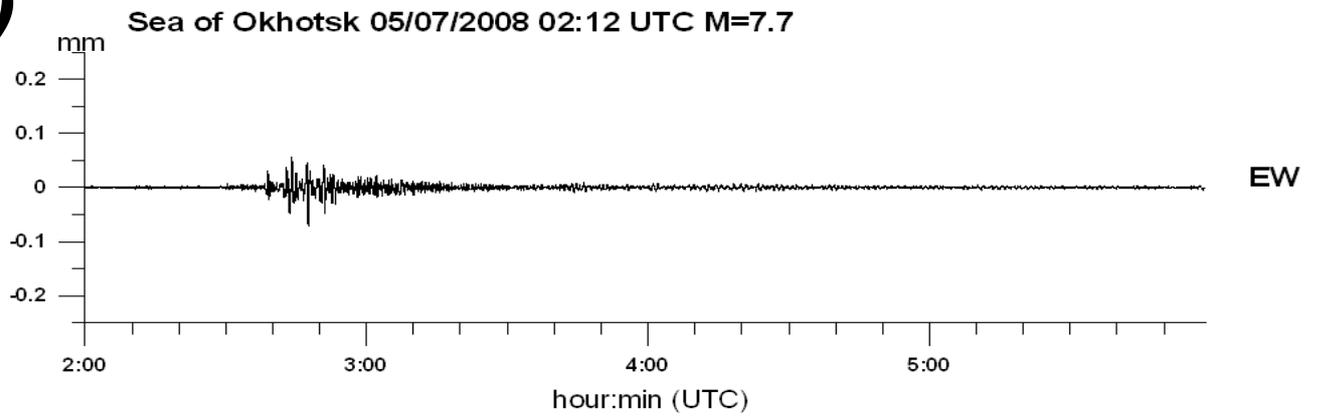


K)

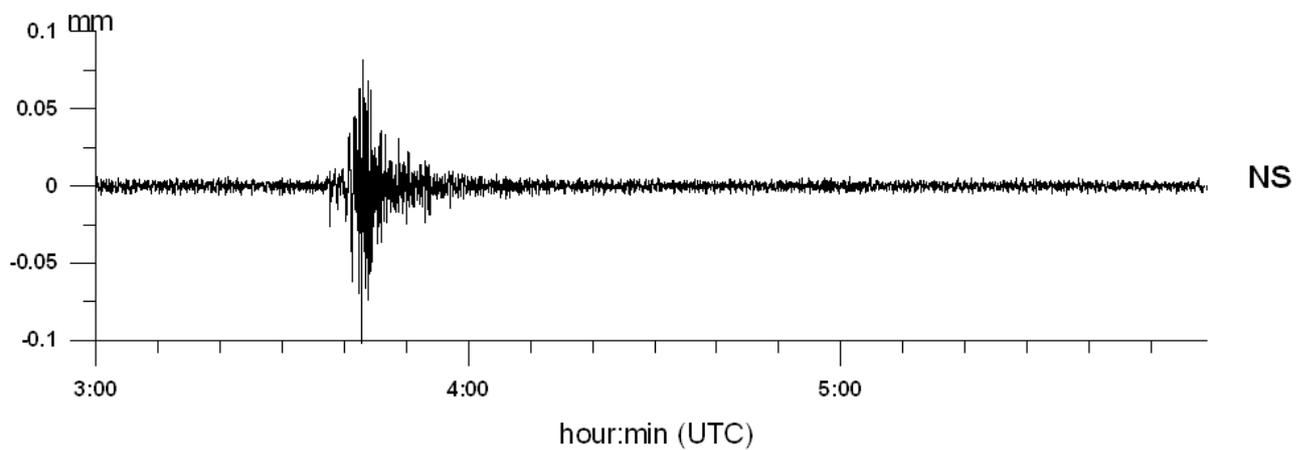
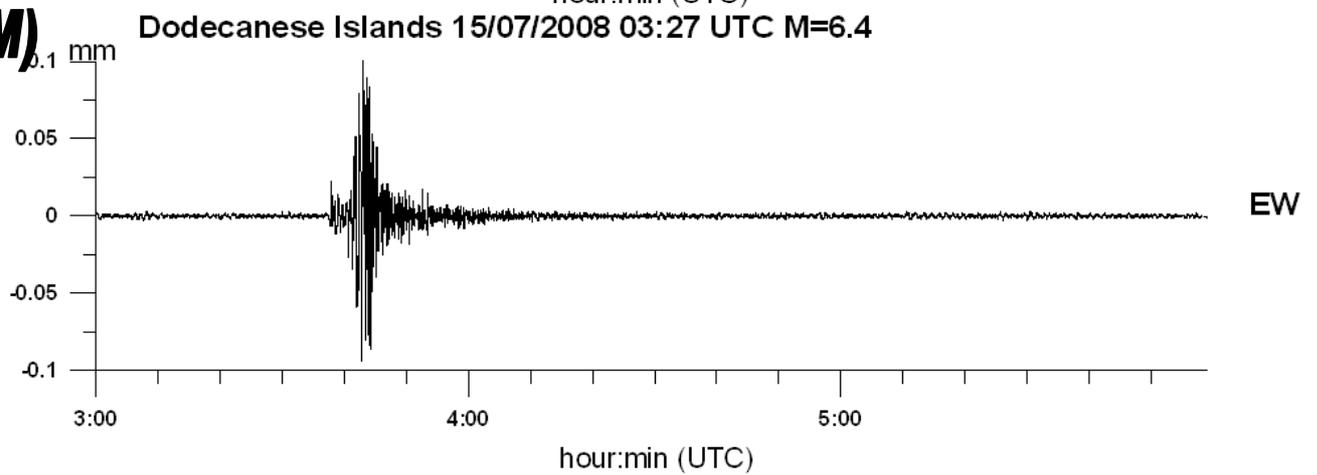
Greece 21/06/2008 11:36 UTC M=5.4



L)

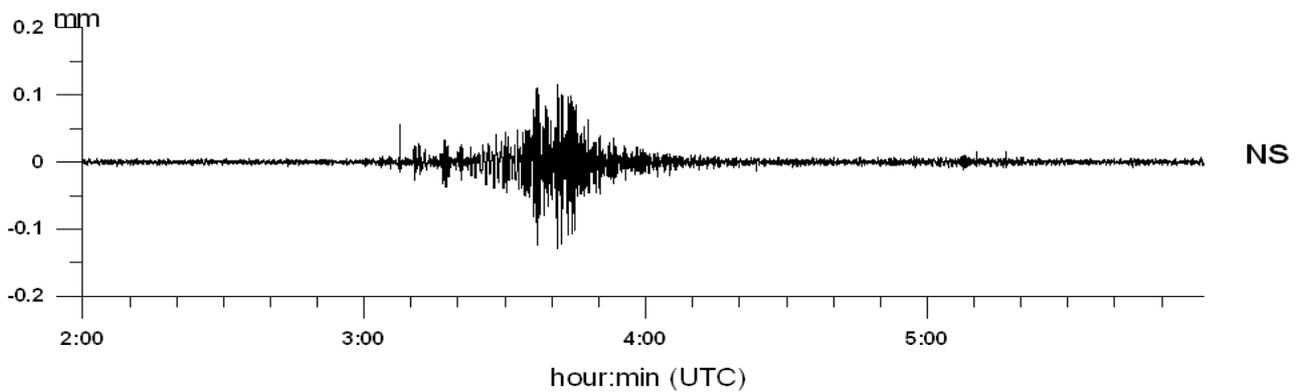
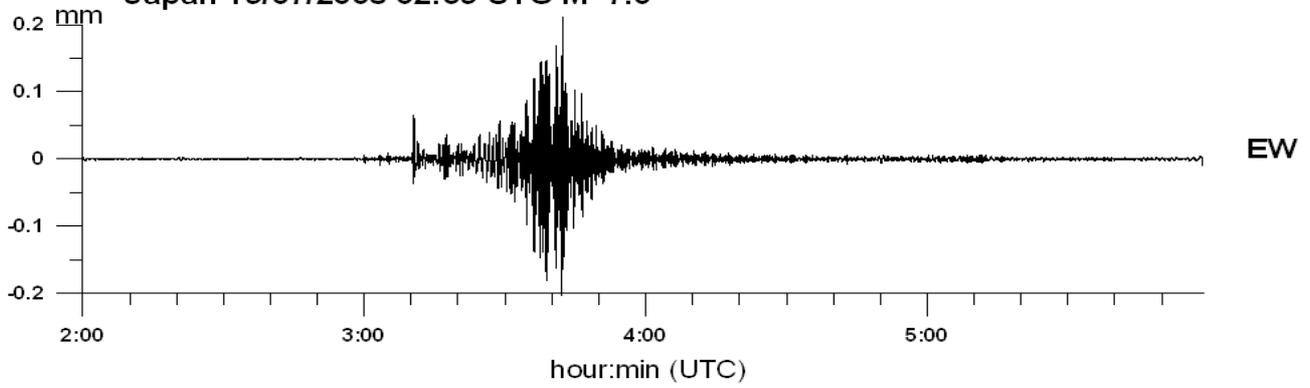


M)



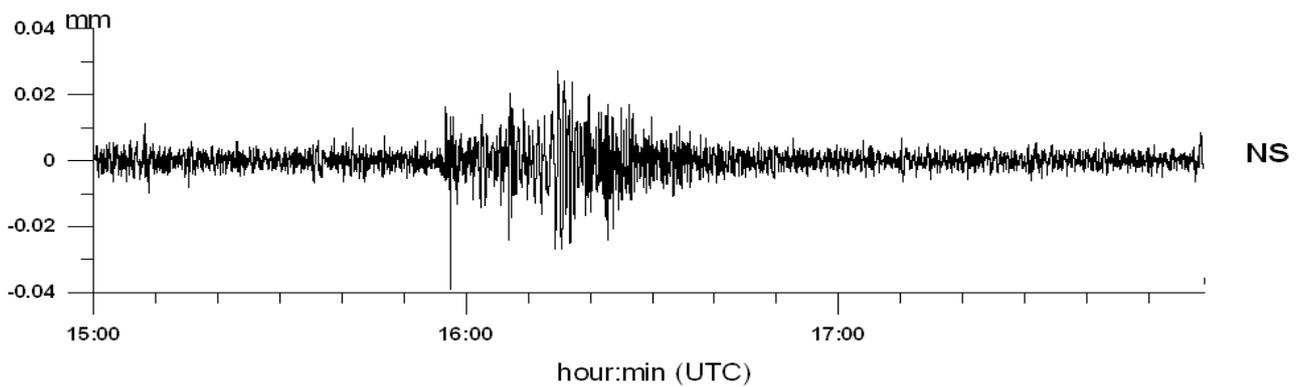
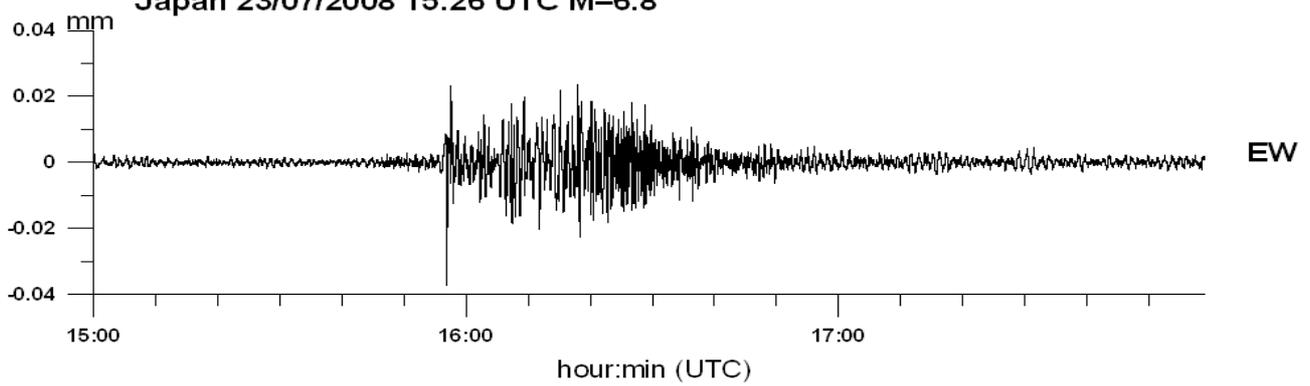
N)

Japan 19/07/2008 02:39 UTC M=7.0



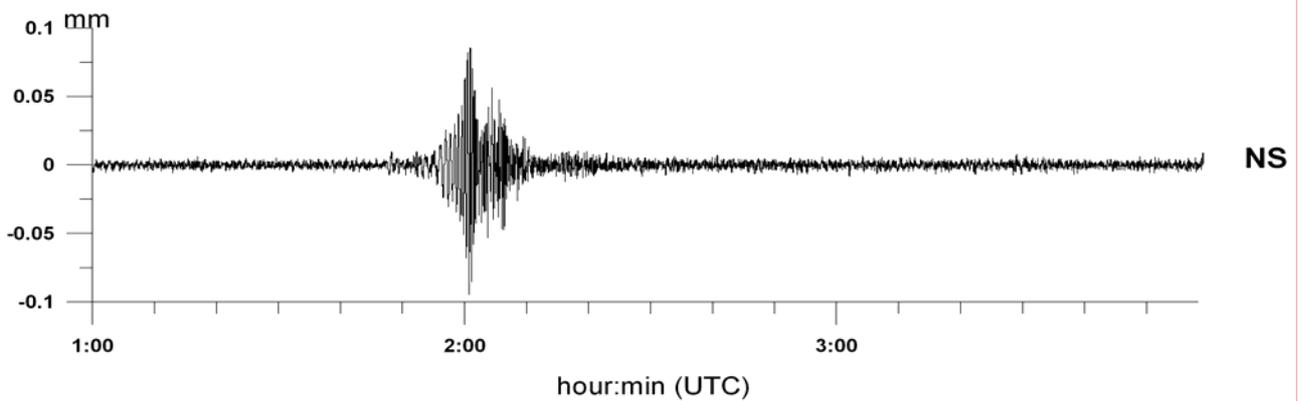
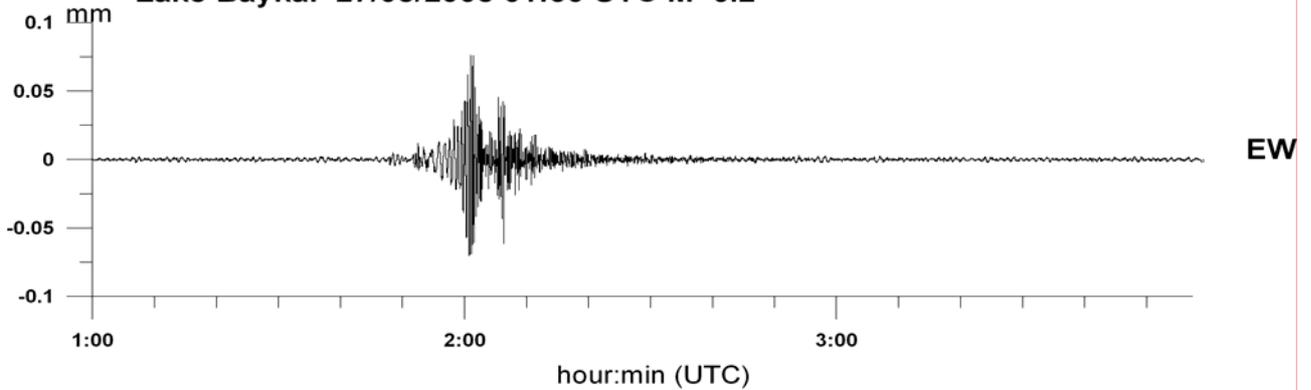
O)

Japan 23/07/2008 15:26 UTC M=6.8



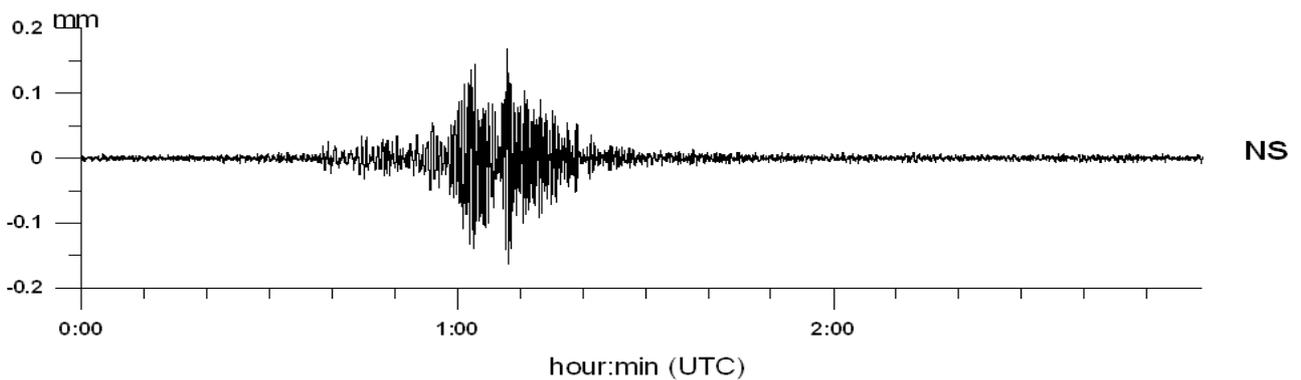
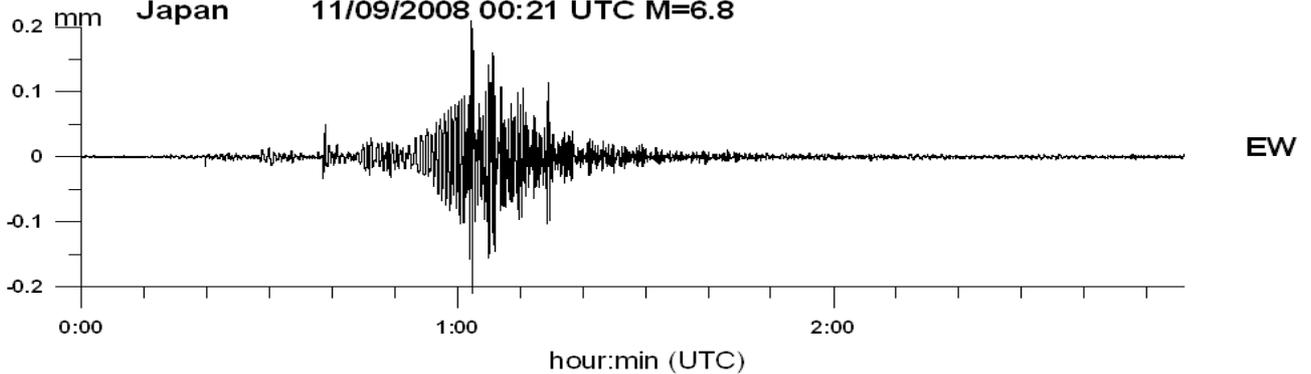
P)

Lake Baykal 27/08/2008 01:36 UTC M=6.2



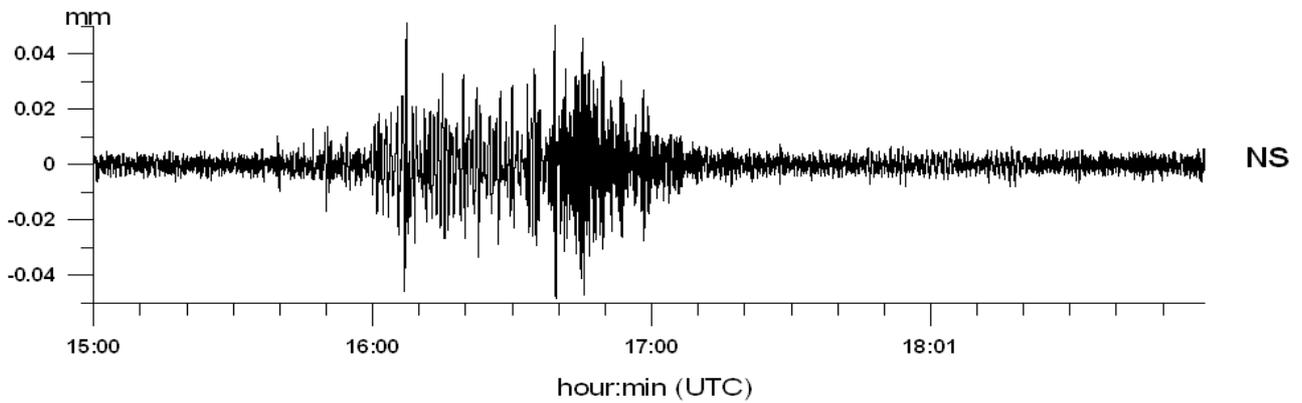
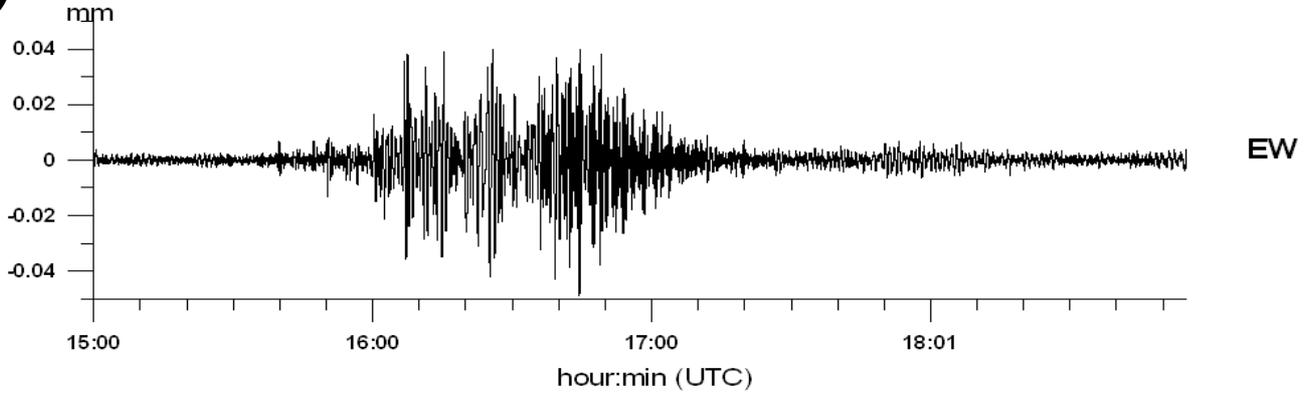
Q)

Indonesia 11/09/2008 00:00 UTC M=6.6
Japan 11/09/2008 00:21 UTC M=6.8



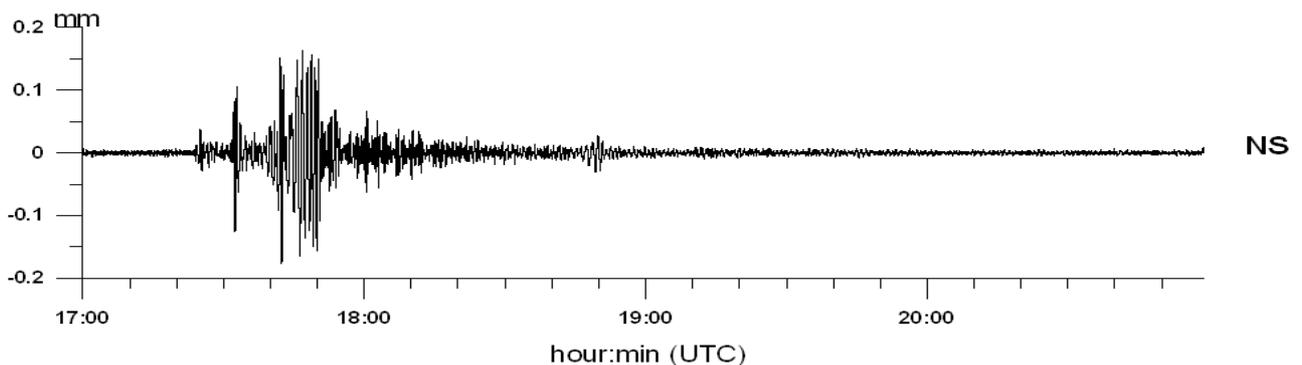
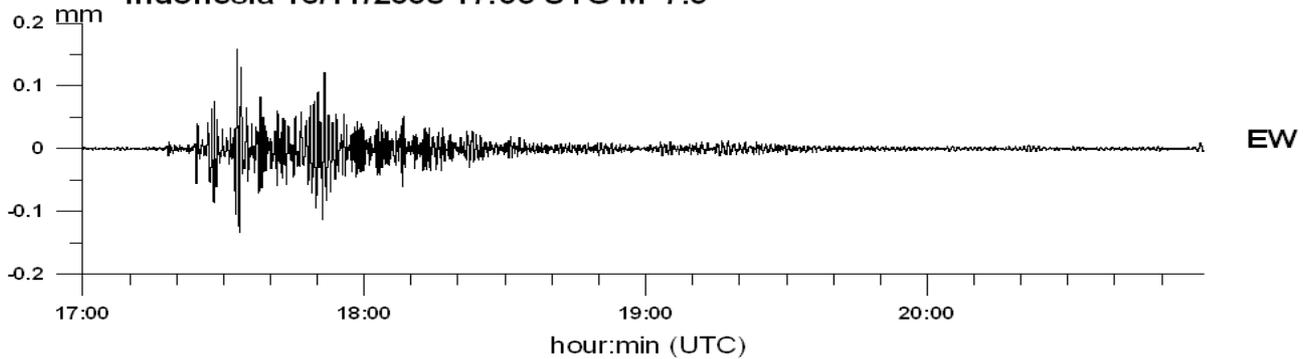
R)

New Zealand 29/09/2008 15:20 UTC M=7.0



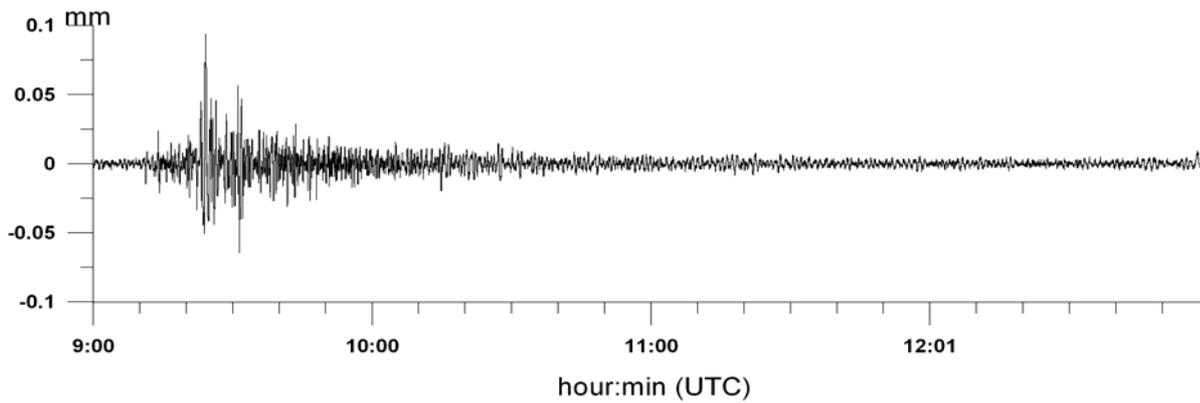
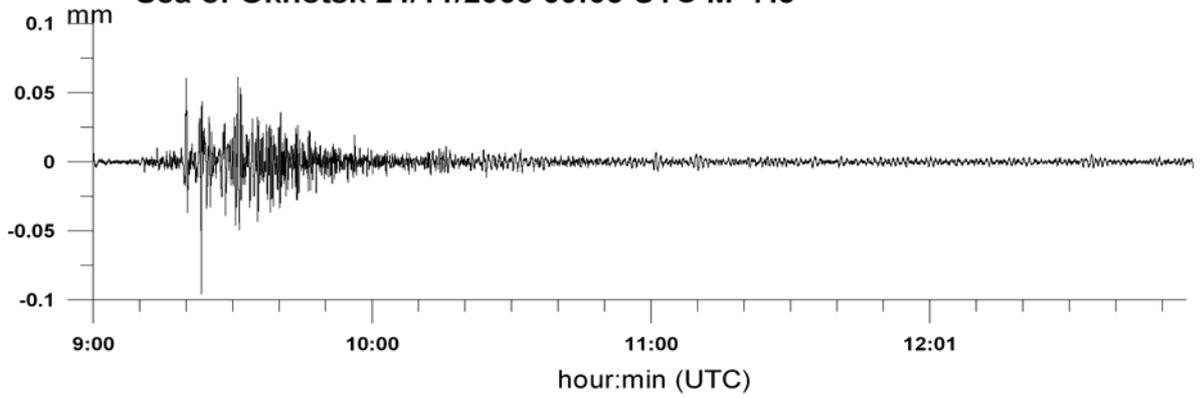
S)

Indonesia 16/11/2008 17:03 UTC M=7.5



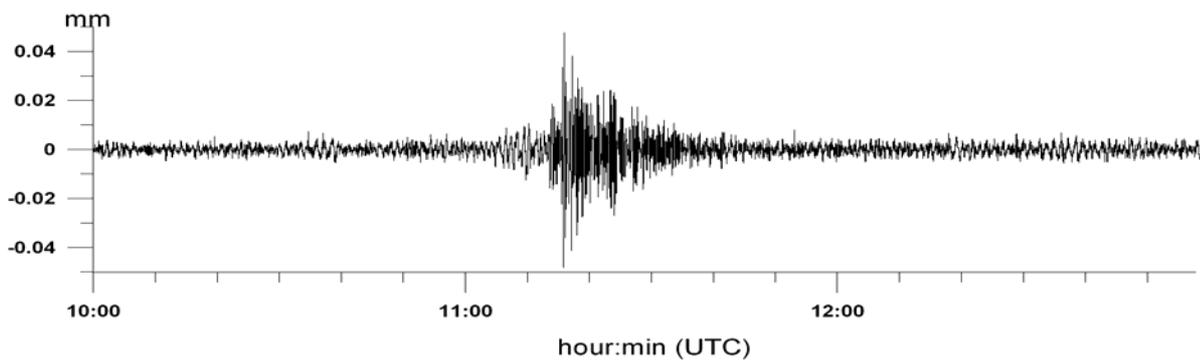
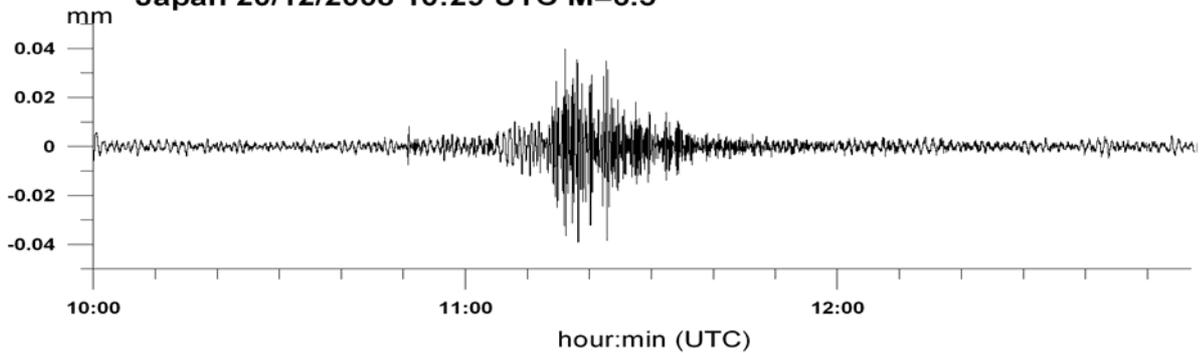
T)

Sea of Okhotsk 24/11/2008 09:03 UTC M=7.3



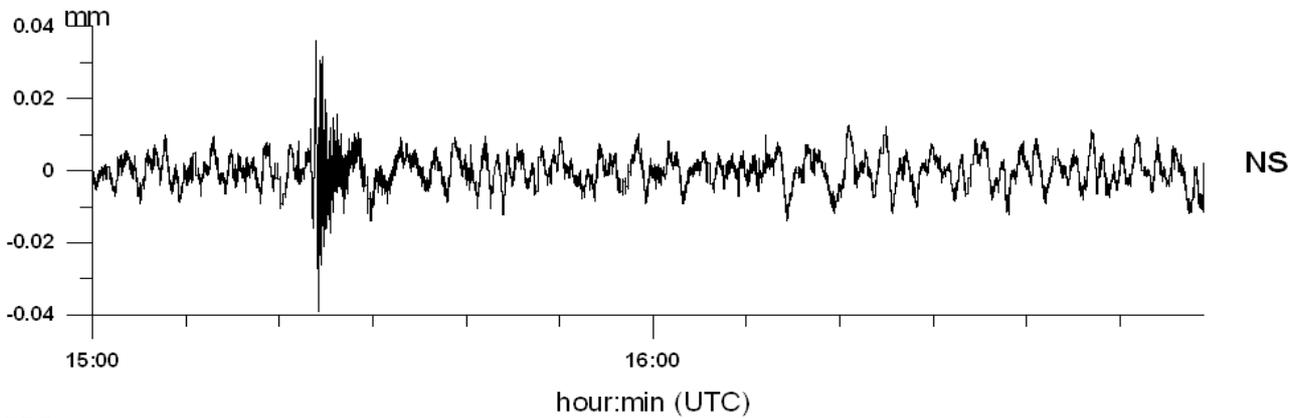
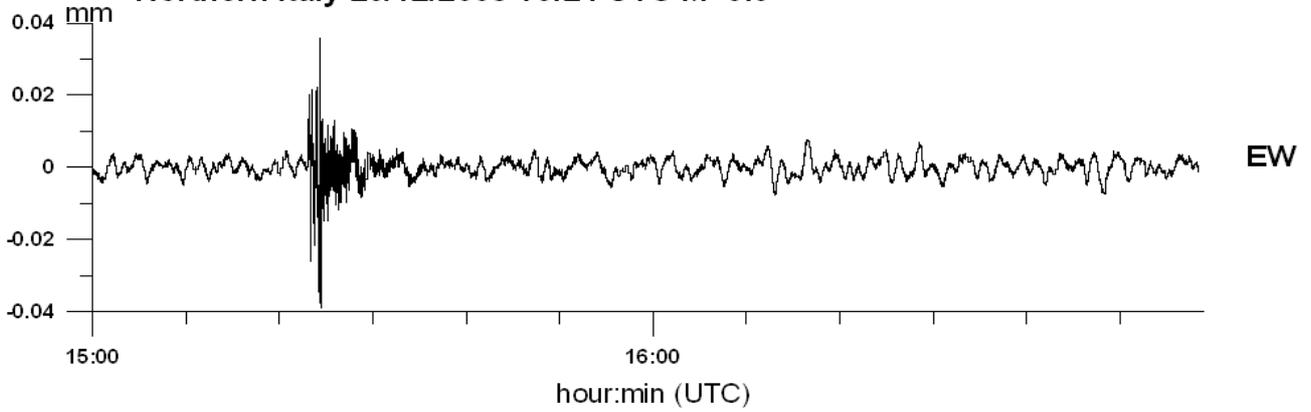
U)

Japan 20/12/2008 10:29 UTC M=6.5



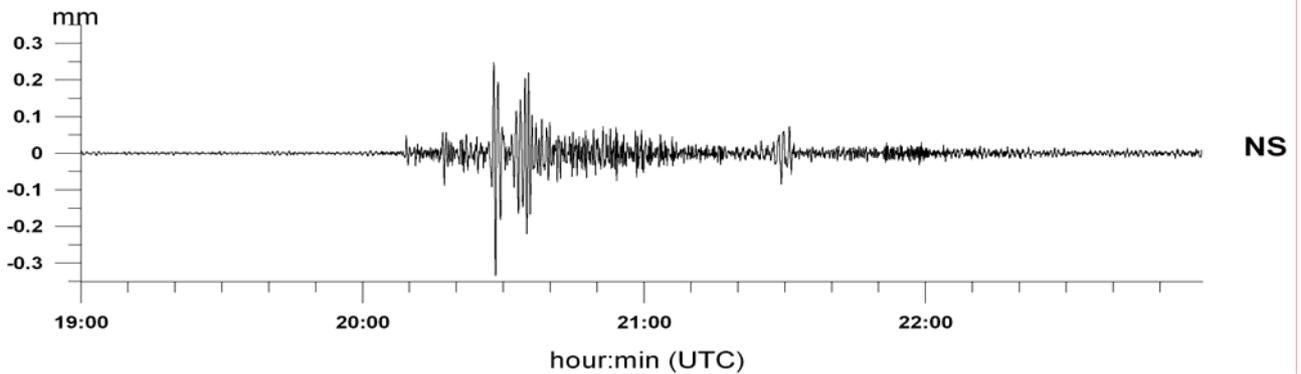
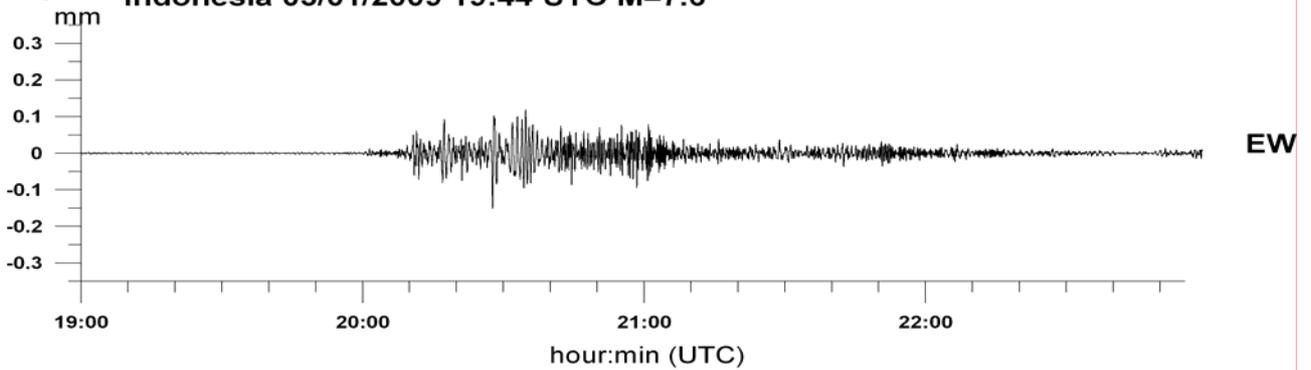
V)

Northern Italy 23/12/2008 15:24 UTC M=5.3



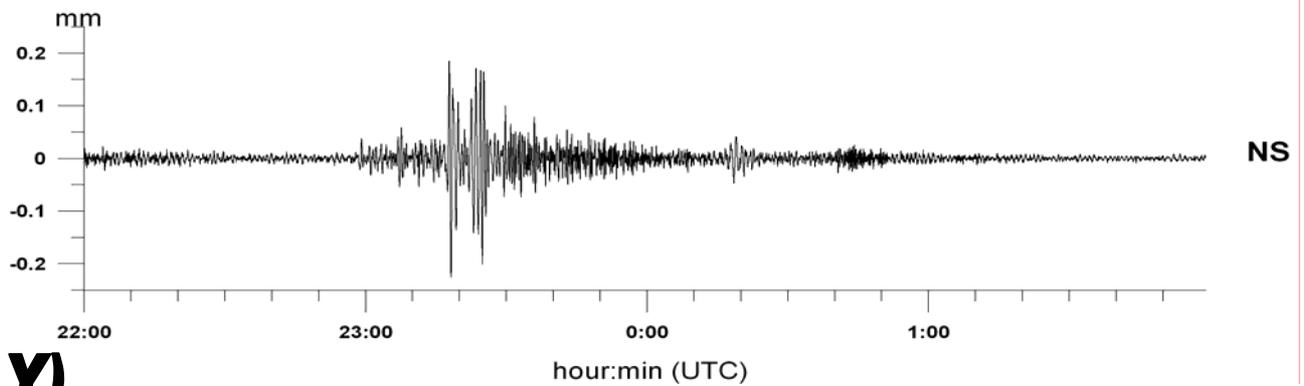
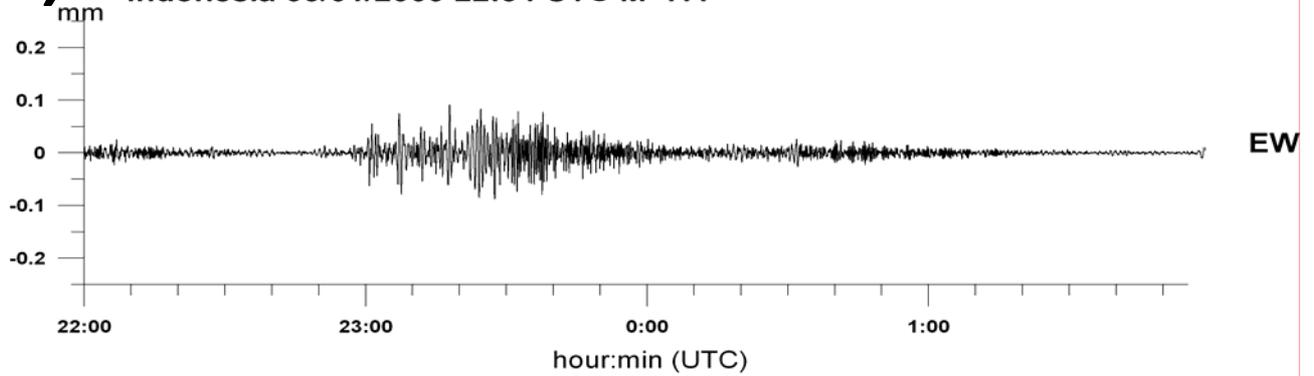
W)

Indonesia 03/01/2009 19:44 UTC M=7.6



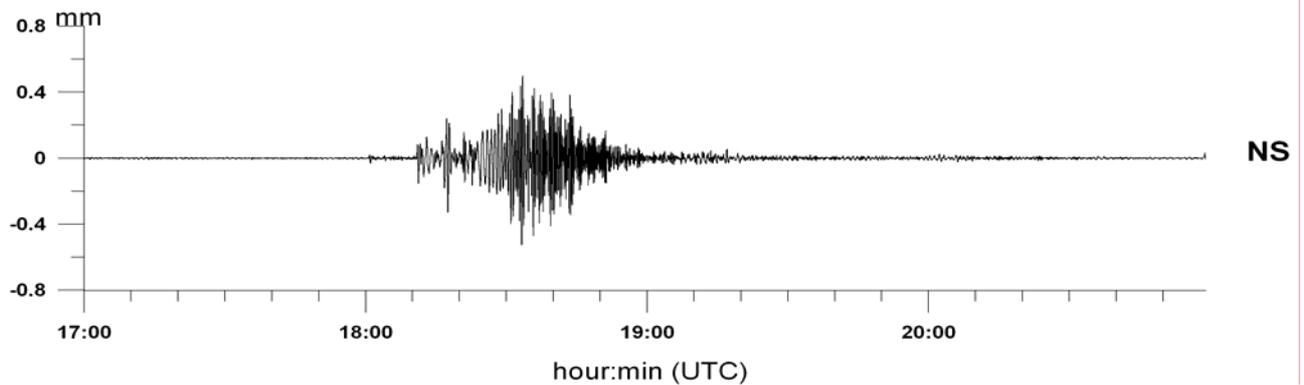
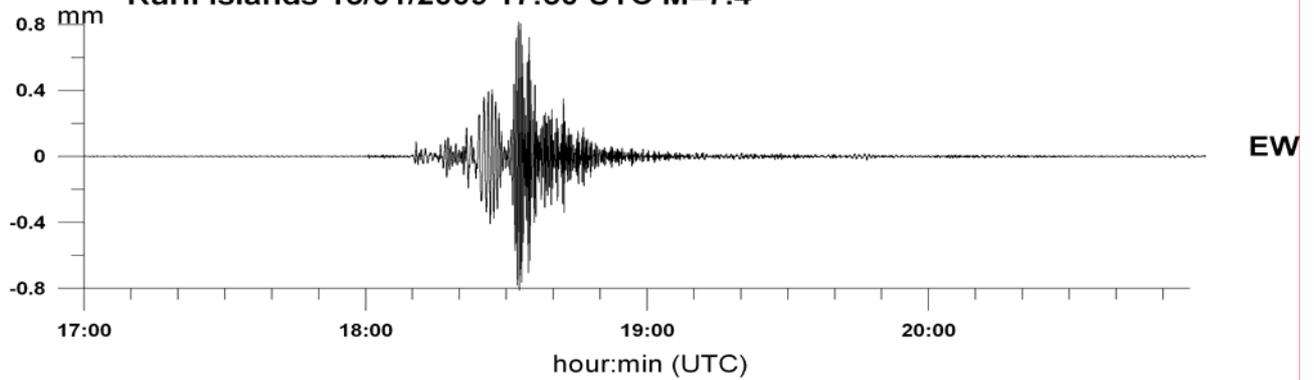
X)

Indonesia 03/01/2009 22:34 UTC M=7.4



Y)

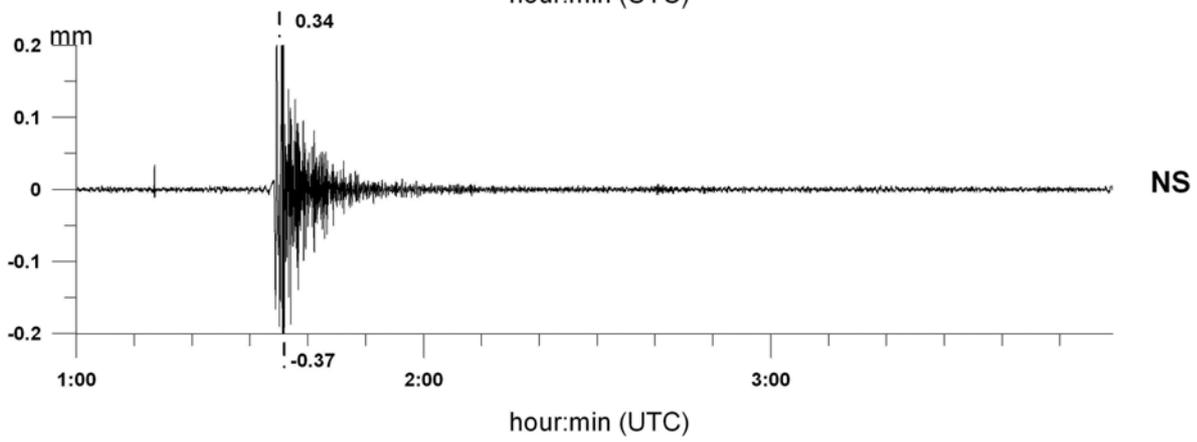
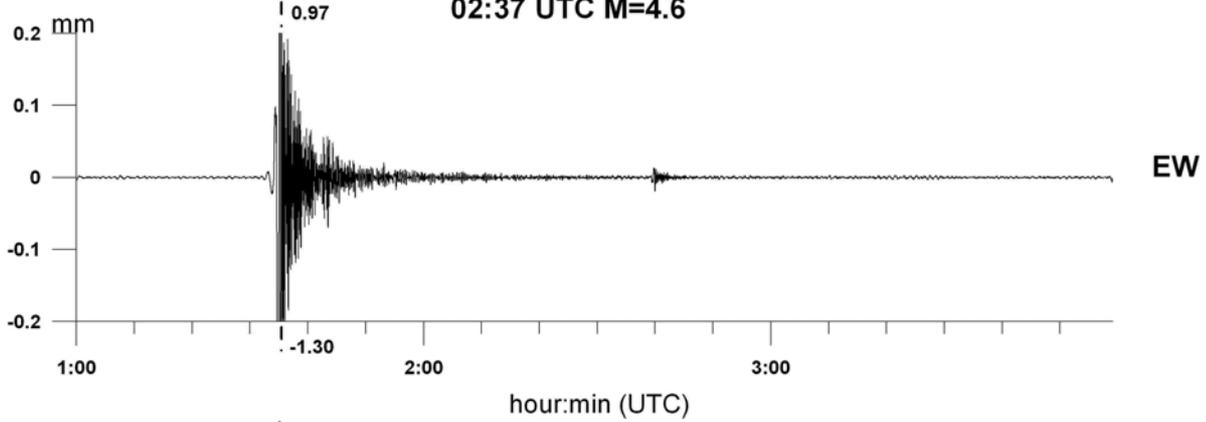
Kuril Islands 15/01/2009 17:50 UTC M=7.4



Z)

Central Italy 06/04/2009 01:33 UTC M=6.4

02:37 UTC M=4.6



5. DEFORMAZIONI INDOTTE DA FLUSSI IDRICI SOTTERRANEI NEL CARSO TRIESTINO

(Tesi di Laurea Triennale, Daniele Tenze, Corso di laurea in Sc. Geologiche, Università di Trieste, Relatore Carla Braitenberg)

5.1. INTRODUZIONE

L'oggetto principale di questo lavoro è la comprensione delle relazioni fra le acque sotterranee del Carso triestino ed il segnale clinometrico registrato dai pendoli della Grotta Gigante. L'inclinazione della verticale rilevata dai pendoli è il risultato di una serie di fenomeni di natura molto diversa .

Gli studi eseguiti su oltre quarant'anni di registrazione clinometrica hanno portato a distinguere questi fenomeni ed a stimarne in parte, l'entità della loro influenza. Al segnale tettonico principale si sommano componenti subalterne dovute alla marea terrestre ed al carico di marea marina, effetti termoelastici, di carico atmosferico e l'effetto delle acque sotterranee.

Il presente lavoro è finalizzato a studiare in dettaglio l'effetto di queste ultime allo scopo di poter caratterizzare il segnale da loro prodotto. In particolare, le acque prese in considerazione sono quelle che alimentano il reticolo idrogeologico sotterraneo del fiume Timavo.

La tesi si propone quindi di analizzare le relazioni tra le variazioni del livello dell'acqua registrate in una grotta nei pressi di Trebiciano, sull'altopiano carsico, dove il Timavo si mostra per un breve tratto, ed il segnale clinometrico dei pendoli ubicati nella Grotta Gigante a circa 6 chilometri di distanza.

5.2. Inquadramento geografico e geomorfologico del Carso triestino

L'area interessata dallo studio è il Carso triestino, parte italiana del Carso classico. Il Carso classico copre un superficie di 900 Km² circa che si estende a SE dell'Isonzo fino a Postumia. Nella nostra zona sono presenti in gran numero tutte le forme carsiche epigee ed ipogee conosciute, a tal punto da aver fatto dell'area il simbolo universale delle fenomenologie carsiche. Nel settore del Carso italiano, che si estende su circa 200 Km², sono conosciute più di 3.500 (vedi Fig.1) cavità alcune delle quali con notevoli sviluppi (www.catastogrotte.it). Inoltre sul territorio si contano un'ottantina di doline con dimensioni più ampie di 100 metri ed i campi solcati hanno uno sviluppo complessivo di alcune decine di Km².

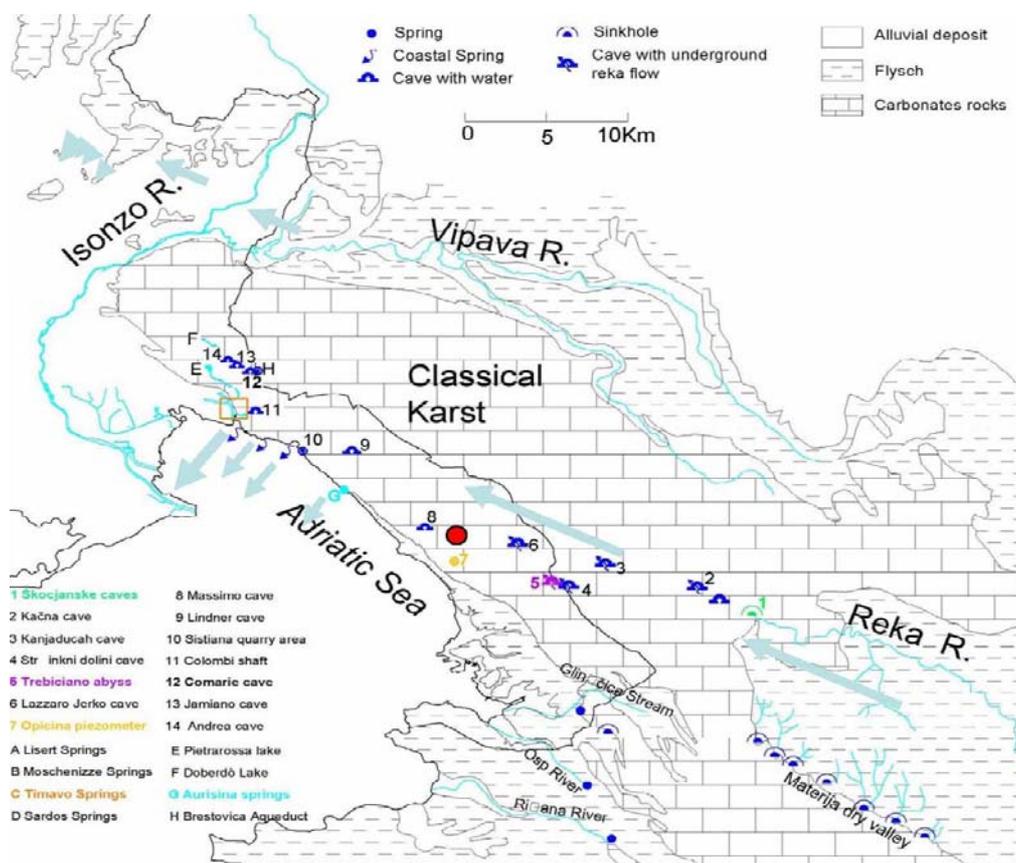


Fig.1- L'area oggetto dello studio: Il Carso. Le frecce azzurre rappresentano l'andamento delle acque sotterranee del Carso Triestino. In rosso è segnata la Grotta Gigante.

Dal punto di vista strutturale l'unità morfocarsica appartiene alla piattaforma carbonatica carsico - friulana, propaggine settentrionale della placca Adria. L'intera piattaforma è costituita da una potente successione carbonatica triassica alla base, sovrastata da un'altra in facies di flysch, entrambe disposte ad anticlinale debolmente asimmetrica con asse NW-SE ovvero dinarica (Carulli & Cucchi, 1991). Il fianco occidentale dell'anticlinale si affaccia sul golfo di Trieste determinando il margine dell'altopiano: nelle zone di Duino e Monte Grisa i termini carbonatici sono da molto inclinati a sub verticali e rovesciati, mentre all'interno dell'altopiano (dove tra l'altro sono ubicate la Grotta Gigante e l'Abisso di Trebiciano) presentano inclinazioni tra i 10° e 30° verso SW (vedi Fig.2). Il Flysch ha invece un assetto più complicato dal momento che si presenta in successione stratigrafica solo in certe zone alle spalle di Trieste, per il resto il contatto e la stratificazione sono mascherati dall'antropizzazione. Il particolare assetto strutturale è il risultato dell'azione di un sistema di faglie inverse a direttrice dinarica situate nel golfo di Trieste ed in prossimità della costa parallele alla medesima. Questo sistema di faglie a basso angolo, immergenti verso NE, disloca le unità carbonatiche facendole sovrascorrere sulla successione torbiditica. Il sistema è complicato anche da un'altra serie di faglie sinistre con direzione antidinarica, SW-NE che a loro volta trasla tratti delle faglie dinariche verso SW (Carulli & Cucchi 1991).

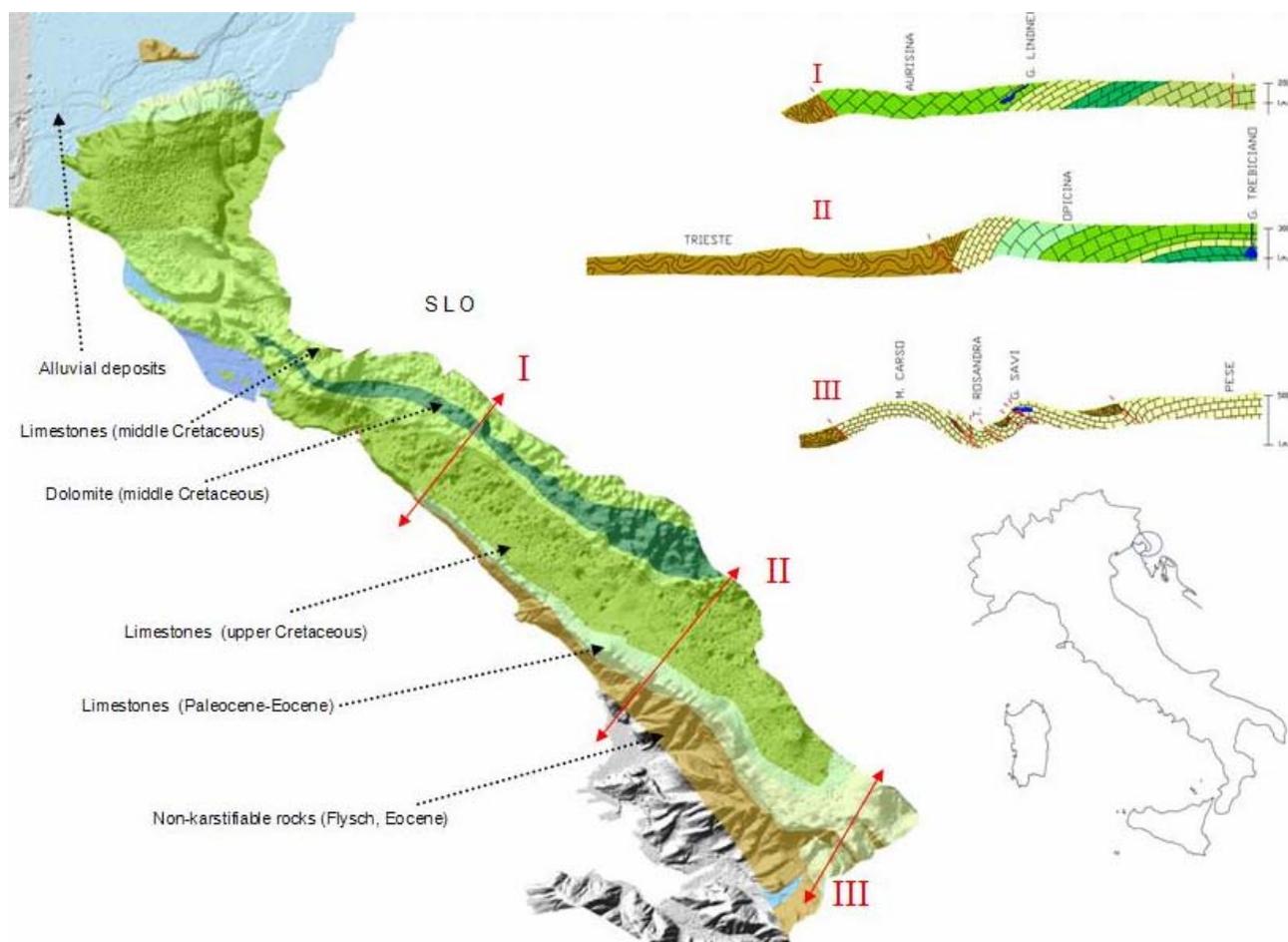


Fig.2- Geologia e sezioni geologiche del carso Triestino (Cucchi et al. 2007).

All'interno del Carso Classico si è sviluppato il reticolo articolato del Timavo ipogeo con numerose vie di drenaggio preferenziali e con frequenti variazioni di direzione dei deflussi principali.

5.3 Il Timavo

Come anticipato in premessa, oggetto di questo studio sono le variazioni di livello del fiume Timavo che nasce con il nome sloveno di “Reka” al confine fra Slovenia e Croazia sulle pendici del monte M. Dletvo. Dopo aver percorso 40 chilometri su terreni torbiditici silico - clastici si inabissa nell'area di San Canziano, in un maestoso complesso di gallerie sotterranee chiamate Skocjanske Jame, in territorio sloveno. Il successivo percorso resta ignoto; solo in alcuni punti, all'interno di grotte conosciute ed accessibili, è possibile rivedere, per brevi tratti, le sue acque (vedi Fig. 3). In particolare il Timavo viene rilevato nei seguenti luoghi:

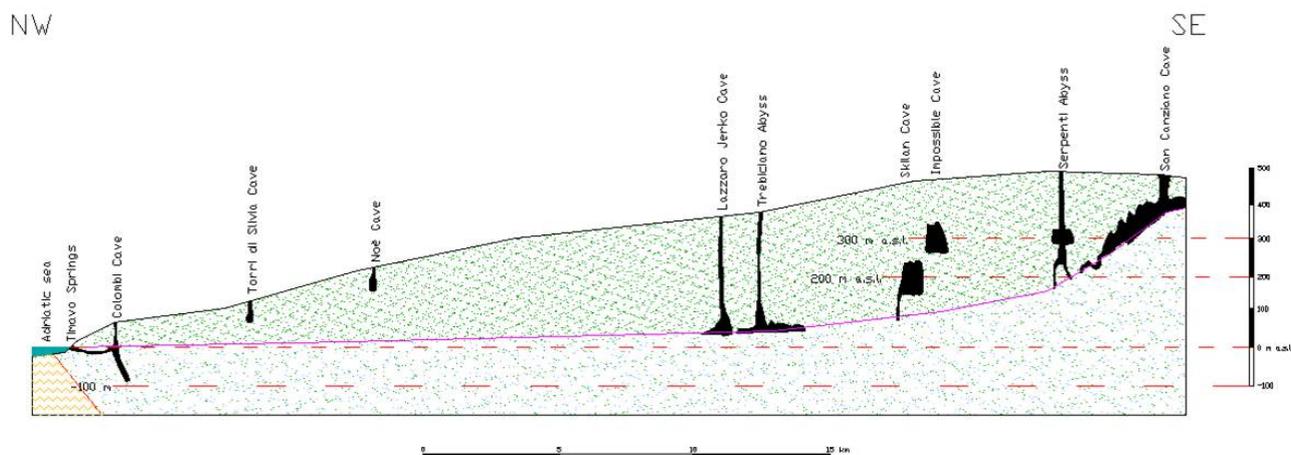


Figura 3. Sezione NW SE del corso ipogeo del Timavo: da San Canziano alle sorgenti nel Golfo di Panzano (Cucchi et al. 2007).

- Sei chilometri più a valle sul fondo dell'Abisso dei Serpenti (Kacna Jama ancora in Slovenia),
- Circa undici chilometri più a valle compare nella grotta di Kanjaduce "Jama Kanjaducah" e nella "Brezno v Stršinkni dolini" presso l'abitato di Sežana poco lontano dal confine italiano (di recente scoperta e non visibili in figura 3),
- Quindici chilometri più avanti in direzione NW nell'abisso di Trebiciano (in Italia),
- dopo altri quattro chilometri, ancora verso valle, compare per l'ultima volta in grotta: in una galleria sul fondo della "Grotta Meravigliosa di Lazzaro Jerko" (in Italia),
- Durante le fasi di piena le sue acque si riconoscono, inoltre, in allagamenti del fondo di alcune cavità nel Carso triestino.
- Infine il Timavo sfocia in mare nel golfo di Panzano (in Italia) a 33 km di distanza dalle grotte di San Canziano.

Il percorso del Timavo dovrebbe avere indicativamente una lunghezza di 70-80 chilometri con un tempo di percorrenza di circa due giorni. Il tragitto è caratterizzato da frequenti variazioni di deflusso; basti pensare che sul fondo dell'Abisso di Trebiciano le acque vanno da Sud a Nord e sul fondo della Grotta Meravigliosa di Lazzaro Jerko da Est verso Ovest (vedi Fig.4), ed il tempo di percorrenza in piena tra i due abissi suddetti è contenuto tra le 20 e le 4 ore con un valore medio di 8 ore (Cucchi ,et al. 2001).

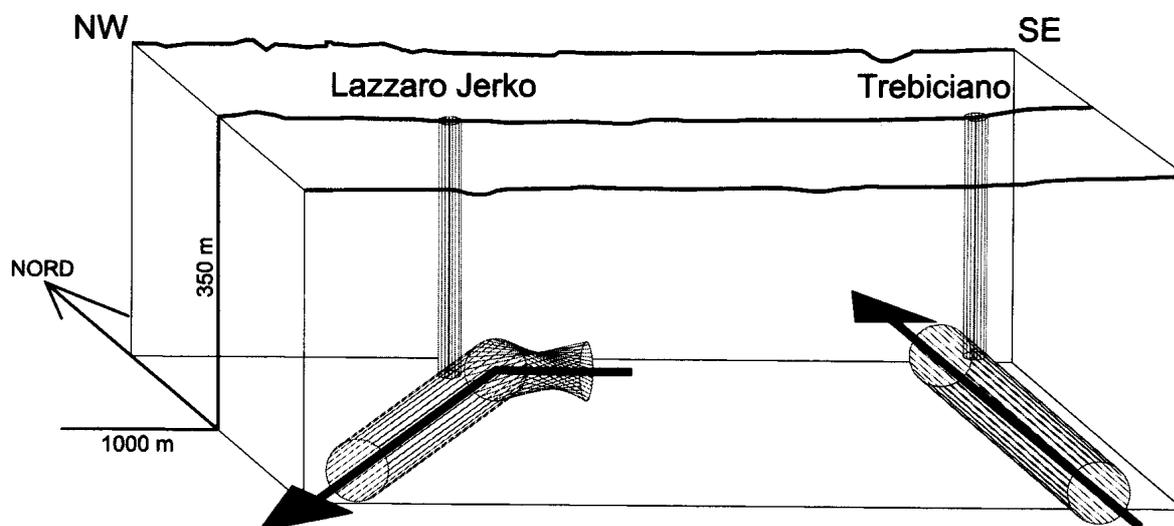


Figura 4. La figura rappresenta le direzioni del Timavo rilevate sul fondo della Grotta Meravigliosa di Lazzaro Jerko e sul fondo dell'Abisso di Trebiciano (Cucchi et al. 2001).

Importanti considerazioni sulla natura di questo corso d'acqua sono state proposte dallo studio condotto nei due abissi in cui appare il Timavo nel Carso triestino ovvero l'abisso di Trebiciano e la "Grotta Meravigliosa di Lazzaro Jerko". Questi studi evidenziano una corrispondenza tra le precipitazioni esterne e l'altezza delle acque; l'inizio delle piene trova sempre corrispondenza in avvenute precipitazioni esterne e l'entità della piena sembra essere proporzionale all'intensità ed alla durata della precipitazione. Si è notato che eventi più intensi, precipitazioni forti concentrate in un breve arco temporale, provocano un'innalzamento maggiore di quelli più prolungati anche se di entità pluviometrica minore o uguale. In particolare il livello massimo viene raggiunto nell'arco di un giorno dall'inizio dell'innalzamento della piena mentre sono necessari dai tre a sette giorni per tornare a livelli normali. Certe precipitazioni tuttavia, non hanno causato innalzamenti significativi. Il fenomeno può trovare spiegazione considerando eventi piovosi locali che sono andati a caricare solo alcuni rami del sistema. La sostanziale coincidenza tra i tempi di inizio e di fine picco ha spinto ad ipotizzare una trasmissione diretta tra i due rilevamenti: quindi una circolazione per pressione, con drenaggio diretto ed a pieno carico, probabilmente anche profondo, con pochi ed importanti condotti carsici completamente allagati. Secondo gli stessi autori (Cucchi, et al. 2001), il sistema è influenzato dalla presenza di due tipi di acque: quelle a mobilità maggiore, residenti nei condotti carsici e quelle a mobilità minore, residenti nei reticoli di discontinuità meno allagati, che rimangono a regime lento e laminare anche con l'aumento del carico idraulico.

5.3.1 L'Abisso di Trebiciano

L'Abisso di Trebiciano, detto anche Grotta di Trebiciano (17 VG il numero di Catasto della Venezia Giulia) è conosciuto fin dal 1841 (Fig.5). Insieme alla "Grotta Meravigliosa di Lazzaro Jerko", i due siti sono gli unici in Italia in cui sono rilevabili tratti di corsi d'acqua facenti parte del reticolo idrogeologico del Timavo. Dal 1974 la grotta è gestita dalla Società Adriatica di Speleologia che si occupa della manutenzione delle strutture interne e, insieme al Dipartimento di Scienze Geologiche Ambientali e Marine dell'Università di Trieste, anche del funzionamento della Stazione Sperimentale Ipogea di Monitoraggio Ambientale di Trebiciano (S.I.S.M.A.). Questa grotta, oltre ad essere stata per oltre ottant'anni l'abisso più profondo conosciuto al mondo è stata

l'oggetto preminente di un'ingente mole di studi scientifici inerenti i diversi campi in cui si articola la Speleologia. L' interesse è senza dubbio derivato dal fatto che la grotta, intercettando il fiume Timavo lungo il suo corso sotterraneo, poteva rappresentare, al momento della scoperta, la definitiva soluzione al grave problema dell'approvvigionamento idrico per la città di Trieste. Per questo motivo la grotta fu attrezzata fin dai primi anni con scale fisse di discesa (all'epoca in legno), per poter accedere in breve tempo al Timavo (www.sastrieste.it).

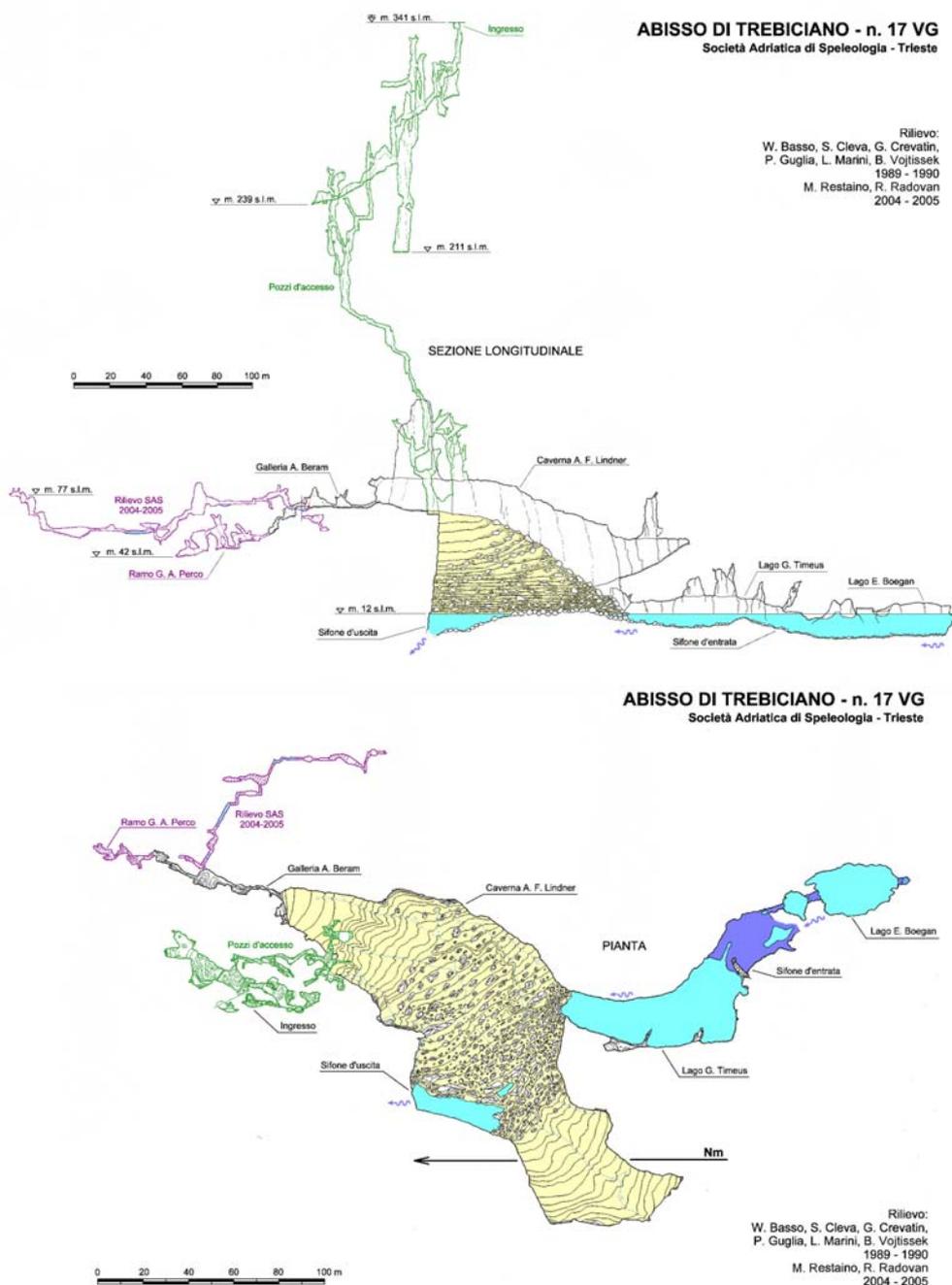


Figura 5. Sezione e pianta dell'Abisso di Trebiciano (www.sastrieste.it)

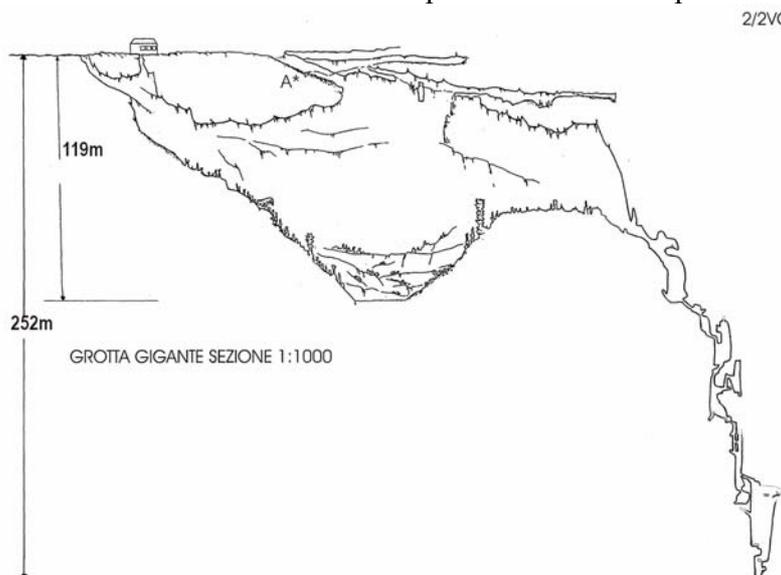
L'accesso all'abisso è situato sul fianco di una dolina nei pressi dell'abitato di Trebiciano, al centro dell' altopiano carsico triestino a 341 metri s.l.m. La cavità ha uno sviluppo planimetrico di 706

metri e si sviluppa inizialmente in verticale, attraverso un serie di pozzi che dopo 270 metri circa dal piano campagna consentono l'ingresso nella Caverna Lindner. Sul fondo della caverna, alla profondità di 329 metri dal p.c. è cioè a 12 metri sul livello medio del mare, due sifoni, uno d'entrata e uno d'uscita mostrano quella che è stata chiamata finestra del Timavo ovvero un tratto di circa 200 metri in cui le acque del fiume sotterraneo scorrono da NNW verso SSE (Forti, et al. 1978). In prossimità del sifone d'uscita sono installati degli strumenti per la misura del livello dell'acqua, temperatura e conducibilità. I prototipi per il rilievo dei livelli d'acqua, temperatura e conducibilità sono stati posizionati nella Caverna Lindner a Trebiciano nel luglio del 1994; nel tempo sono state realizzate diverse versioni sempre più capaci e sicure (Crevatin, et al. 1999). I primi strumenti utilizzati per il monitoraggio dei livelli erano auto costruiti (Crevatin et al, 1997) costituiti da una sonda di livello abbinata ad una sonda di temperatura. Fino al 2002 la misurazione del livello era affidata a due sonde: una con intervalli da 0 a 10 e l'altra da 0 a 30 metri e campionamento: - ogni 20 minuti dal 16 febbraio 2000 e ogni 2 ore dal 21 febbraio 2000.

Nel 2002 è stata installata una sonda di tipo CTD-Diver che misura l'altezza della colonna d'acqua dai valori di pressione tramite un sensore piezoresistivo collegato ad un data-logger interno, con interfaccia ad infrarossi per lo scarico dei dati su personal computer; la precisione nominale fornita da questi strumenti è dell'ordine del centimetro. (CTD-Diver operating instructions, 2006). Questa sonda, in grado di rilevare anche la temperatura e la conducibilità, è in funzione dal 2003, dopo un periodo di confronto con le vecchie strumentazioni. La quota a cui sono posizionati gli strumenti è di 11.7 m s.l.m. corrispondente all'incirca al livello in magra del fiume.

5.3.2 La Grotta Gigante

Scoperta da Antonio Federico Lindner nel 1840 (2VG il numero di Catasto della Venezia Giulia). E' una delle più importanti cavità turistiche italiane, costituita da una vastissima sala a cui si accede da una galleria molto inclinata (Fig.6). Il fondo si trova a 151 metri s.l.m., ha dimensione di 160m. x 65m. La volta ha un'altezza massima di 107 metri per un volume complessivo di 600.000 m³.



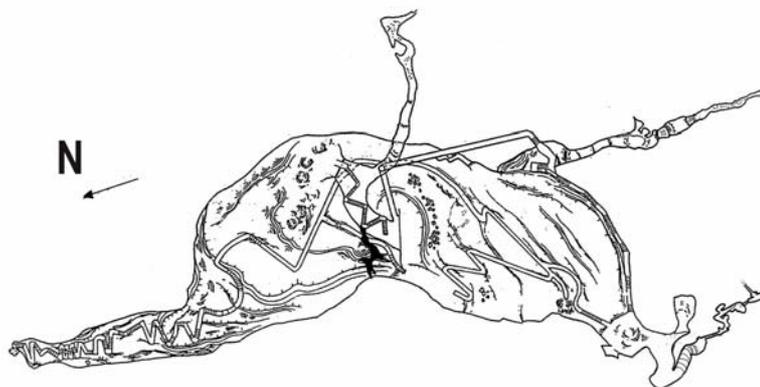


Figura 6. Sezione e pianta della Grotta Gigante (www.catastogrotte.it)

Dimensioni particolari che le hanno conferito nel 1995 un posto nel Guinness dei primati come caverna turistica più grande del mondo; questa caratteristica ed il facile accesso alla cavità hanno consentito l'installazione sul fondo di una stazione geofisico geodetica descritta di seguito.

5.4 La stazione Geofisica ipogea della Grotta Gigante

La strumentazione scientifica della Grotta Gigante comprende il sismografo broadband dell'Istituto di Oceanografia e di Geofisica sperimentale e del Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Trieste che gestisce anche il pendolo orizzontale più grande del mondo installato nella grotta nel 1966. Da tale anno la stazione geodetica ipogea fornisce una serie storica continua di misure di deformazione crostale. Il segnale registrato comprende le deformazioni lente, le onde sismiche, le oscillazioni libere, ma anche i movimenti dovuti a cause esterne quali maree marine dell'Adriatico, variazioni di pressione atmosferica e di temperatura, maree terrestri ed infine gli eventi su cui la tesi vuole indagare: le piene del fiume Timavo.

Gli strumenti usati per questo studio sono una coppia di clinometri ed una coppia di pendoli orizzontali che misurano la deviazione dalla verticale, entrambi meglio descritti più avanti. I due tipi di strumenti si distinguono essenzialmente per le dimensioni e la costruzione e sono:

- una coppia di clinometri tradizionali delle dimensioni verticali di 0.5 m circa
- una coppia di pendoli orizzontali che hanno una lunghezza di 100 m e sfruttano tutta la grandezza della cavità.

Di seguito viene illustrata in pianta la disposizione della strumentazione all'interno della casetta posta al fondo della grotta (Fig.7).

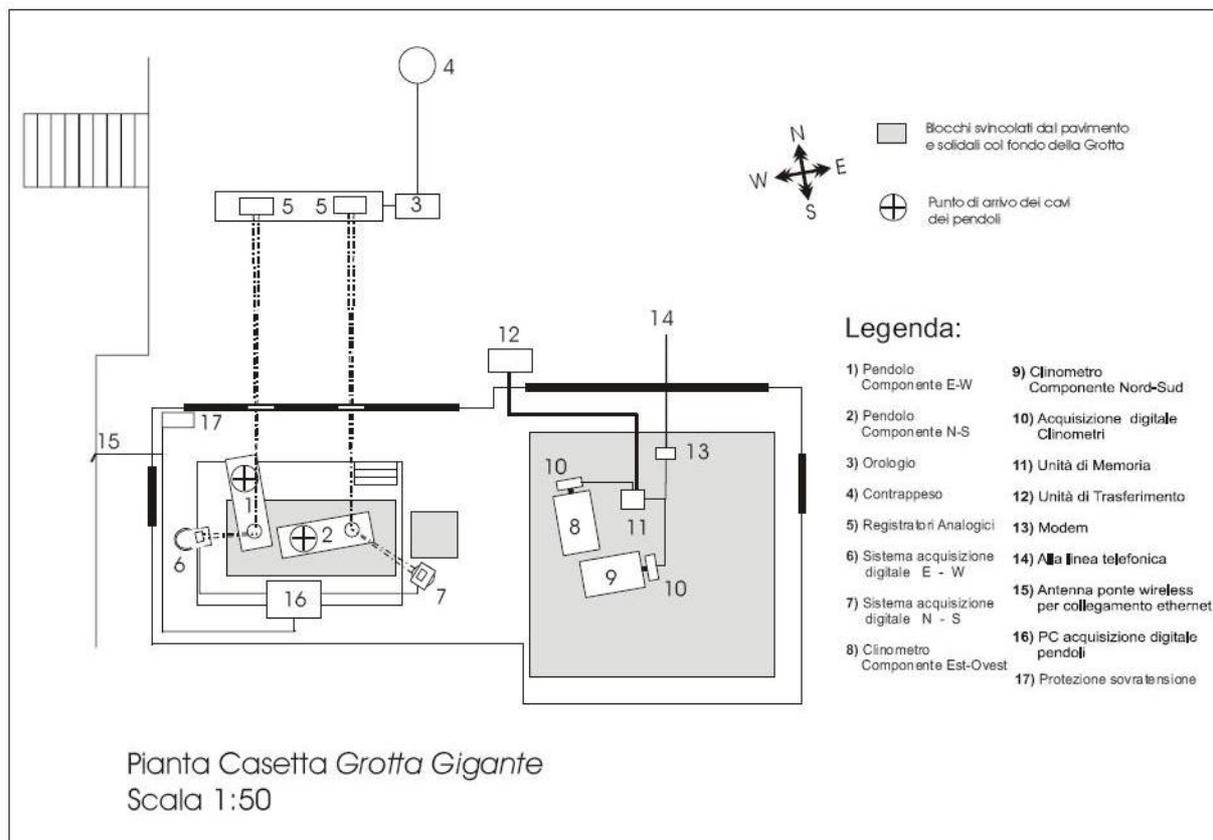


Figura 7. Pianta della stazione geofisica ipogea della Grotta Gigante (Braitenberg et al. 2008)

5.4.1 I Pendoli ed i Clinometri

I Pendoli sono stati installati all'inizio degli anni 60 dal prof. Antonio Marussi (Marussi, 1960) allo scopo di registrare tutte le deformazioni alle quali è sottoposta la grotta. Per le loro grandi dimensioni ed il lungo periodo di attività ininterrotta, i pendoli sono unici al mondo.

I pendoli orizzontali hanno una lunghezza di 100 metri, disposti in modo tale da sfruttare tutta la grandezza della cavità (Fig. 8). Sono strumenti in grado di rilevare lo spostamento relativo orizzontale del punto di attacco superiore del pendolo rispetto al punto di attacco inferiore. Le eccezionali dimensioni conferiscono loro una grande stabilità con un periodo di oscillazione di 6 minuti il che li rende poco sensibili alle sorgenti di rumore e molto sensibili alle deformazioni tettoniche. Oltre ai pendoli, nel 1997, sono stati installati anche una coppia di clinometri tradizionali di dimensioni di 0,5 metri.

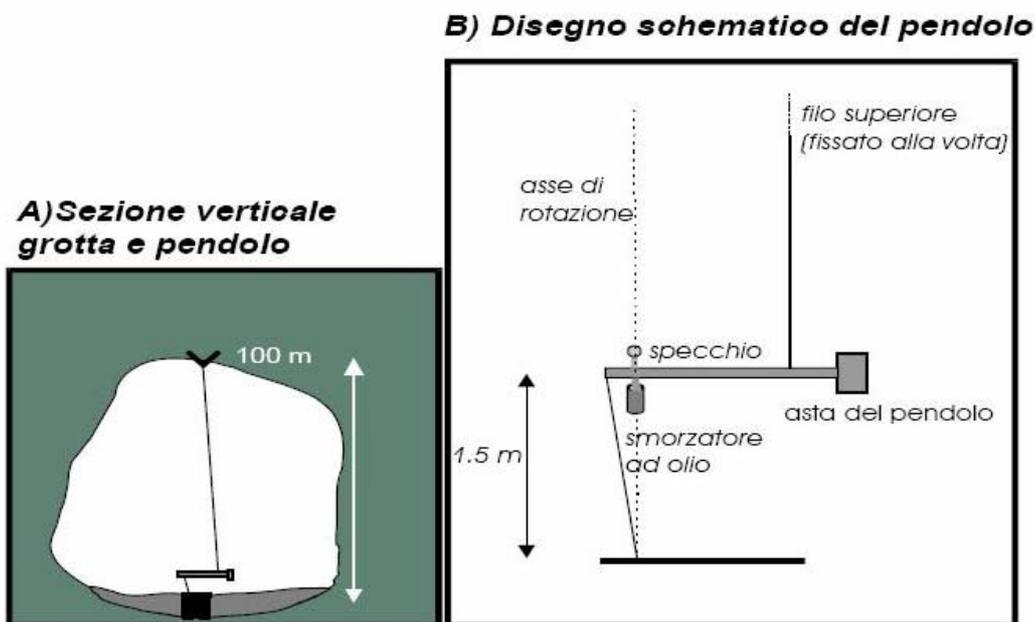


Figura 8. Disposizione dei pendoli nella Grotta Gigante. (Braitenberg et al. 2008)

5.4.2 Principio di funzionamento del Clinometro del tipo Zöllner.

Sia i Pendoli (PEN) che i Clinometri (CLI) sono pendoli a sospensione Zöllner. Il principio di funzionamento viene chiamato “principio della porta da giardino”: la massa del pendolo è disposta su un’asta sospesa orizzontalmente da due fili, uno superiore ed uno inferiore (Fig.8). Questi vincoli consentono all’asta di ruotare nel piano orizzontale attorno ad un’asse di rotazione virtuale che collega il punto di attacco superiore posto sulla volta ed il punto inferiore alla base della grotta. I fenomeni geodetici e quegli ambientali vanno ad agire sull’inclinazione dell’asse di rotazione virtuale. La registrazione viene misurata da un’escursione dell’asta con un angolo di diversi ordini di grandezza maggiore dell’inclinazione dell’asse. L’inclinazione che i pendoli misurano non avviene in una sola direzione ma appare come un percorso bidimensionale. Questo “percorso” viene registrato dai due pendoli, ognuno ne misura una componente nella direzione cardinale. I due pendoli registrano rispettivamente la componente NS ed EW. Il principio di funzionamento dei pendoli (PEN) (Marusssi, 1960) è analogo a quello dei clinometri, però le dimensioni sono decisamente diverse, in quanto i fili di attacco del pendolo sono fissati rispettivamente alla volta e alla base della cavità, sfruttando così tutti i 100 metri disponibili. Una importante considerazione su questi due strumenti riguarda le differenze tra il segnale rilevato dai pendoli PEN e dai clinometri CLI in risposta a deformazioni di taglio della grotta (vedi Fig.9): di seguito sono riportate le due diverse deformazioni:

- la prima deformazione è costituita da una sola rotazione,
- la seconda deformazione è composta da una rotazione ed una deformazione di taglio.

Rotation

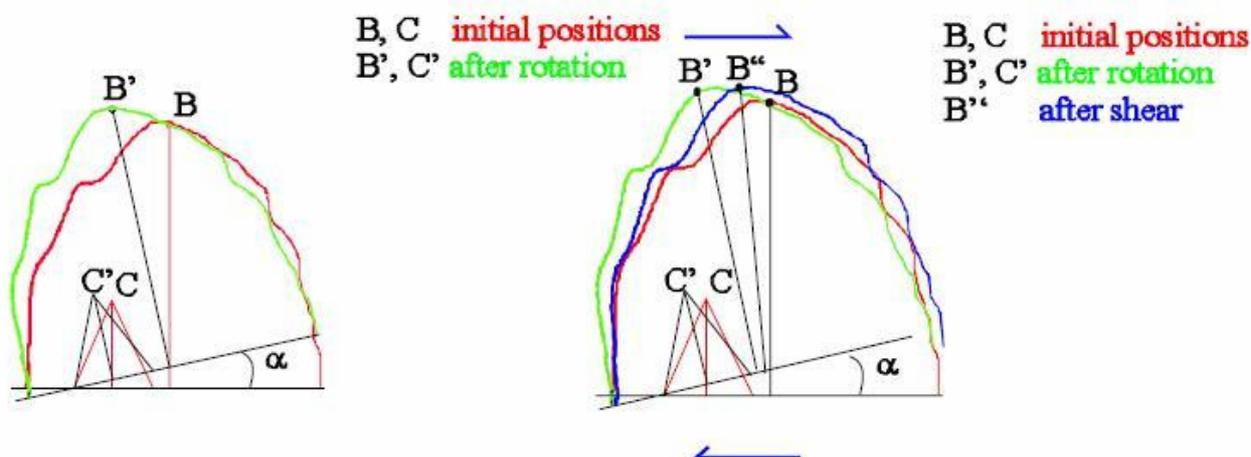


Fig. 9- Illustrazione della differenza osservata dai pendoli PEN e dai clinometri CLI per una rotazione della grotta di angolo α ed una rotazione alla quale si aggiunge una deformazione di taglio. Il segnale rilevato dal clinometro è rappresentato dal triangolo con vertice C (C', C'') e quello rilevato dal pendolo orizzontale dall'asse con vertice B (B', B''). Si può osservare come la deformazione di taglio viene soltanto osservata dal pendolo orizzontale PEN, mentre il clinometro, che poggia sul fondo della grotta, è sordo a tale segnale (Pagot. 2002)

Il clinometro è rappresentato in figura dal triangolo piccolo verde con vertice C mentre l'asse di rotazione del pendolo PEN è rappresentato dalla lettera B. Si può facilmente osservare come i due pendoli reagiscono alle due situazioni in maniera diversa; nel caso di una semplice rotazione i due strumenti daranno lo stesso segnale in uscita rilevato dall'inclinazione del piano su cui sono installati. Mentre nel secondo caso in cui ad una rotazione è associata una deformazione di taglio riconducibile ad un movimento relativo tra la volta e la base della cavità, solo il pendolo PEN risentirà di entrambe le deformazioni essendo fissato alla volta e alla base della cavità mentre i clinometri CLI, essendo vincolati solo alla base, non risentiranno di tale deformazione. Un caso particolare è dato da una deformazione dalla quale si ottiene un'ellisse con asse principale inclinato rispetto alla verticale (Fig. 9.2). In rosso sono rappresentati: un modello di cavità, i pendoli e i clinometri prima della deformazione, mentre in verde sono rappresentati gli stessi elementi dopo la deformazione. Come si può vedere dalla figura questa deformazione orienterebbe i segnali dei pendoli e dei clinometri in maniera opposta. I pendoli registrerebbero uno spostamento della volta verso destra (freccie blu) mentre i clinometri registrerebbero un'inclinazione della base verso sinistra (freccie arancioni).

Un contrasto netto di registrazione tra i due segnali può indicare quindi che la grotta è soggetta a questo tipo di deformazione.

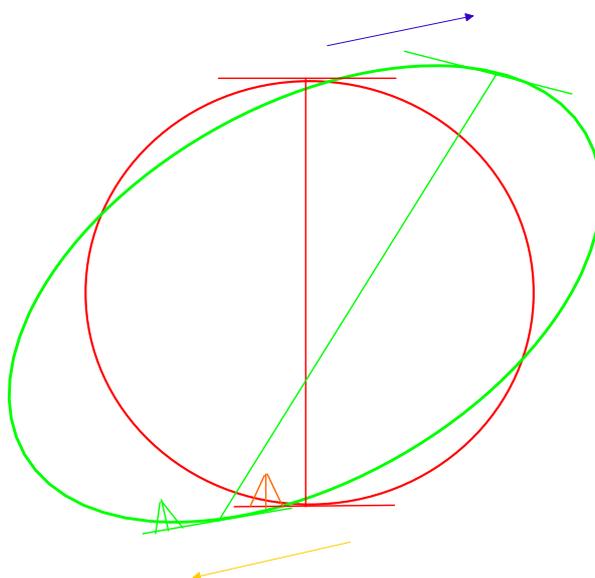


Fig. 9.2 RegISTRAZIONI indotte da una deformazione dalla quale si ottiene un'ellisse con asse principale inclinato.

5.4.3 Acquisizione digitale dei dati

Il 17 dicembre 2003 in collaborazione con il Dott. Gianni Romeo ed il Dott. Quintilio Taccetti dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia di Roma (Romeo, 2000; Braitenberg et al., 2004; Braitenberg & Zadro, 1999) è stato installato un sistema di acquisizione digitale dei dati dei pendoli della Grotta Gigante. Il nuovo apparecchio ha sostituito il vecchio sistema fotografico. Il rilevatore è un dispositivo ottico analogico PSD (Positive Sensitive Detector) ed effettua l'intercettazione di un fascio laser riflesso da uno specchietto montato sull'asta del pendolo. Il meccanismo di funzionamento è estremamente semplice e, sebbene questi strumenti non possiedano l'accuratezza di un sensore CCD (la linearità è pessima alle estremità), la facilità d'uso li rende apprezzabili in molti casi. Il sensore è formato da una lunga giunzione P-N che può essere illuminata attraverso una metallizzazione trasparente. Questo dispositivo ha rivoluzionato lo strumento in quanto permette una campionatura veloce (25 campioni/sec) tipica dei sismografi ed una grandissima risoluzione del segnale rilevato. I dati acquisiti con il sistema digitale vengono registrati su un PC situato nella grotta che consente un collegamento remoto via rete. I dati poi vengono regolarmente controllati e archiviati dal Dipartimento di Scienze della Terra. Dalla fine del 2003 il nuovo strumento digitale è continuamente in funzione. Prima di eliminare l'acquisizione parallela su carta fotografica (nei primi mesi del 2009) si è eseguita la verifica sulla linearità del sistema di acquisizione. A tale scopo sono stati confrontati i dati delle registrazioni per gli anni 2004-2008. È stato calcolato tramite regressione lineare il fattore di conversione da unità digitali all'angolo di inclinazione del pendolo per i movimenti quasi elastici dove la dinamica del pendolo appare trascurabile.

5.4.4 Il segnale clinometrico negli ultimi quarant'anni

Prima di analizzare i dati geodetici per l'interpretazione delle deformazioni crostali, vanno considerati tutti i fattori ambientali che contribuiscono al segnale. Studi (Rerolle et al., 2006; Longuevergne et al., 2009; Fabian, & Kämpel., 2002; Jacob et al., 2008) hanno confermato che fenomeni come la pressione barometrica, la temperatura, il carico delle maree, il peso delle acque sotterranee sono fenomeni molto influenti sugli strumenti. Per questo motivo il database della stazione geodetica comprende anche registrazioni di parametri ambientali.

I grafici successivi (Fig. 10) rappresentano l'andamento delle due componenti del tilting a lungo periodo dei pendoli della Grotta Gigante dal 1966 al 2007. Si nota facilmente un tasso di inclinazione con direzione N57W che deriva di circa 27 nrad/a, rappresentato dalla linea viola che "scende" verso ovest nel primo grafico e "sale" verso nord nel secondo; esso è stato interpretato come la deformazione media dovuta allo scontro fra la placca Adria e la placca Eurasiatica. Si osserva anche un andamento approssimabile ad un'oscillazione con periodo di 33 anni. Il periodo ed il tilting medio a lungo periodo sono stati determinati minimizzando lo scarto quadratico medio delle registrazioni da una funzione costituita dalla somma di un'oscillazione a periodo compreso fra 55 e 25 anni ed una deriva lineare.

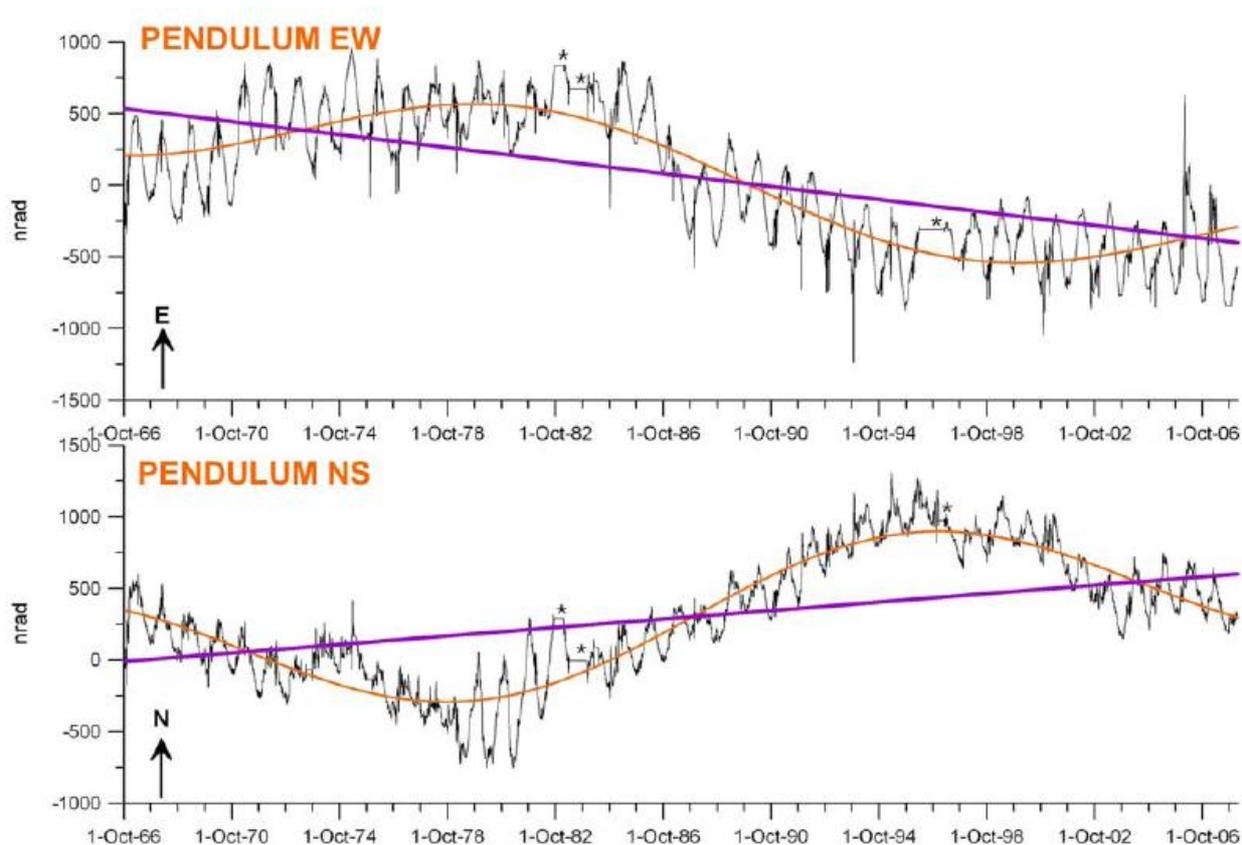


Fig. 10- Rappresentazione della registrazione a lungo periodo delle due componenti NS ed EW dei pendoli PEN della Grotta Gigante dal 13/10/1966 al 15/01/2008 (Braitenberg et al., 2008). Dall'analisi dei dati, effettuata su tutti gli anni, una componente evidente risulta il tilting annuale, confermato anche dall'analisi spettrale. Osservando il segnale nella Fig. si evidenzia che le due componenti (NS,EW) sono in fase e il massimo tilting verso N ed E avviene mediamente tra il 4 e 7 ottobre rispettivamente, mentre in direzione opposta verso SW avviene tra il 7 e 10 aprile. Il grafico successivo (Fig.11) rappresenta gli stessi dati solo rappresentati in modo diverso con la componente EW sull'asse x e quella NS sull'asse Y; questa rappresentazione è molto buona e raffigura fedelmente lo spostamento complessivo.

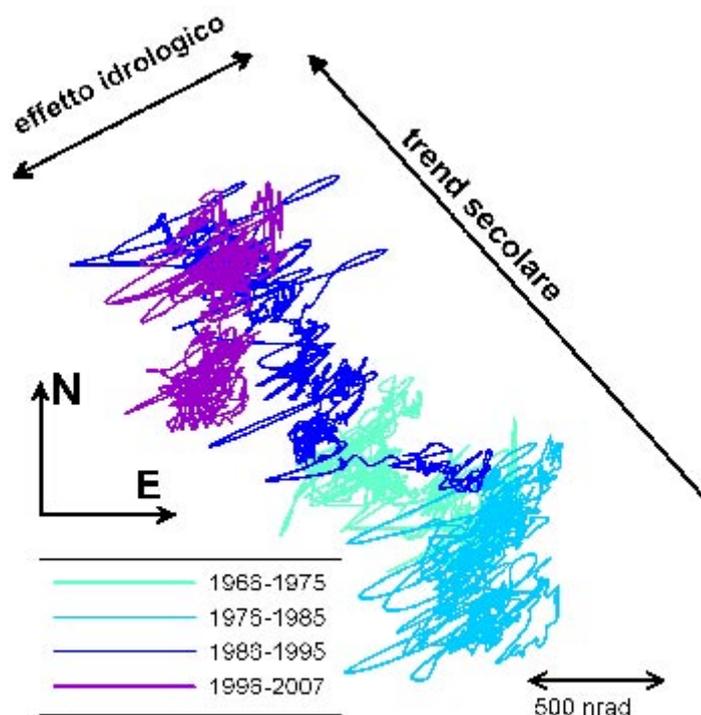


Fig. 11- Inclinazione osservata nella Grotta Gigante (anni 1966-2008). L'inclinazione media ammonta a 27 nrad/a in direzione N57W (Braitenberg et al., 2008).

La causa del segnale annuale non è del tutto chiara. Tra i fattori innescanti si potrebbe menzionare la temperatura, il carico variabile dell'Adriatico e lo scarico delle acque del fiume Timavo. Sovrapposti al segnale annuale ed all'oscillazione con periodo di 33 anni si osservano segnali di breve periodo, di forma anche impulsiva che devono essere considerati uno per uno. Anche questi, in alcuni casi, sono attribuibili a piene eccezionali del fiume Timavo. L'immagine successiva (Fig.12) rappresenta il Carso triestino tratta da un'immagine di Google Earth (www.googleearth.com) e le frecce indicano l'andamento opposto nei due periodi dell'anno.

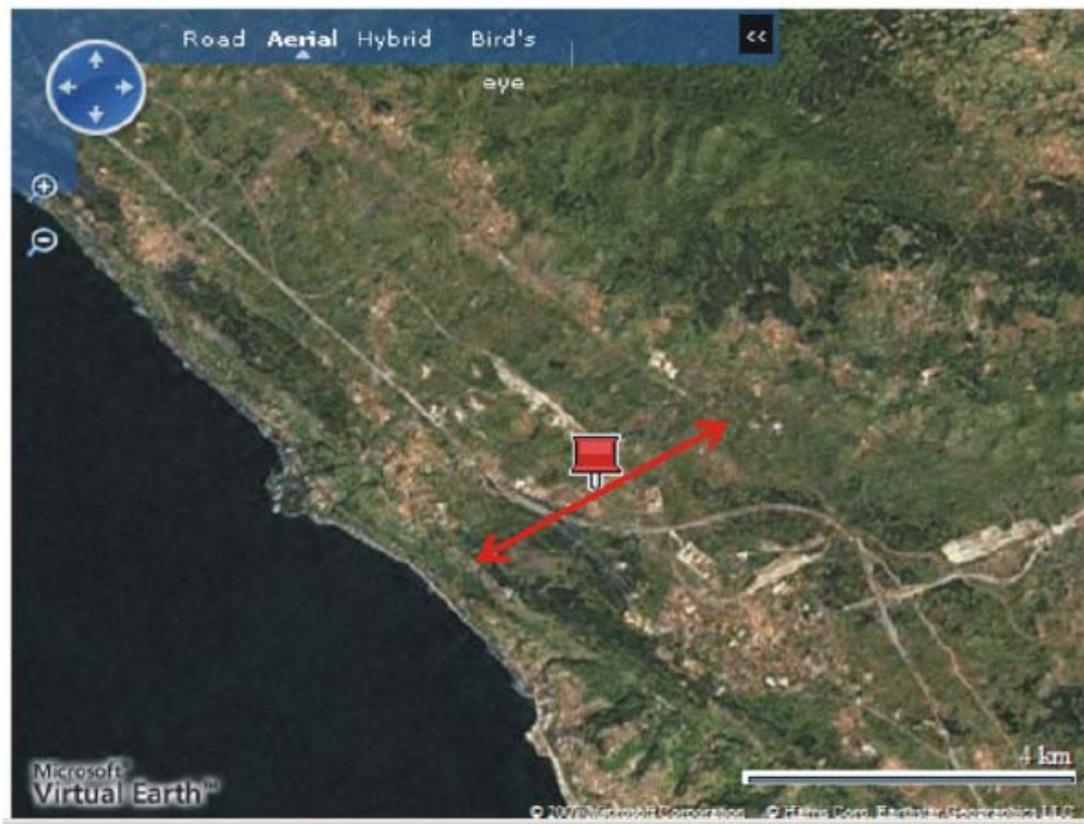


Fig. 12 -Fotografia aerea dell’altopiano carsico. Il simbolo rosso indica la posizione della stazione della Grotta Gigante. Le frecce rosse indicano la direzionalità del tilting annuale. (Braitenberg et al., 2008)

La stazione, essendo vicina all’Adriatico, risente anche degli effetti di marea. Gli effetti di marea sono dovuti sia all’effetto dell’attrazione gravitazionale sulle acque marine, sia alla deformazione determinata dalla variazione di carico. Infatti la crosta terrestre subisce una flessione elastica anche per un aumento del carico superficiale a seguito dell’aumento del livello marino.

5.4 Presentazione, elaborazione ed analisi del segnale idrologico sui pendoli

Nella precedente parte, introduttiva, sono state evidenziate le caratteristiche del Carso, la natura del Timavo, l’Abisso di Trebiciano e la Grotta Gigante, la Stazione Geofisica in essa contenuta ed i segnali forniti dai pendoli e dai clinometri.

In questo capitolo invece si illustra come i segnali che si volevano mettere in relazione: idrologico, clinometrico e dei pendoli, sono stati acquisiti e poi elaborati, per rendere confrontabili i dati e stimare le entità delle relazioni fra essi. Siccome i tre database forniti: (idrologico, clinometrico e dei pendoli) sono caratterizzati da periodi di inizio e fine diversi, la finestra di dati studiata resta contenuta fra il 21 giugno 1999 ed il 16 ottobre 2008 perché in tale periodo tutti e tre i sistemi contengono i dati necessari al presente lavoro.

5.4.1 Presentazione dei dati idrologici

I dati idrologici del livello del fiume Timavo nell’Abisso di Trebiciano sono stati forniti dal Dipartimento di Scienze Geologiche Ambientali e Marine. Nel periodo studiato (21/06/1999 – 16/10/2008) nel data base idrologico sono stati riscontrati alcuni momenti privi di dati a causa di problemi tecnici e di manutenzione delle sonde. In tali periodi (riepilogati in Appendice Tab.2) i

dati idrologici mancanti sono stati surrogati mantenendo l'ultima lettura disponibile rilevata prima dell'interruzione; ciò al fine del corretto funzionamento dei programmi informatici utilizzati.

Le sonde, installate per studi idrogeologici, campionano numerosi valori ogni giorno, per cui nel periodo (21/06/1999 – 16/10/2008) hanno fornito una gran mole di dati. Essendo però questo studio finalizzato allo studio del segnale ideologico dei pendoli su un arco temporale molto lungo (quasi dieci anni), per rendere meglio gestibile il database si è reputato utile ricampionare la sequenza con un unico valore per ogni giorno, ottenuto mediando i numerosi dati disponibili nell'arco della giornata.

I valori del livello registrati nell'abisso di Trebiciano nei primi dieci anni di rilevazione erano riferiti alla quota dello strumento e corrispondevano quindi a valori di variazione relativi. Dal 2004 i dati sono riferiti al livello medio del mare. Sommando la quota di 11,7 metri, corrispondente al livello di magra, alla serie di dati precedenti al 2004, si è uniformato l'intero database in valori assoluti sul livello medio del mare.

Nella figura successiva (Fig. 13) sono riportati i valori di livello del fiume Timavo, sul fondo dell'Abisso di Trebiciano.

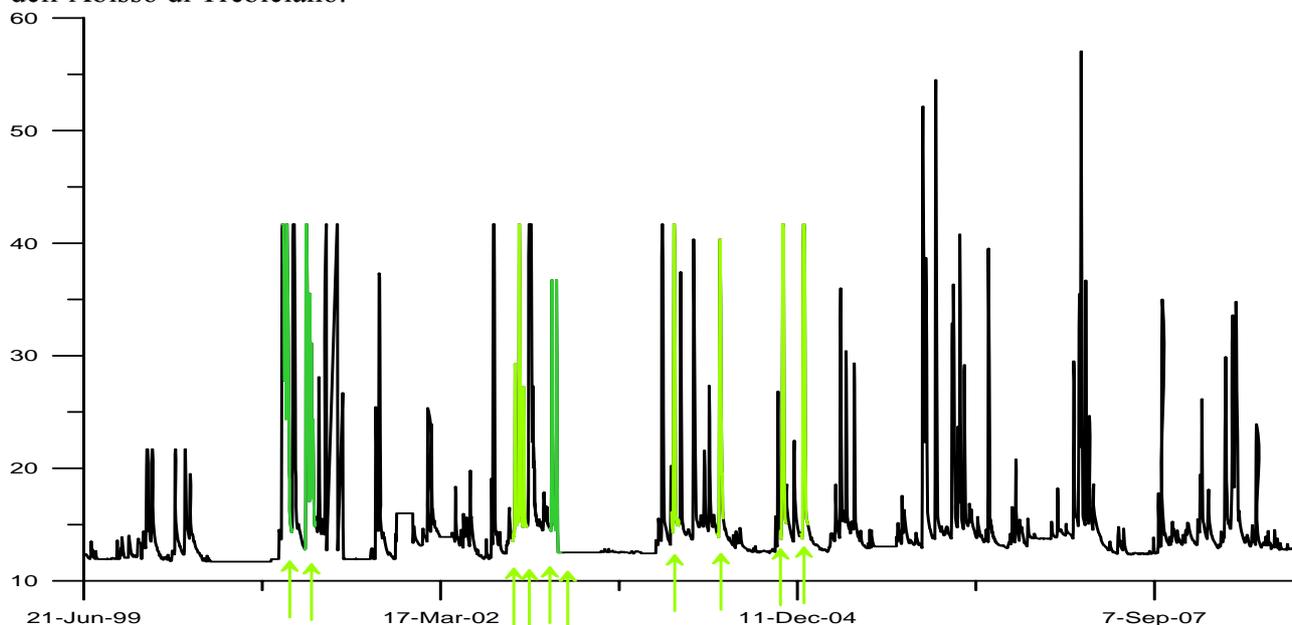


Fig.13- Oscillazioni del livello del fiume Timavo misurate nell'Abisso di Trebiciano dal 21 giugno 1999 al 16 ottobre 2008. I valori sono limitati a un valore di saturazione di 41,17 m. per gli anni precedenti al 2005.

Per tutti i picchi (corrispondenti ad eventi di piena) sono stati analizzati i giorni prossimi ad ogni singola piena (prima e dopo) ed è stato eseguito un confronto con il segnale clinometrico e quello del pendolo per stimarne la relazione. E' possibile vedere dal grafico che molti eventi di piena saturano a un valore di 41,7 metri, rappresentante l'intervallo di campionamento delle sonde di trenta metri più gli 11,7 metri della quota a cui è installato lo strumento. Nella figura sono evidenziati con delle frecce gli eventi di piena che hanno dato i segnali più evidenti sulle registrazioni dei pendoli. I tratti in verde chiaro rappresentano eventi isolati mentre quelli verde scuro eventi multipli considerati insieme.

5.4.2 Presentazione dei dati clinometrici

I dati dei pendoli e dei clinometri della Grotta Gigante sono stati forniti dal Dipartimento di Scienze della Terra. Anche in questo caso il campionamento dei dati era più fitto (orario) di quello necessario, quindi si è ridotto il campionamento riportandolo a valori giornalieri, mediandone i

valori . Sono stati presi i dati giornalieri relativi alla finestra (21/06/1999-16/10/2008) e ad essi è stata applicata una serie di operazioni (descritte in seguito), per togliere le componenti dei segnali che interferivano con la ricerca.

Si è fatto riferimento ai giorni delle piene maggiori e si è osservato il segnale nei giorni attigui, in particolare si evidenziano gli eventi sotto indicati, caratterizzati da una migliore resa e pulizia del segnale registrato. Dalle prime analisi è emerso che il clinometro forniva risposte meno caratteristiche agli eventi di piena, per cui si è proseguito focalizzando attenzione sui segnali del pendolo.

5.4.3 Elaborazione dati dei pendoli e dei clinometri della Grotta Gigante

Al fine di isolare i segnali dovuti alle piene del Timavo dalle altre componenti del segnale clinometrico e dei pendoli, sono state applicate una serie di operazioni di elaborazione del segnale. Di seguito si riportano le operazioni e gli effetti visibili sui grafici. Le evoluzioni dei segnali, dei clinometri e dei pendoli, sono visibili nelle prossime figure (Fig.14-17).

Nella figura 14 sono riportate le diverse fasi del trattamento di dati per una componente (NS) del pendolo, a cui si è fatto riferimento per la spiegazione delle operazioni applicate, mentre nelle figure successive (Fig.15-17) sono rappresentati gli stessi passaggi sulla componente EW del pendolo e sulle due componenti del clinometro. Nei dati forniti inizialmente (Fig.14-A) sono ben visibili la componente annuale e la componente a lungo periodo. Per rimuovere queste componenti, inutili ai fini dello studio, è stata tolta una deriva polinomiale di secondo ordine che ha stabilizzato il segnale e riportato i valori a media zero (Fig.14-B). Essendo ancora presenti componenti di disturbo si sono applicati due filtri. Per eliminare le basse frequenze, con periodi maggiori di 400 giorni, si è applicato un filtro passa banda con i periodi di taglio massimo e minimo rispettivamente di 400 e 3 giorni. Il segnale ottenuto da questo filtraggio è riportato in (Fig.14-C). Essendo ancora presenti le componenti annuali, si è applicato un secondo filtro passa banda con periodi di taglio massimo e minimo rispettivamente di 400 e 300 giorni. La figura ,14-D, riporta la componente annuale rimossa da quest'ultimo filtro. Il segnale finale ripulito e utilizzato per lo studio è riportato in figura 14-E.

Dalle figure 16 e 17 è visibile come, nonostante le operazioni di filtraggio, i segnali finali dei clinometri presentano ancora delle componenti a lungo periodo di durata quasi annuale (Fig. 16 E, Fig.17 E). Tale fenomeno è riconducibile alla minor stabilità di questi strumenti e potrebbe giustificare le risposte meno precise dei loro segnali in seguito agli eventi di piena.

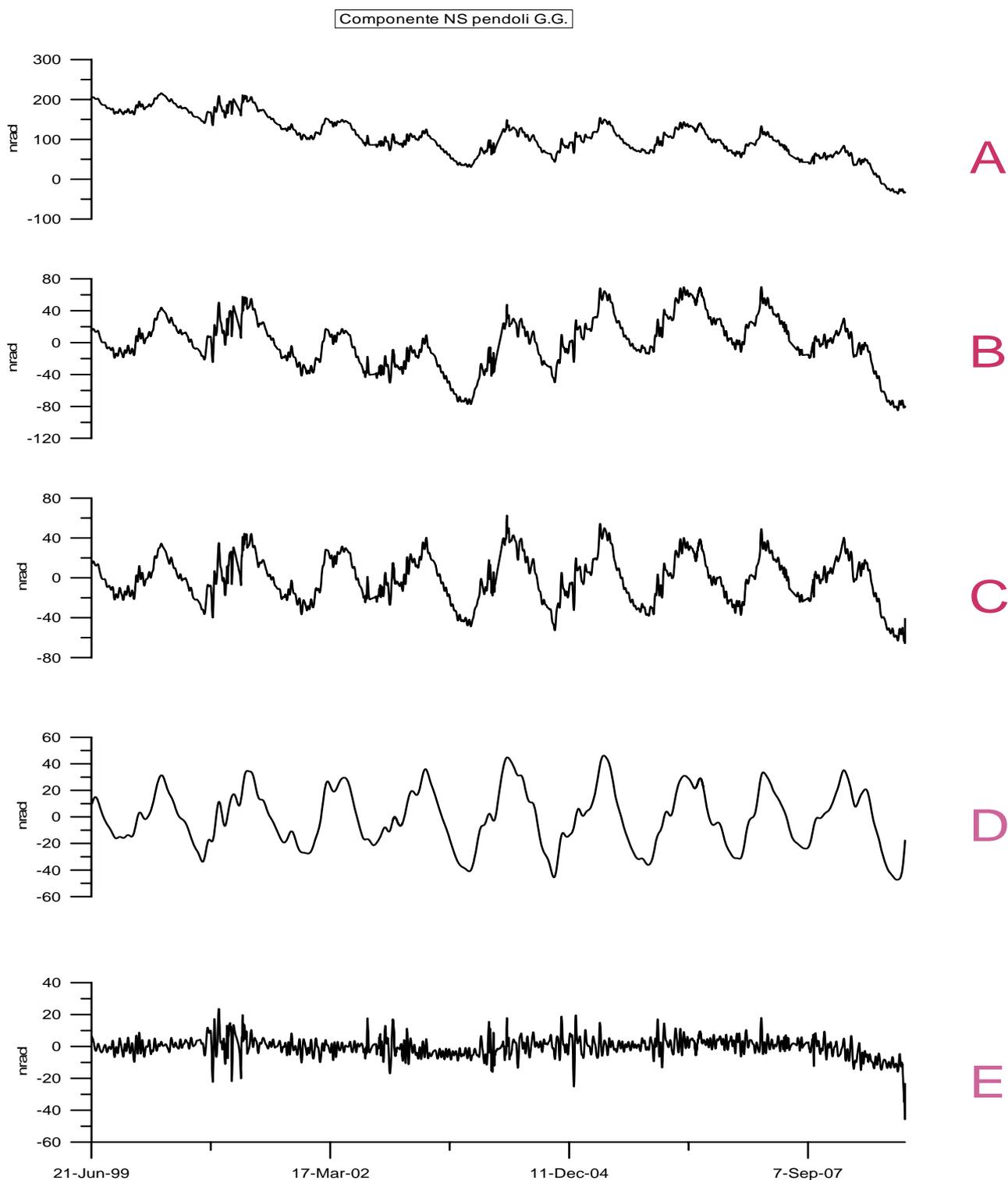


Fig.14-Diverse fasi del trattamento del segnale allo scopo di isolare il segnale idrogeologico. A: registrazione originale; B: dati originali meno una deriva polinomiale. C: un successivo filtraggio con filtro passa alto, per eliminare le frequenze basse (Periodo > 400 d). D: il segnale annuale. E: il segnale utilizzato per le analisi successive.

Componente EW pendoli G.G.

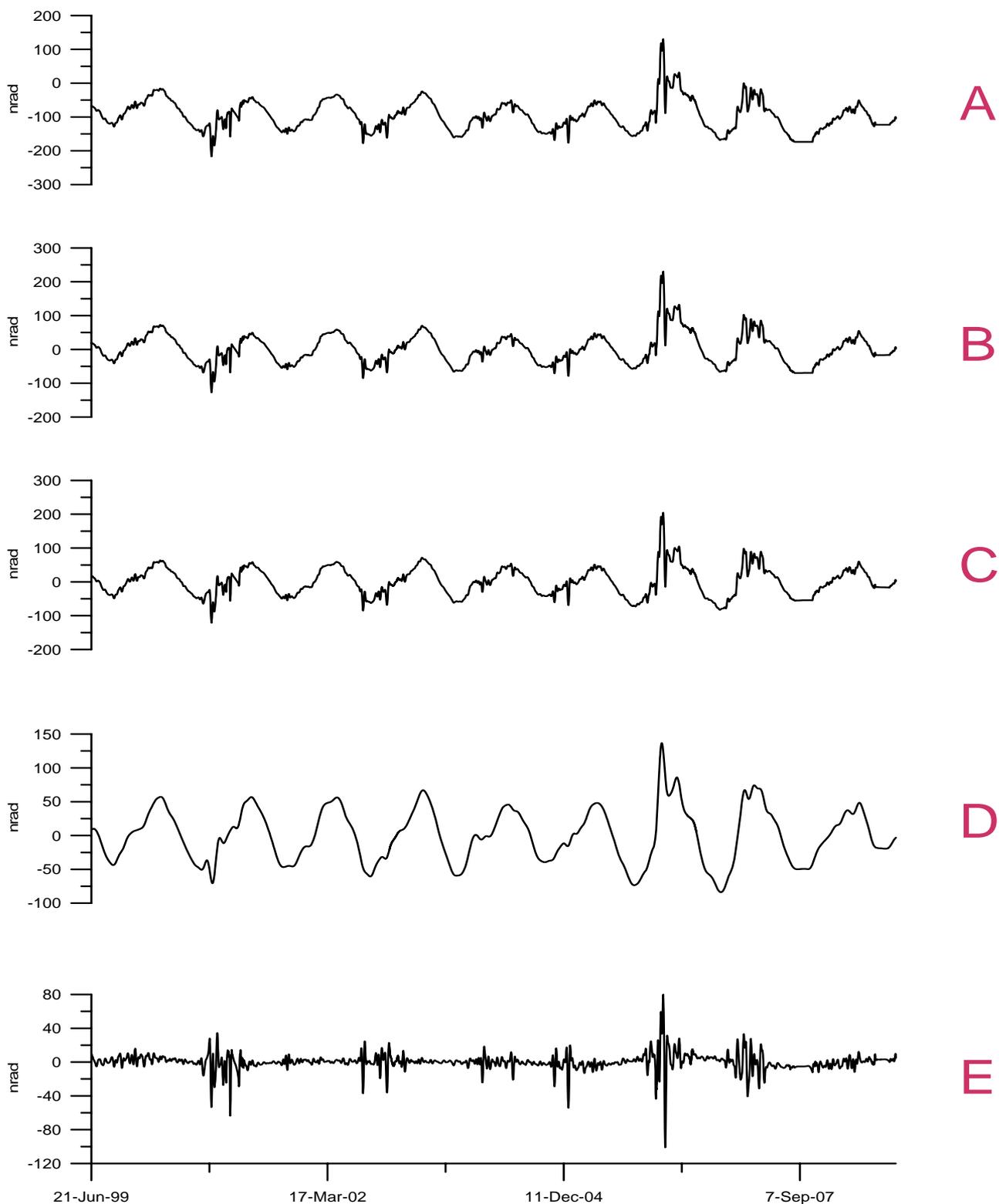


Fig. 15- Diverse fasi dell'evoluzione del segnale della componente EW dei pendoli della Grotta Gigante in seguito alle operazioni di elaborazione. Per dettagli si veda la Fig.14.

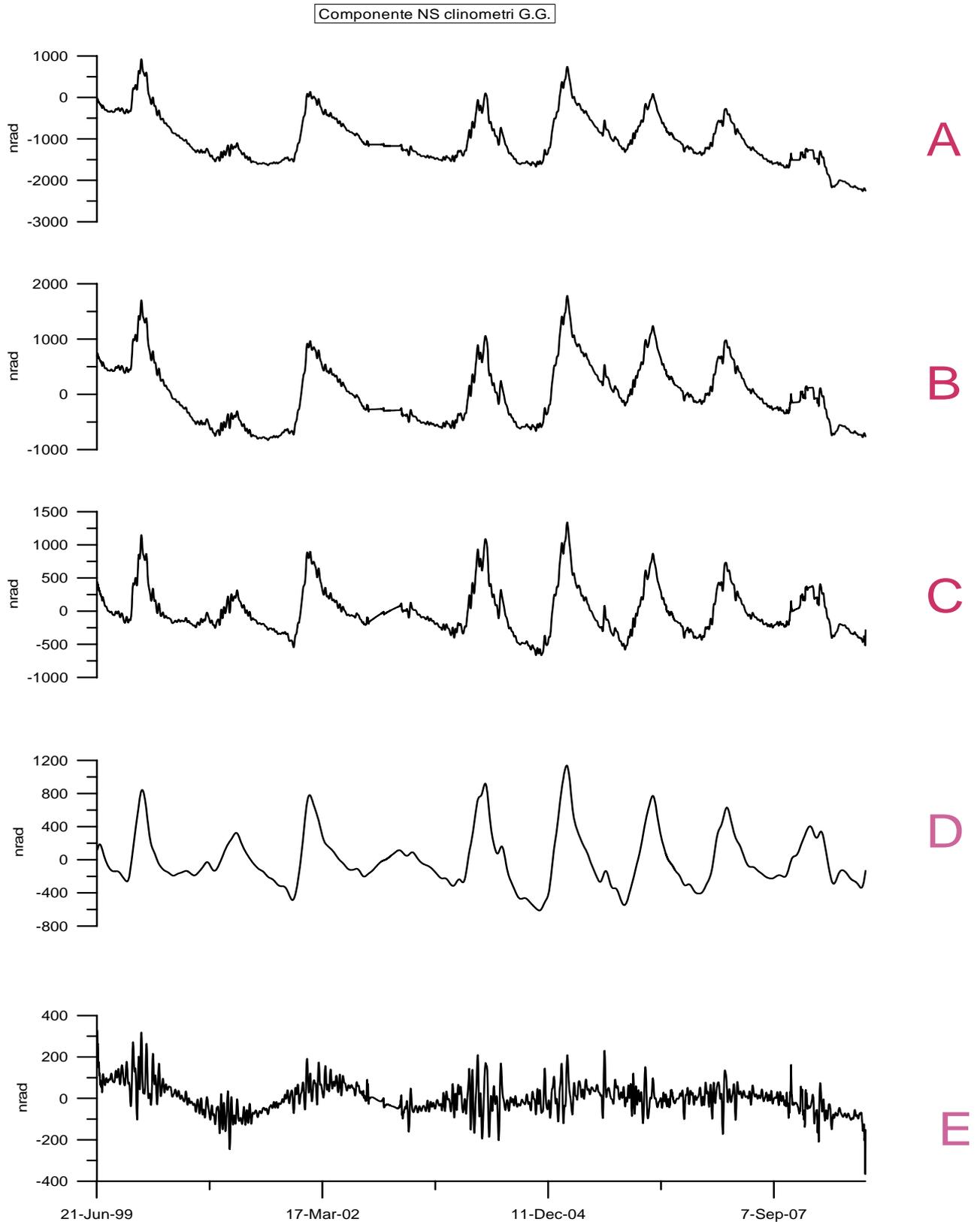


Fig. 16- Diverse fasi dell'evoluzione del segnale della componente NS dei clinometri della Grotta Gigante in seguito alle operazioni di elaborazione. Per dettagli si veda la Fig.14.

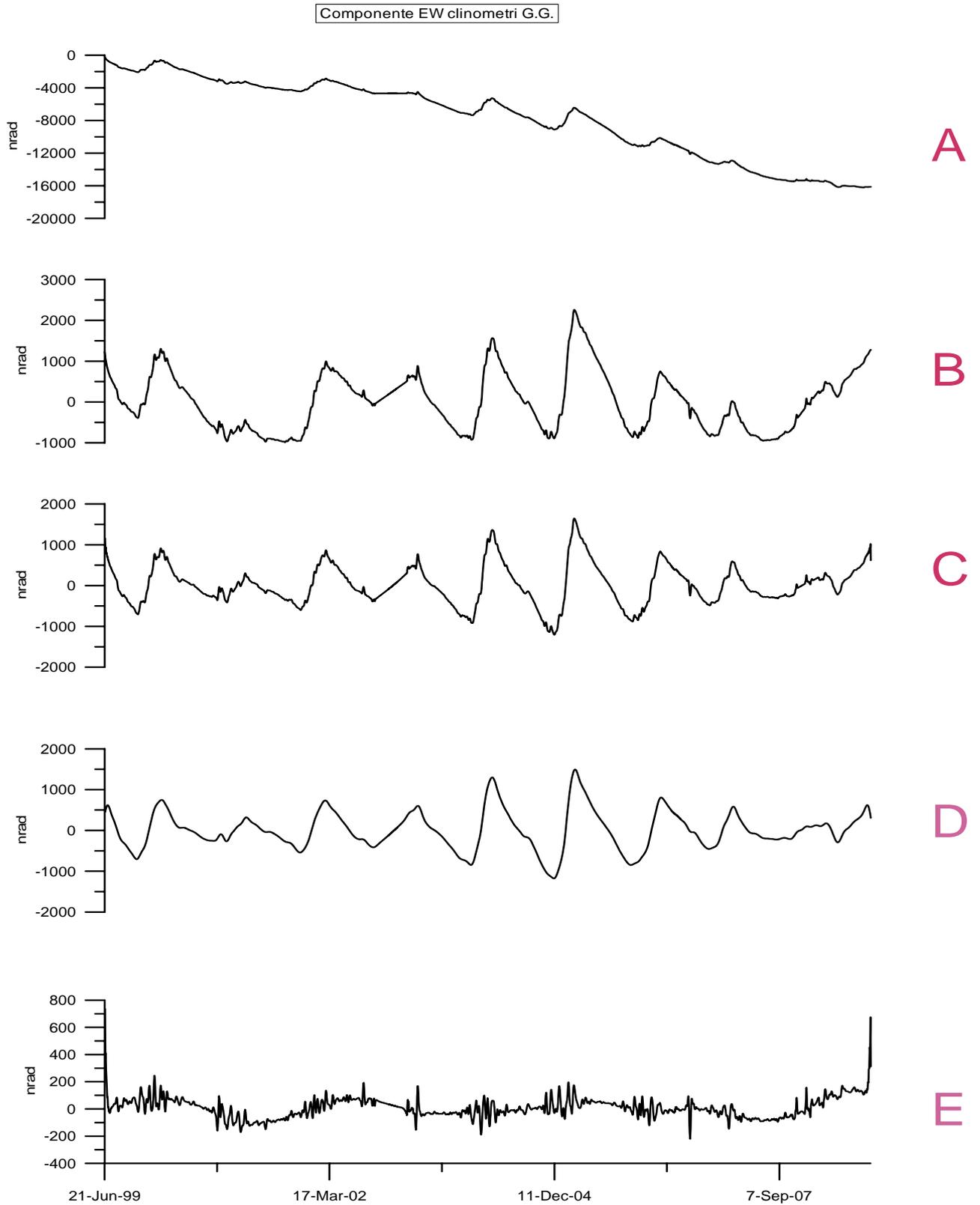


Fig. 17- Diverse fasi dell'evoluzione del segnale della componente EW dei clinometri della Grotta Gigante in seguito alle operazioni di elaborazione. Per dettagli si veda la Fig.14.

5.4.4 Caratterizzazione del segnale clinometrico associato alle piene.

Per meglio evidenziare le relazioni tra le piene del fiume Timavo e il segnale clinometrico registrato nella Grotta Gigante si sono eseguite un'ultima serie di operazioni atte a ricavare i valori di direzione, velocità e ampiezza di escursione del segnale clinometrico nei giorni interessati dalle piene.

Nella figura 18 è rappresentato un esempio di un grafico in cui sull'asse delle x sono riportati i valori della componente EW mentre sull'asse y i valori della componente NS (sia dei pendoli che dei clinometri). Questa rappresentazione è utile per illustrare l'evoluzione temporale dell'inclinazione in 2D. Nella figura 18 sono evidenziati in rosso due giorni (1 e 2) e il vettore di spostamento di tilting che li unisce. Ricavando l'ampiezza di tale vettore di tilting per ogni giorno dei valori di Δx e di Δy (vedi Fig.18) si è calcolato il modulo della velocità giornaliero del tilting. Oltre alla velocità si è calcolato inoltre l'azimut della direzione di tilting adottata ogni giorno.

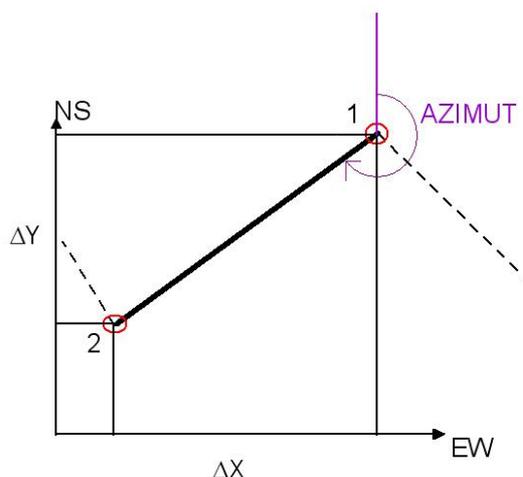


Fig.18- Esempio di grafico rappresentante il movimento di tilt. Vengono evidenziati i tratti Δx e Δy usati per il calcolo della direzione e del modulo della velocità.

I valori di velocità e direzione riguardanti i giorni di piena così ricavati sono stati riportati in grafici per completare lo studio degli effetti di piena sul tilt. Nella figura 19 sono riportati gli elementi presi in considerazione per ogni studio di piena. Il primo rappresenta il livello dell'acqua del fiume Timavo nell'Abisso di Trebiciano, sotto è riportato l'andamento della direzione e della velocità di tilting ed infine a destra è riportato il movimento bidimensionale di tilt. Tutti i grafici riguardano gli stessi giorni interessati dalla piena. Il giorno in cui si è raggiunto il punto massimo di livello o il primo giorno di saturazione (nei casi in cui sia stato superato il livello massimo di misurazione delle sonde), è stato fatto coincidere con l'ottavo dei giorni considerati. Questo momento è stato scelto perché consente nel grafico una buona visualizzazione del fenomeno nei sette giorni precedenti e permette di sincronizzare le curve di risposta alla piena per i diversi casi considerati.

Per quanto riguarda il grafico con il movimento di tilt, i giorni sono rappresentati dai numeri visibili in prossimità della curva; sono riportati i giorni salienti: quelli di inizio di fine ed il punto massimo del segnale. Come è ben visibile dall'esempio in figura 19 il segnale complessivo, determinato dalla piena, è caratterizzato da alcune fasi che si possono mettere in relazione all'andamento dell'acqua. Nell'ambito delle fasi il segnale complessivo di tilting si può suddividere in due tratti: segnale di andata e segnale di recupero (o di ritorno).

All'inizio della prima fase il segnale subisce un rallentamento (**A** nel grafico della velocità **c**) seguito da un orientamento di tilt verso SW adottando una direzione di circa N150°W (brusca discesa dal quarto al quinto giorno nel grafico della direzione **b**, tratto verde). Troviamo che

solitamente la velocità nei giorni di cambio direzione è minima con un successivo incremento nei giorni in cui la direzione è costante.

Successivamente (seconda fase e proseguimento del segnale di andata) la direzione rimane pressoché costante (dal quinto al settimo giorno, tratto verde nei grafici di direzione d e velocità c) e la velocità aumenta progressivamente. Questa fase finisce al punto massimo di velocità raggiunta (punto **B** grafico c).

La terza fase (tratto viola grafico c e b), dal settimo al decimo giorno, è caratterizzata da una direzione pressoché costante ed uguale alla fase precedente. Si distingue per il progressivo rallentamento dovuto al superamento del livello massimo d'acqua e quindi alla fine dell'evento di piena. La direzione si mantiene costante finché in un determinato giorno (decimo/undicesimo nel caso in esame) la velocità di spostamento è minima ed il segnale abbandona la direzione N150W (punto **C** grafico c).

La quarta ed ultima fase comincia dalla brusca variazione di direzione che determina la fine del segnale di andata e l'inizio del segnale di recupero. Nei segnali migliori come nell'esempio riportato, la direzione del recupero rimane quasi la stessa solo si ha un cambiamento di verso. Questa fase viene chiamata segnale di ritorno o di recupero, dovuto infatti al recupero della inclinazione iniziale. Come si può vedere la velocità aumenta durante la fase di recupero e la direzione poi viene gradualmente abbandonata per il finire dell'effetto delle acque.

Dal grafico del movimento 2D di tilt (Fig.19 grafico d) si può vedere come sono stati definiti i valori di ampiezza del segnale indotto dalle piene. Il segnale spesso presenta una differenza marcata tra l'ampiezza di escursione in andata ed in ritorno, quindi è stato opportuno misurarle entrambe. Nel grafico di Fig. 19 la linea arancione rappresenta l'ampiezza di escursione del segnale di andata mentre il tratto punto verde l'ampiezza di escursione del segnale di ritorno.

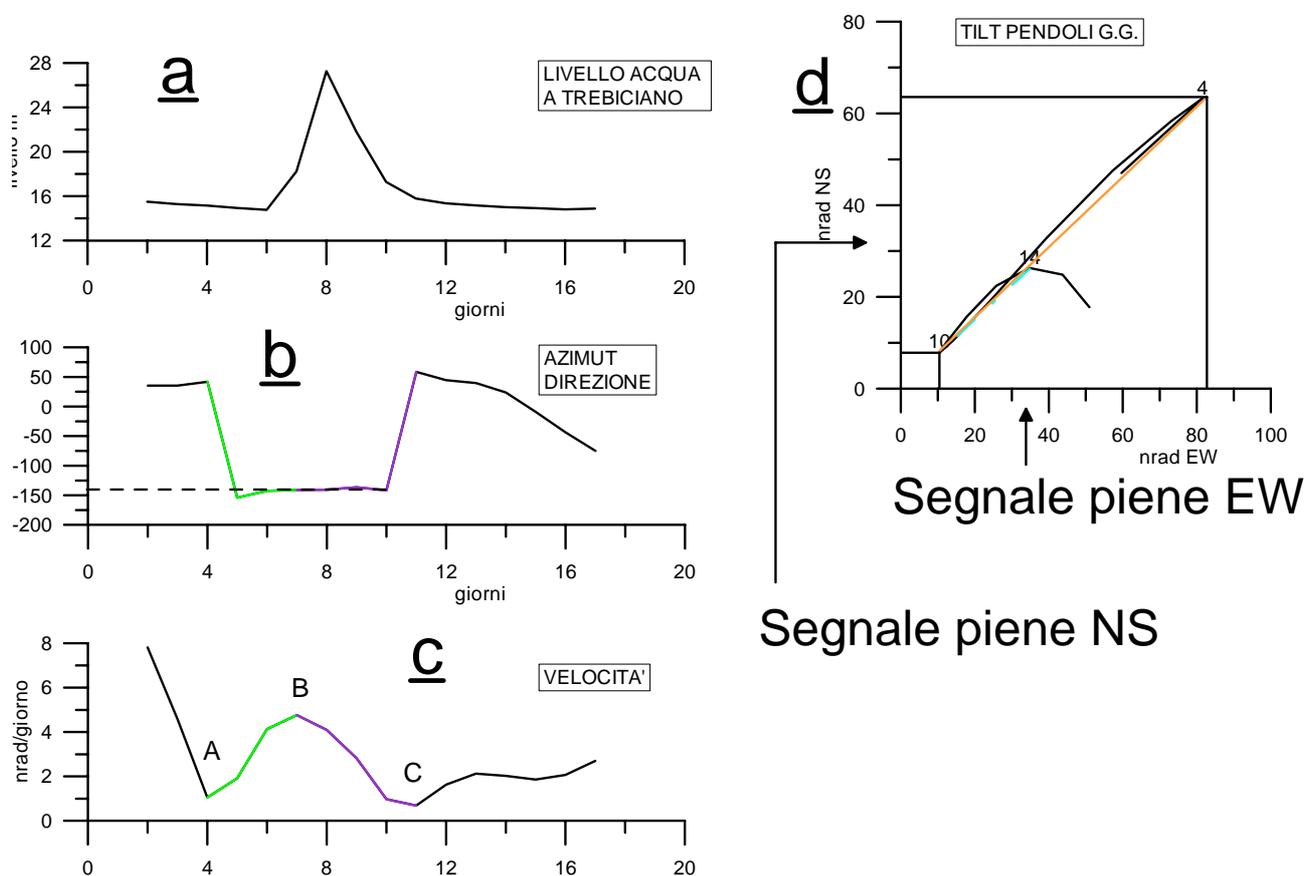


Fig.19- Le rappresentazioni utilizzate in fase di studio degli eventi di piena. Sono evidenziati i tratti e le fasi del segnale indotte dalle piene, il segnale di andata e il segnale di ritorno.

E' stato appena rappresentato l'evento di piena del 5 novembre 2002. Non tutti i segnali studiati sono ugualmente nitidi.

Si è infine cercata una relazione tra l'ampiezza del segnale indotto dalle piene e la variazione del livello dell'acqua. Quest'ultimo calcolo è stato più complesso in quanto in certi casi non si riusciva a stabilire il punto di inizio del segnale dovuto alla piena, ed in altri casi l'inizio del segnale di andata era in anticipo rispetto l'inizio della piena stessa misurata nell'abisso di Trebiciano.

Essendo noto che i tempi di salita nell'acqua in un evento di piena sono minori di quegli di discesa (le acque defluiscono più lentamente), si prevede una durata del segnale di recupero maggiore di quella del segnale di andata. Tale fenomeno non è sempre stato confermato. La bontà delle considerazioni a riguardo dipende da evento ad evento, gli eventi isolati sono più attendibili in quanto non ci sono eventi successivi che deviano il percorso del segnale. Nella tabella 1, sono riportate le date degli eventi di piena selezionati nel corso del nostro studio. Per le piene superiori al livello massimo di misurazione è stato considerato il massimo misurabile di 41,7 m.

| Numero evento | Data | Durata della piena | Livelli raggiunti |
|---------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|
| 1 | 12.10.2002 | 7 gg. | 29,03 m. |
| 2 | 24.10.2002 | 8 gg. | Oltre i 41,7 m. |
| 3 | 05.12.2002 | 7 gg. | 26,96 m. |
| 4 | 01.01.2004 | 8 gg. | Oltre 41,7 m. |
| 5 | 08.05.2004 | 8 gg. | Oltre 41,7 m. |
| 6 | 01.11.2004 | 10 gg. | Oltre 41,7 m. |
| 7 | 29.12.2004 | 9 gg. | Oltre 41,7 m. |
| 8 | 28.12.2000 10.01.2001 | – 24 gg. | Oltre 41,7 m. |
| 9 | 05.03.2001 23.03.2001 | – 30 gg. | Da 24,34 a oltre 41,7 m. |
| 10 | 23.01.2003 05.02.2003 | – 20 gg. | 36,7 m. |

Tabella 1. Gli eventi di piena considerati in questo studio.

Nei prossimi capitoli si riportano gli studi eseguiti su tutti questi eventi. Vengono prima riportati gli eventi solitari poi quegli multipli (inseriti in tabella 1 ai righe 8, 9 e 10).

Per ognuno vengono riportate, come nell'esempio di figura 19:- le variazioni di livello indotte dalle piene del Timavo misurate nell'Abisso di Trebiciano, la velocità, la direzione di spostamento e il movimento del tilt riguardanti le giornate in prossimità degli eventi, misurati nella Grotta Gigante.

Su quest'ultimo grafico si sono segnati i punti dai quali sono state calcolate le ampiezze di oscillazione. Le linee arancioni rappresentano i tratti considerati come ampiezze di andata invece i tratto punti in verde acqua le ampiezze di ritorno. Il giorno di livello massimo dell'acqua viene fatto cadere l'ottavo giorno per poter mettere in relazione tutti i grafici (il valore è arbitrario). Per ogni evento vengono descritte le operazioni.

5.5. Presentazione degli eventi di piena

Questi eventi sono stati selezionati perché ritenuti maggiormente rappresentativi. Dalla prima analisi si è visto che il clinometro non rispondeva bene e quindi in fase finale di studio ci si è riferiti solo al segnale dei pendoli. Il segnale clinometrico viene comunque riportato nel grafico che

rappresenta lo spostamento di tilt sempre negli stessi giorni rispetto gli altri grafici, si notino i valori di escursione molto maggiori rispetto ai pendoli.

Vengono riportate le considerazioni per ogni evento riguardanti le direzioni, le ampiezze e i ritardi di reazione del segnale. Per quanto riguarda quest'ultimo bisogna ricordare che i dati sono giornalieri quindi una stima temporale più precisa non è realizzabile.

5.5.1 Eventi di piena isolati

EVENTO DEL 12 OTTOBRE 2002

Il livello raggiunto dall'acqua è di 29,03 metri che viene a cadere l'ottavo giorno della serie temporale. Rispetto alle piene che seguono il livello massimo raggiunto dall'acqua è modesto. Come è evidente dalla figura 20, il segnale indotto sui pendoli presenta parzialmente le caratteristiche presentate nel paragrafo 4.4. L'ottavo giorno il pendolo inizia il tilting in direzione SW, che viene mantenuto fino a circa il giorno dieci; quindi il ritardo in fase di carico è di un 2 giorni. L'ampiezza dell'escursione del segnale dovuta alla fase di carico è calcolata dal settimo al decimo giorno (linea arancione) e corrisponde a 68,81 nrad; quella di ritorno è calcolata dal quattordicesimo giorno e corrisponde a 73,17 nrad. In questo caso non c'è molta differenza tra i due valori di ampiezza e sono entrambi rappresentativi dell'evento. Si può considerare il dodicesimo giorno come fine dell'evento di piena e se si considera anche il quattordicesimo giorno come fine del movimento del pendolo, si ottiene un ritardo di 2 giorni in fase di scarico rispetto alla fine dell'evento di piena a Trebiciano. In questo caso il ritardo trovato sull'inclinazione per la massima deformazione in fase di carico, e del ritardo trovato per la fine del segnale indotto dalle piene è in ambedue casi di 2 giorni. Nei giorni successivi (qui non riportato), è avvenuta una successiva piena la quale, potrebbe aver influito sul pendolo deviandone il percorso e riportandolo in direzione SW come si vede nell'ultimo tratto dopo il quattordicesimo giorno. Il segnale di andata inizia il settimo giorno, un giorno dopo l'inizio della piena. Il clinometro, come ben visibile, non presenta una buona risposta alle variazioni del livello dell'acqua.

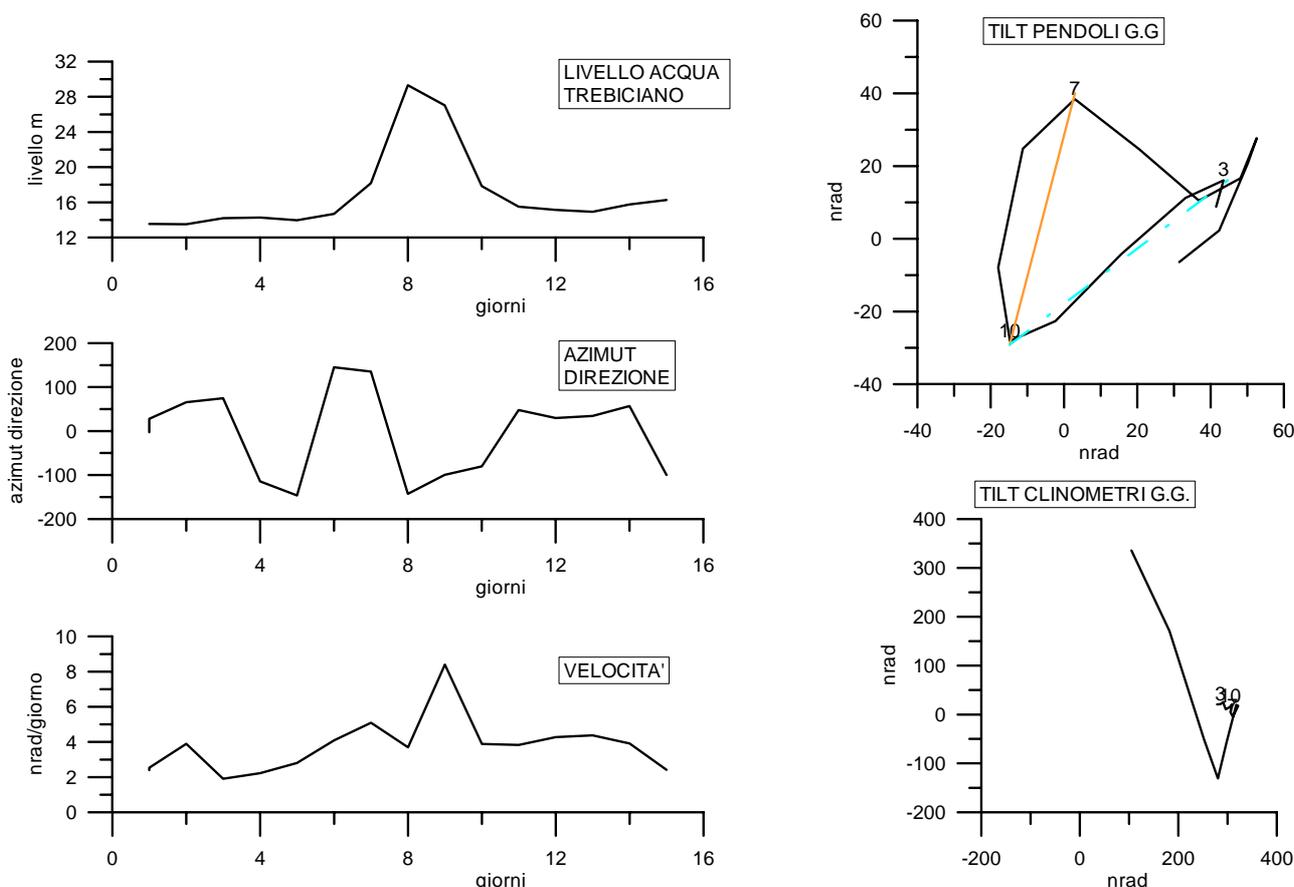


Fig 20. Rappresentazione degli eventi di piena del Timavo e del segnale indotto sui pendoli e sui clinometri della Grotta Gigante, in analogia alla Fig. 19. In basso a destra il tilting 2D del clinometro della Grotta Gigante. A) Evento del 12 ottobre 2002.

EVENTO DEL 28 OTTOBRE 2002

La piena in questo caso ha superato il livello massimo misurabile dalla sonda che è pari a 41,7 m. (sonda con campionamenti da 0 a 30 metri più gli 11,7 metri di quota dello strumento). L'inizio della saturazione è stato fissato all'ottavo giorno ed il pendolo raggiunge la massima inclinazione verso SW il 10° giorno, riportando così 2 giorni di ritardo in fase di carico. L'ampiezza di andata è calcolata dal terzo giorno e corrisponde a 150,476 nrad, mentre quella di ritorno viene calcolata dal 17° giorno e comporta un valore di 206,74 nrad. Le ampiezze in questo caso sono abbastanza differenti. La fine dell'evento avviene il 14° giorno, il che fa riportare un ritardo in fase di scarico di 3 giorni. Si ottiene così un valore di ritardo di chiusura del segnale di ritorno maggiore del ritardo rilevato alla fine del segnale di andata. Questo ritardo è imputabile alle ultime acque presenti nel reticolo idrografico che defluiscono più lentamente. Questo evento presenta anche un netto anticipo del segnale di andata rispetto all'effettivo inizio della piena a Trebiciano, il che suggerisce un effetto indotto da altre acque rispetto a quelle provenienti da Trebiciano. Per questo evento è realizzabile una buona stima della direzione corrispondente a N166W in andata e N34E in recupero. Anche in questo caso il clinometro non presenta un buon segnale.

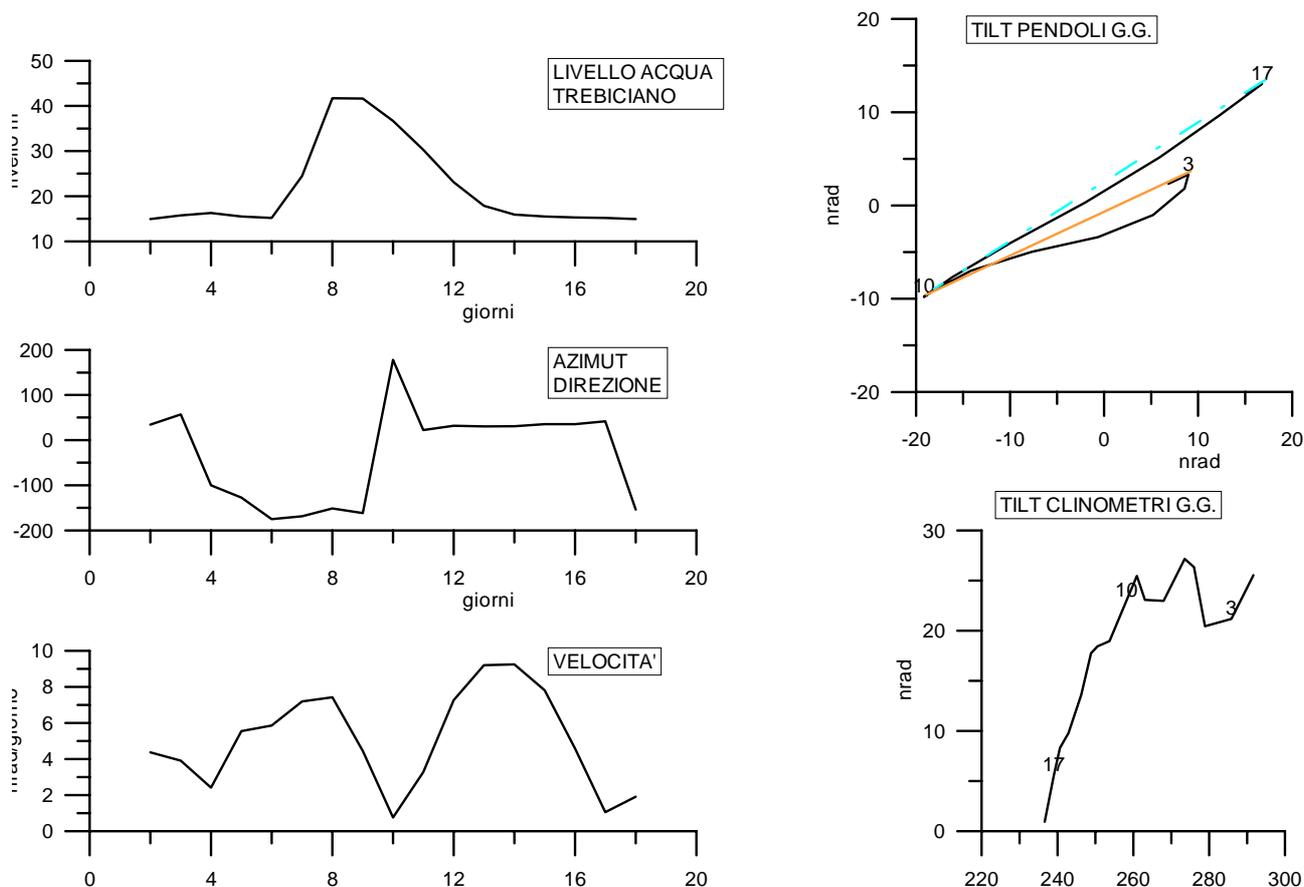


Fig. 20 B) Evento del 24 ottobre 2002.

EVENTO DEL 5 NOVEMBRE 2002

Qui viene riportato il piccolo evento di 26,96 metri avvenuto il 5 novembre 2002. Nonostante la sua piccola entità il segnale del pendolo ha dato, come si vede nella figura 20 C), un precisa orientazione nei giorni prossimi all'evento. In questo caso l'inizio della deriva verso SW avviene contemporaneamente all'inizio dell'innalzamento di livello dell'acqua misurato a Trebiciano. Anche in questo caso il picco è riportato l'ottavo giorno, mentre il pendolo raggiunge il punto massimo il decimo giorno. L'ampiezza di andata (rappresentata dalla linea continua arancione) è stata calcolata dall'escursione tra il 5° giorno (punto massima verso NE) e il decimo, ed il valore così ottenuto corrisponde a 90,0251 nrad. Per quanto riguarda l'ampiezza di ritorno (meno rappresentativa in questo caso e rappresentata dal tratto punto verde) si è preso come estremo il quattordicesimo giorno e si è ottenuta così un'ampiezza di 30,52 nrad. La piena finisce il dodicesimo giorno e il segnale dei pendoli, abbandona la direzione del segnale di ritorno il quattordicesimo. Anche in questo caso l'effetto delle ultime acque che rimangono nell'acquifero sembrerebbe aver avuto effetto. La direzione del segnale di andata è molto decisa e corrisponde a N143W.

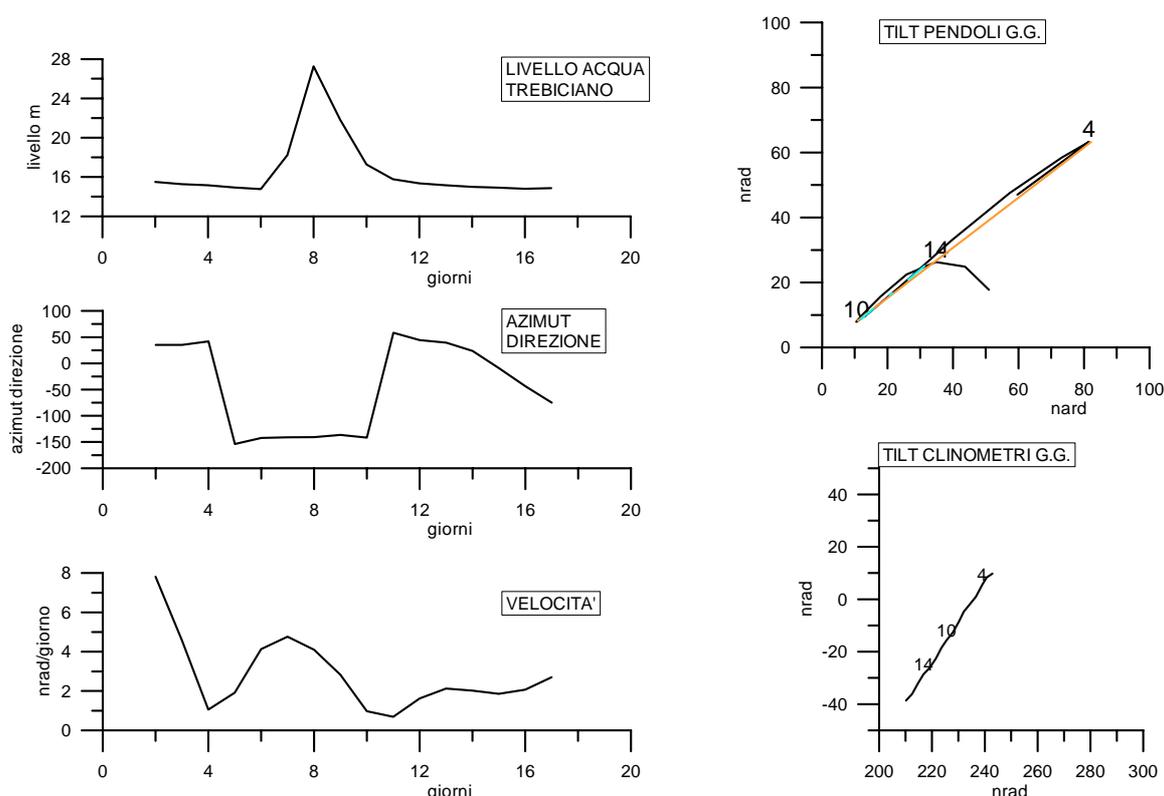


Fig.20 C) Evento del 5 novembre 2002.

EVENTO DEL 1 GENNAIO 2004

La piena ha superato il valore di saturazione il primo gennaio 2004 (vedi Fig. 20 D), fatto corrispondere all'ottavo giorno. Il pendolo raggiunge il punto massimo di inclinazione verso SW il nono giorno, e quindi riporta un ritardo di un giorno in fase di carico. L'evento è pressoché solitario e quindi si può fare un stima anche del ritardo in rilascio. La chiusura del percorso del pendolo avviene il quindicesimo, sedicesimo giorno, invece per quanto riguarda la piena, il tredicesimo giorno si raggiunge il livello più basso per poi mantenersi all'incirca costante. Da queste considerazioni si può stabilire un ritardo in fase di scarico di 2- 3 giorni il ché ancora una volta conferma la tesi dell'effetto delle ultime acque più lente a defluire. L'inizio del segnale di andata, il secondo giorno, anticipa di quasi quattro giorni l'inizio dell'innalzamento dell'acqua; parte del segnale quindi deve essere attribuito all'effetto di altre acque rispetto quelle provenienti da Trebiciano.

L'ampiezza di andata è stata calcolata dal secondo al nono giorno (linea continua arancione) corrispondente ad un valore di (143,027 nrad), quella di ritorno dal quindicesimo al diciannovesimo ed è di 225,2 nrad. La direzione del tilting di andata corrisponde a N168W, mentre quella di ritorno a N30.8E. Il segnale dei clinometri è decisamente più caotico rispetto quello dei pendoli.

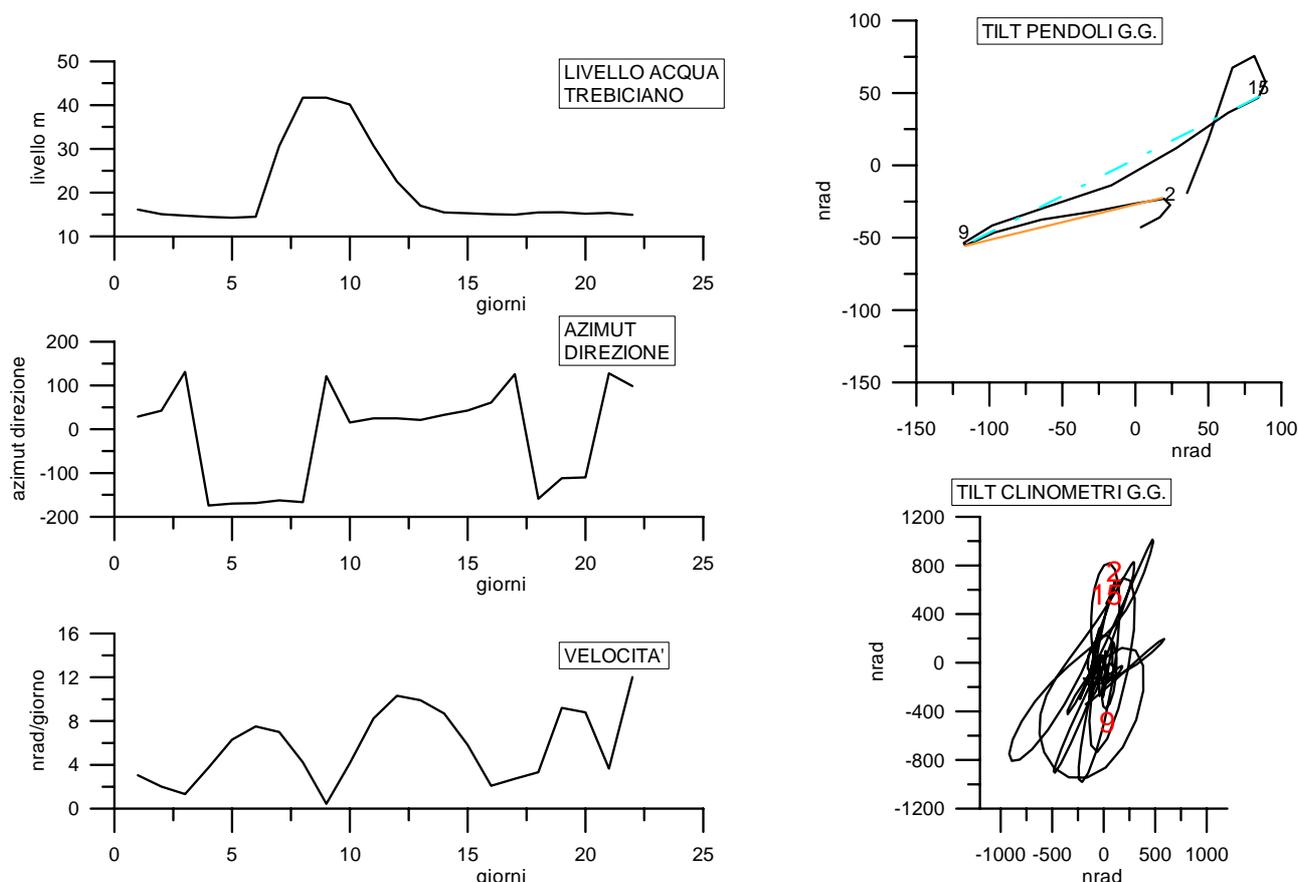


Fig. 20 D) Evento del 1 gennaio 2004.

EVENTO DEL 8 MAGGIO 2004

L'ultimo dato è stato registrato dallo strumento, posto nell'Abisso di Trebiciano, l'otto maggio, poi la piena ha continuato a salire saturando lo strumento. Anche in questo caso, l'inizio della saturazione è stato fatto cadere l'ottavo giorno ed il pendolo raggiunge il punto di massima inclinazione verso SW il nono giorno, e quindi con un giorno di ritardo. Anche qui l'inizio del segnale di andata del tilting avviene il secondo giorno, quasi due di anticipo rispetto all'inizio dell'incremento del livello dell'acqua. La prima parte del segnale di andata di tilting deve essere considerata come l'effetto di acque diverse rispetto a quelle provenienti da Trebiciano. Dai dati dei pendoli la chiusura del ciclo avviene il diciassettesimo giorno e se si considera il tredicesimo giorno come chiusura della piena allora si riscontra un ritardo di tre giorni in fase di svuotamento, due di più del ritardo in fase di carico, il che confermerebbe la tesi sull'effetto delle ultime acque di deflusso. L'ampiezza di andata è calcolata dal secondo giorno per un valore 174,42 nrad mentre quella di ritorno è calcolata dal diciassettesimo giorno e corrisponde a 164,44 nrad. La direzione assunta dal segnale di andata corrisponde a N154W mentre quella di ritorno a N31E. I clinometri presentano una sorta di orientazione simile a quella dei pendoli ma decisamente meno definita.

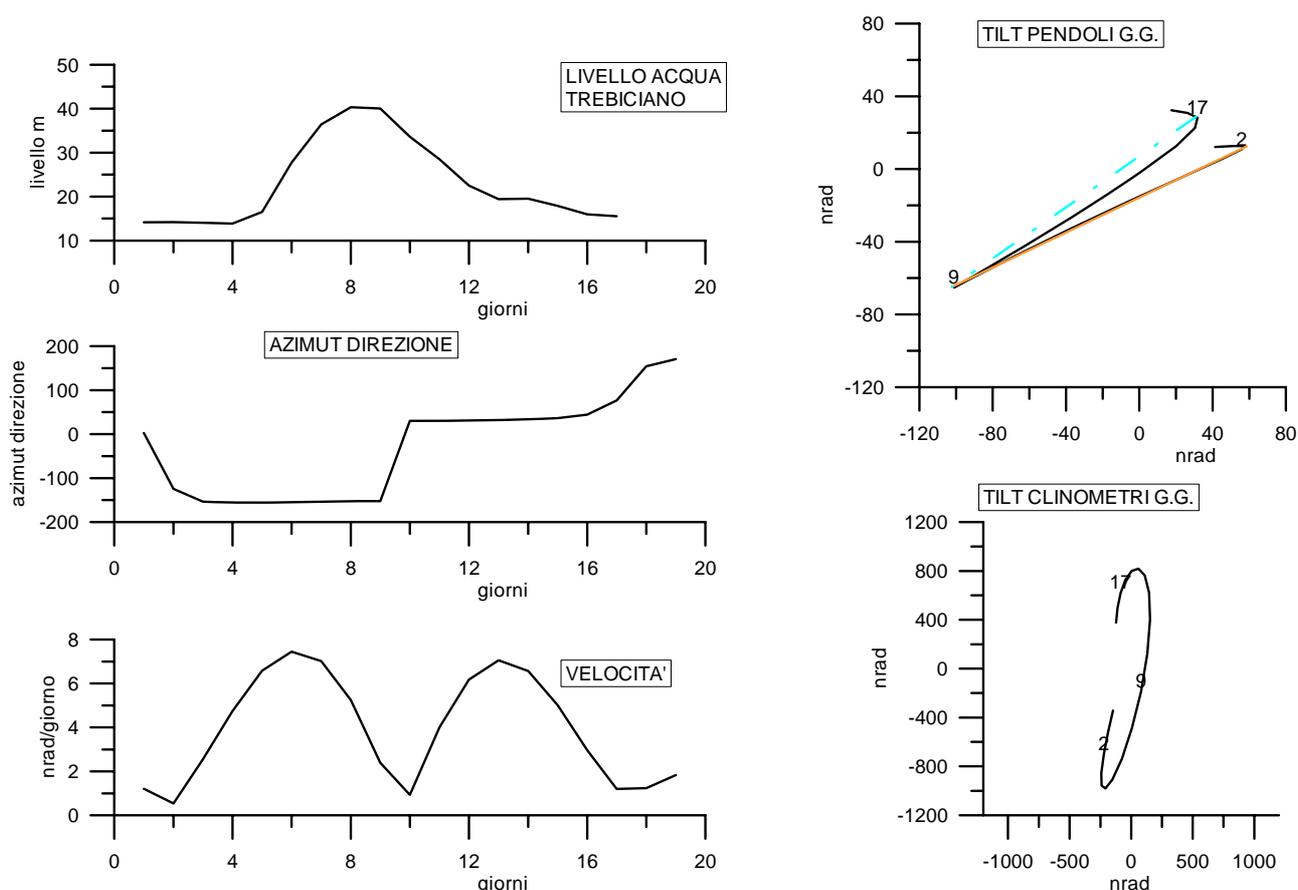


Fig. 20 E) Evento del 8 maggio 2004.

EVENTO DEL PRIMO NOVEMBRE 2004

Un altro evento di piena che ha superato il livello di saturazione (Fig. 20 F) è avvenuto il primo novembre 2004. Il pendolo raggiunge il punto massimo il nono giorno con un giorno di ritardo dall'inizio di saturazione del livello dell'acqua fatto cadere l'ottavo giorno. L'ampiezza di andata è calcolata dal secondo giorno e corrisponde a 189,25 nrad. Anche in questo evento bisogna considerare l'effetto di altre acque rispetto a quelle provenienti da Trebiciano dal momento che il segnale di andata riporta un anticipo di quasi 2 giorni rispetto l'inizio dell'evento di piena. L'ampiezza di ritorno viene presa dal sedicesimo giorno, punto di volta stretta, e corrisponde a 256,11 nrad. Essendo l'evento di piena pressoché solitario, è possibile determinare bene il ritardo di scarico. Il tredicesimo giorno si ritorna a livelli normali d'acqua, mentre per il pendolo il tredicesimo giorno si ha un cambiamento netto di direzione di 180°, corrispondente alla fine del segnale di ritorno. Anche in questo caso, il ritardo della fine dello scarico, di tre giorni, avviene di due giorni in più rispetto al ritardo in fase di carico. Le direzioni medie assunte in fase di andata e di ritorno sono rispettivamente N160W e N32E. I clinometri presentano un segnale con una lieve orientazione ma meno marcata rispetto il segnale dei pendoli.

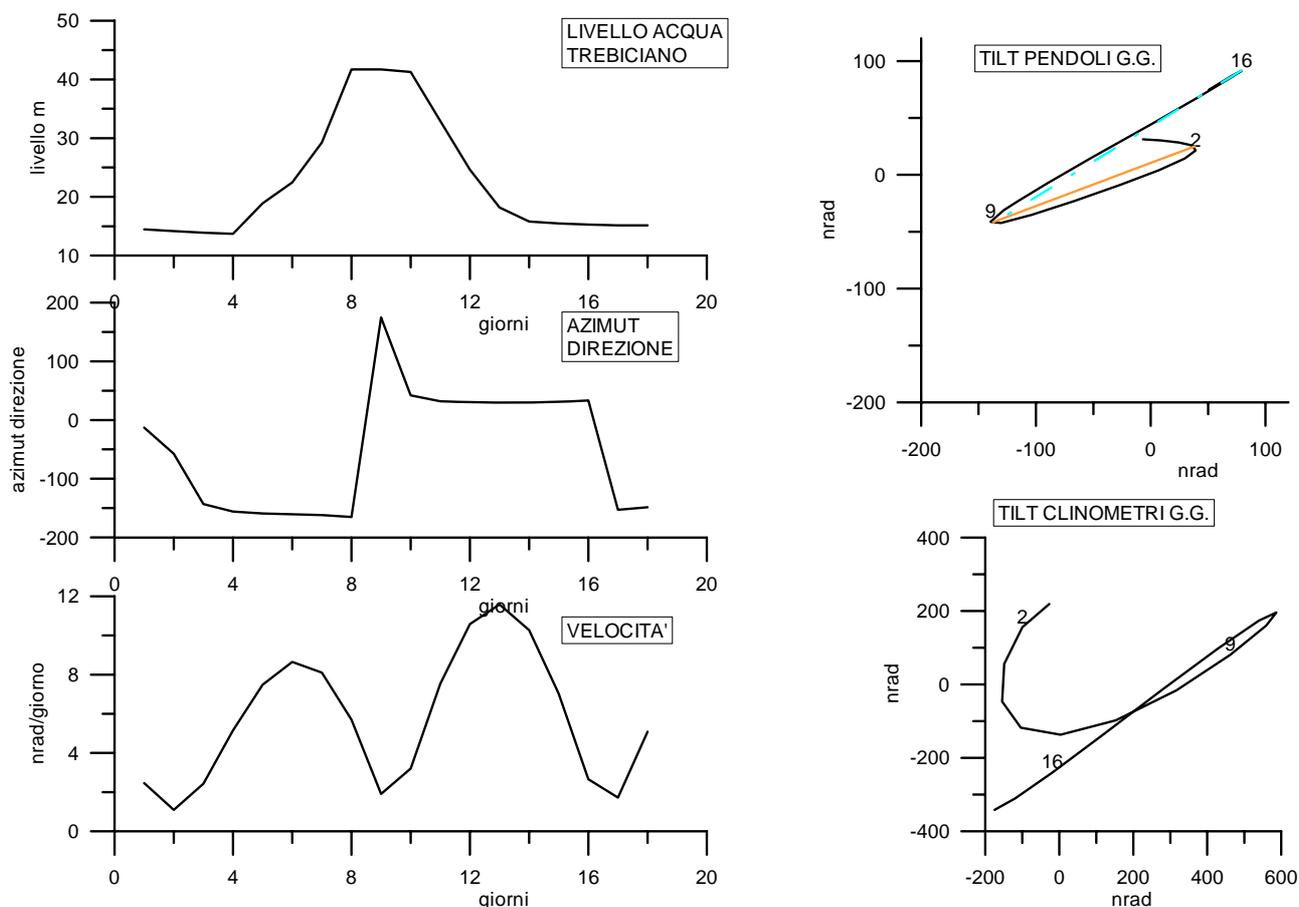


Fig. 20 F. Evento del primo novembre 2004.

EVENTO DEL 28 DICEMBRE 2004

L'evento è avvenuto il 28 dicembre 2004 e anche in questo caso saturando i valori campionati dalle sonde dell'Abisso di Trebiciano saturano (Fig. 20 G). I pendoli presentano un segnale di massima escursione verso SW al decimo giorno, riportando così due giorni di ritardo in fase di carico rispetto alla piena nell'Abisso di Trebiciano. L'inizio del segnale di andata anticipa quello di piena di circa quattro giorni ed è attribuibile all'effetto di altre acque del sistema acquifero carsico, rispetto quelle provenienti da Trebiciano. L'ampiezza dell'oscillazione di andata è calcolata dal secondo giorno e corrisponde a 358,73 nrad. Quella di recupero dal diciassettesimo giorno corrisponde a 418,34 nrad. Come è visibile, il pendolo chiude il ciclo il diciassettesimo giorno, due giorni dopo il raggiungimento di livelli ordinari nell'Abisso di Trebiciano. In questo caso, il sistema in Grotta Gigante ha presentato gli stessi tempi di reazione rispetto al massimo e il minimo livello d'acqua raggiunti a Trebiciano. L'evento presenta una chiara e costante direzione dei due segnali di andata e recupero dei pendoli, corrispondenti rispettivamente a N154W e N31E. Il segnale clinometrico presenta un andamento quasi opposto a quello dei pendoli presentando una deriva circa verso NE dal secondo al decimo giorno ovvero nel periodo di massimo effetto dell'acqua.

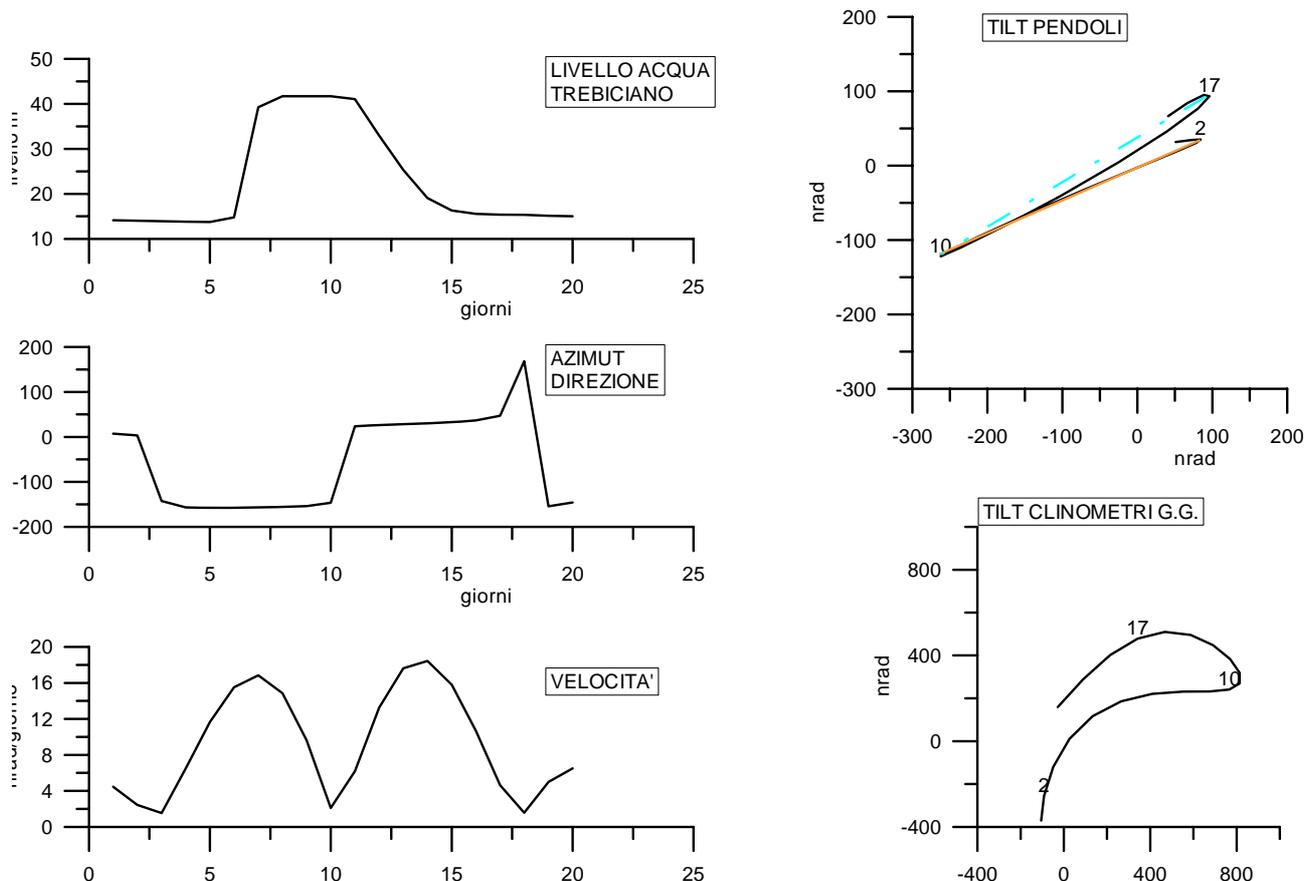


Fig. 20 G) Evento del 28 dicembre 2004.

5.5.2 Riassunto del segnale clinometrico indotto dalle piene

Dopo l'analisi del comportamento dei pendoli e dei clinometri in seguito agli eventi di piena sopra descritti singolarmente, nella Fig. 21, i segnali vengono raggruppati in un unico grafico. Da questa rappresentazione si può apprezzare il trend di inclinazione comune a tutti gli eventi, i due segnali di inclinazione di andata e ritorno e le rispettive direzioni assunte (pressoché comuni). Inoltre si può stimare gli anticipi ed i ritardi medi di reazione del sistema di deformazione, nonché le ampiezze di escursione di oscillazione indotte dalle piene del Timavo.

Le linee color senape tratteggiate (Fig. 21) evidenziano il campo delle direzioni assunte dai segnali di andata, che oscillano tra -135° e -174° , mentre quelle amaranto evidenziano l'intervallo delle direzioni assunte dai segnali di ritorno, che oscillano tra 25° e 58° .

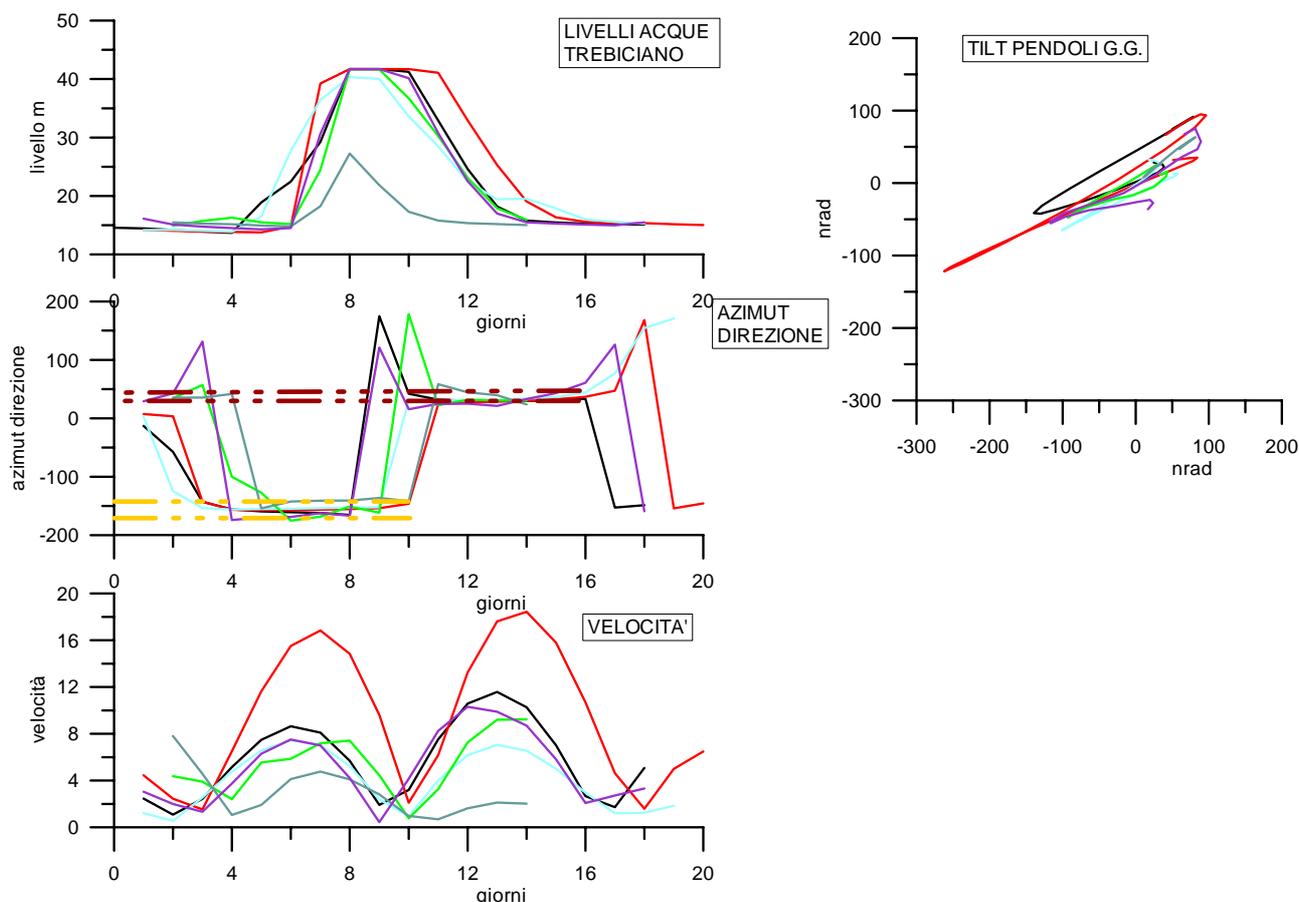


Fig. 21 Diagrammi riassuntivi del segnale di piena del Timavo e del relativo segnale di inclinazione osservato nella Grotta Gigante. Linea tratteggiata color senape: valori entro i quali si colloca la direzione del segnale di inclinazione generato dalla piena. Linea tratteggiata color amaranto: valori entro i quali si colloca la direzione del segnale di inclinazione generato dal recupero dalla piena. Curva nera: evento 1 novembre 2004, curva rossa 28 dicembre 2004, curva blu 8 maggio 2004, curva verde 24 ottobre 2002, curva verde scuro 5 novembre 2002, curva viola 1 gennaio 2004.

I valori di tilt quasi doppi, rispetto agli altri, presentati dall'evento in rosso, piena del 29 dicembre 2004, sono dovuti sicuramente al grande anticipo che questo segnale ha riportato in relazione all'inizio della piena. Si può vedere infatti nel grafico delle direzioni come la linea rossa raggiunge valori attorno -155° già il terzo giorno quando l'inizio della piena comincia il sesto giorno, ma potrebbe avere anche una relazione con l'entità del dislivello raggiunto da tale piena; tuttavia l'affermazione non può essere confermata con i dati considerati dal momento che la piena ha saturato lo strumento. Il fenomeno, molto comune, degli anticipi dell'inizio del segnale di andata rispetto l'inizio della piena può essere dovuto all'effetto di altre acque non provenienti da Trebiciano.

5.5.3 Eventi di piena multipli

Vengono ora riportati un'ultima serie di eventi di piena non isolati, ovvero eventi che sono avvenuti in un arco di tempo molto breve, e che quindi vengono considerati insieme. Si analizza in questo caso il segnale indotto nei pendoli che corrisponde a carichi multipli del sistema di acque sotterranee. Così si può apprezzare la relazione grafica tra le escursioni del livello dell'acqua ed i cicli del segnale dei pendoli. Alcune piene hanno superato il livello massimo misurabile dalle sonde nell'Abisso di Trebiciano.

EVENTI DEL 27 DICEMBRE 2000 E 10 GENNAIO 2001

Viene qui riportata una serie di piene pressoché consecutive, rappresentate in Fig. 22 dai punti P1 e P2, avvenute rispettivamente il 27 dicembre 2000 e il 10 gennaio 2001. Entrambe le piene hanno superato il livello di saturazione. La prima è avvenuta l'ottavo giorno mentre la seconda il ventunesimo giorno. Il segnale dei pendoli risente della prima piena, disponendosi verso SW, il decimo giorno. I ritardi in fase di carico riportati per le due piene sono diversi e in particolare per la prima piena (P1) è di due giorni mentre per la seconda (P2) è di un solo giorno. Anche in questo caso il segnale di andata presenta un anticipo rispetto l'inizio dell'innalzamento del livello dell'acqua di quasi cinque giorni mentre per la seconda piena l'anticipo è di due giorni. E anche apprezzabile il breve segnale riportato dai pendoli tra il 15° e il 19° giorno: una sorta di breve deriva verso W imputabile al minore innalzamento del livello dell'acqua il 16° giorno. Le ampiezze per il primo evento sono state calcolate dal terzo al decimo giorno in andata e si ha avuto 170,344 nrad. Per quanto riguarda la fase di scarico gli estremi per il calcolo sono il quindicesimo e il decimo giorno ed hanno dato un'ampiezza di 151,959 nrad. Per la seconda piena si ha avuto in andata, dal diciannovesimo al ventiduesimo giorno, un'ampiezza di 157,469 nrad di escursione. Per il segnale di recupero, l'ampiezza calcolata dal ventiduesimo al ventottesimo giorno, raggiunge i 210,417 nrad. La chiusura del ciclo del pendolo, ventottesimo giorno, sembrerebbe avvenire due giorni prima dell'esaurimento della piena imputabile al trentesimo giorno. Questo è un esempio di come, talvolta, non c'è stata una relazione tra i due fenomeni carico dell'acqua e deformazione crostale rilevata dai pendoli.

Per questo evento la misura delle direzioni adottate non è significativa: Il segnale del clinometro mostra cambi di direzioni in giorni rilevanti rispetto i cambiamenti di livelli, ma le direzioni non sono compatibili.

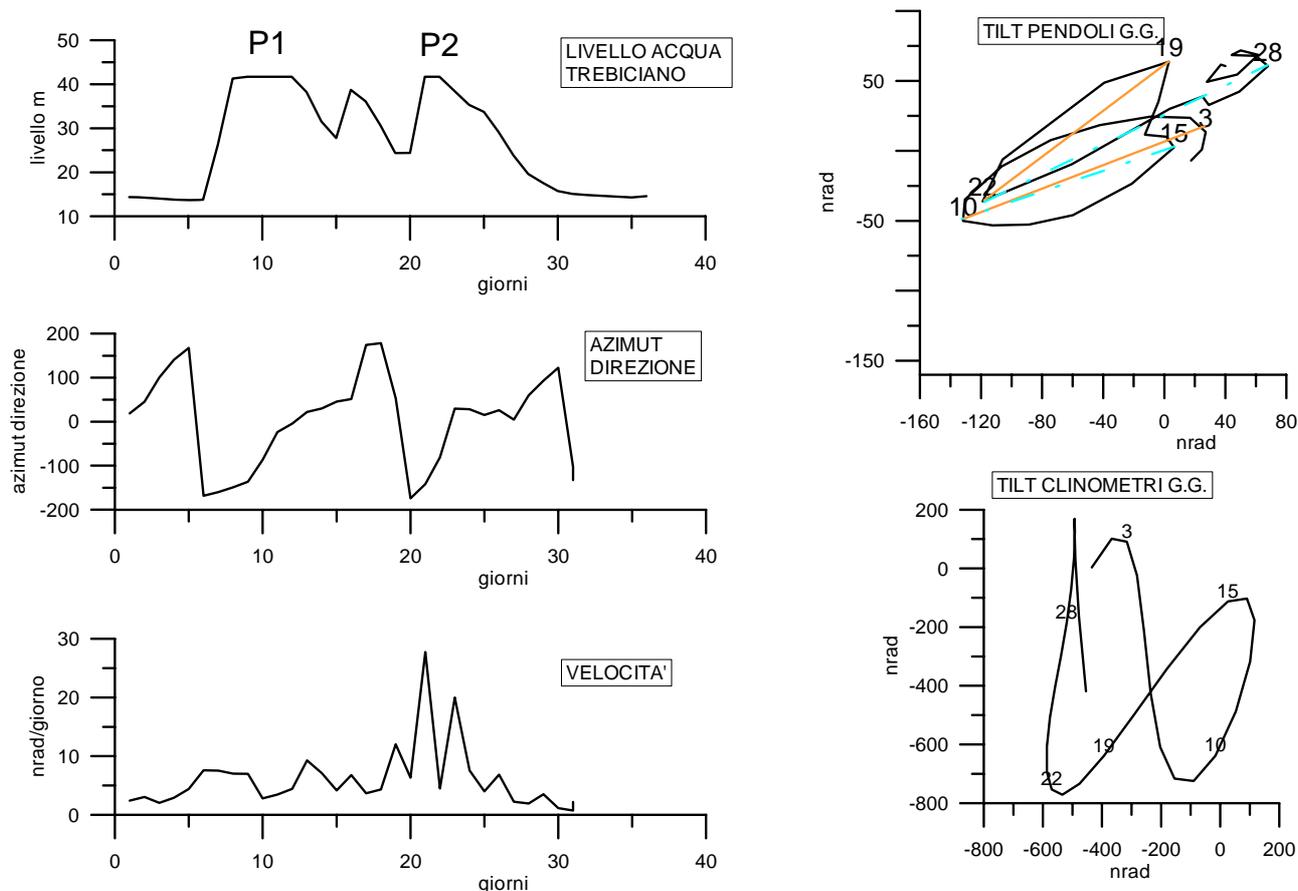


Fig. 22 Rappresentazione degli eventi multipli di piena del Timavo e del segnale indotto su pendoli e clinometri della Grotta Gigante, in analogia alla Figura 19. In basso a destra il tilting 2D del clinometro della Grotta Gigante. B) Evento multiplo del 27 dicembre 2000 (P1) e del 10 gennaio 2001 (P2).

SERIE DI EVENTI DAL 5 AL 23 MARZO 2001

Qui vengono riportati una serie di eventi multipli, che progressivamente hanno entità più piccola e che hanno generato un segnale di inclinazione, visibilmente proporzionale alla loro entità (P1,P2.P3 e P4 nella Fig. 22 B). Il primo è maggiore ed, avviene il 5 marzo con un livello che ha superato il valore di saturazione. I pendoli sentono la piena il decimo giorno con due giorni di ritardo. L'ampiezza di andata è precaria in quanto la deriva visibile verso SW anticipa di circa 25 giorni l'inizio della piena! Quindi, anche questo fenomeno è giustificabile con l'effetto di altre acque rispetto quelle provenienti da Trebiciano. E' stato misurato comunque per tale ampiezza un valore dal quarto al decimo giorno di 106,977 nrad. In questo caso l'ampiezza di recupero è decisamente più rappresentativa dell'evento se si considera il livello raggiunto dalle acque. L'ampiezza dell'escursione di ritorno è stata calcolata dal decimo al sedicesimo giorno ed è di 268,424 nrad.

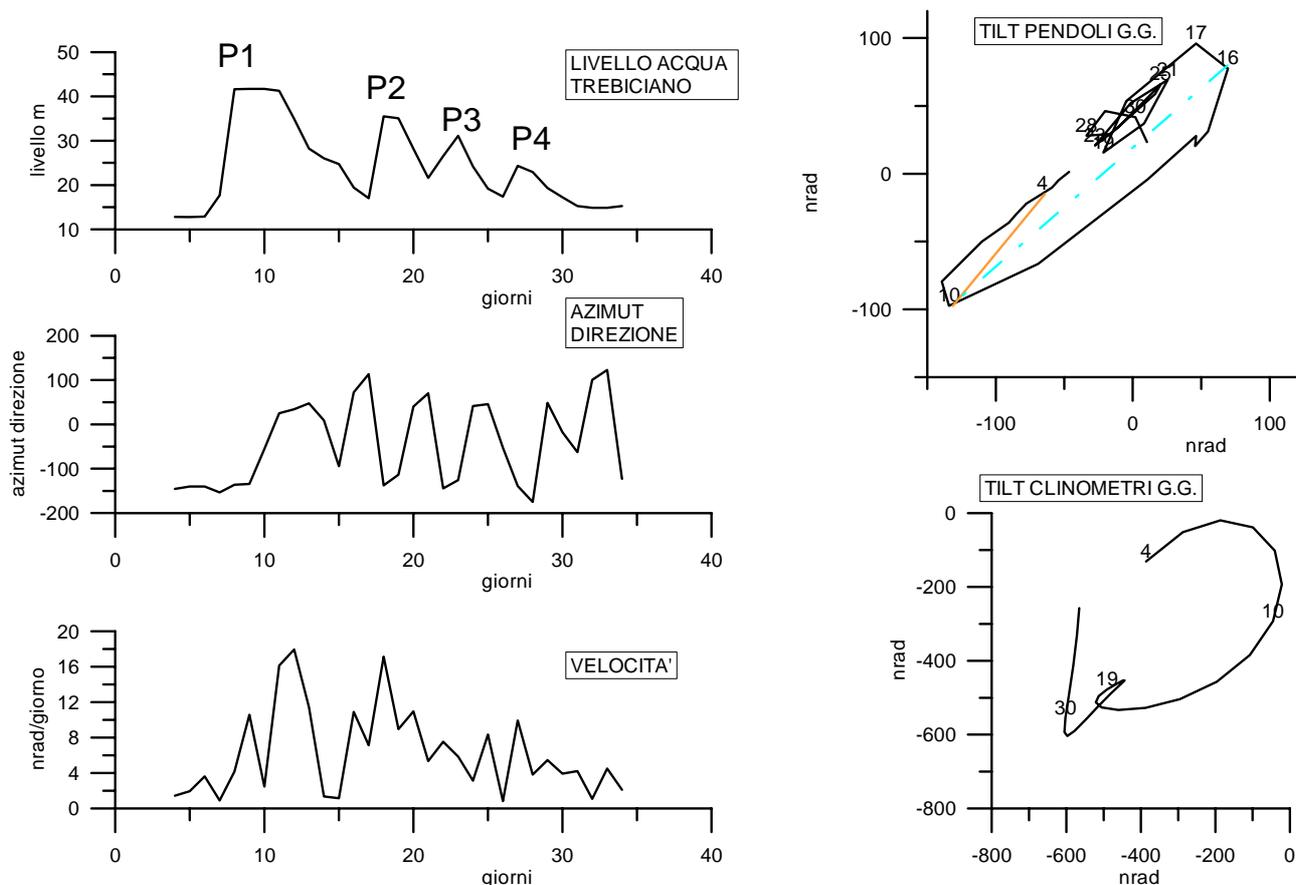


Fig. 22 C) Evento multiplo (P1-P5) avvenuta tra il 5 ed il 25 marzo 2001.

I clinometri in questo caso mostrano per il primo evento P1 una specie di deriva verso SW, più lenta rispetto ai pendoli, mentre in concomitanza dei giorni interessati dalle successive piene di entità minore, riportano un tratto concentrico che poi abbandonano.

Dal grafico a destra, rappresentante il movimento di tilt dei pendoli, è ben visibile come la serie di eventi più piccoli (P2, P3, P4) che hanno seguito la prima piena (P1), hanno lasciato dei segnali proporzionali al livello raggiunto. Il grafico riportato in Fig. 23 riporta uno zoom del segnale nei giorni successivi all'evento principale P1.

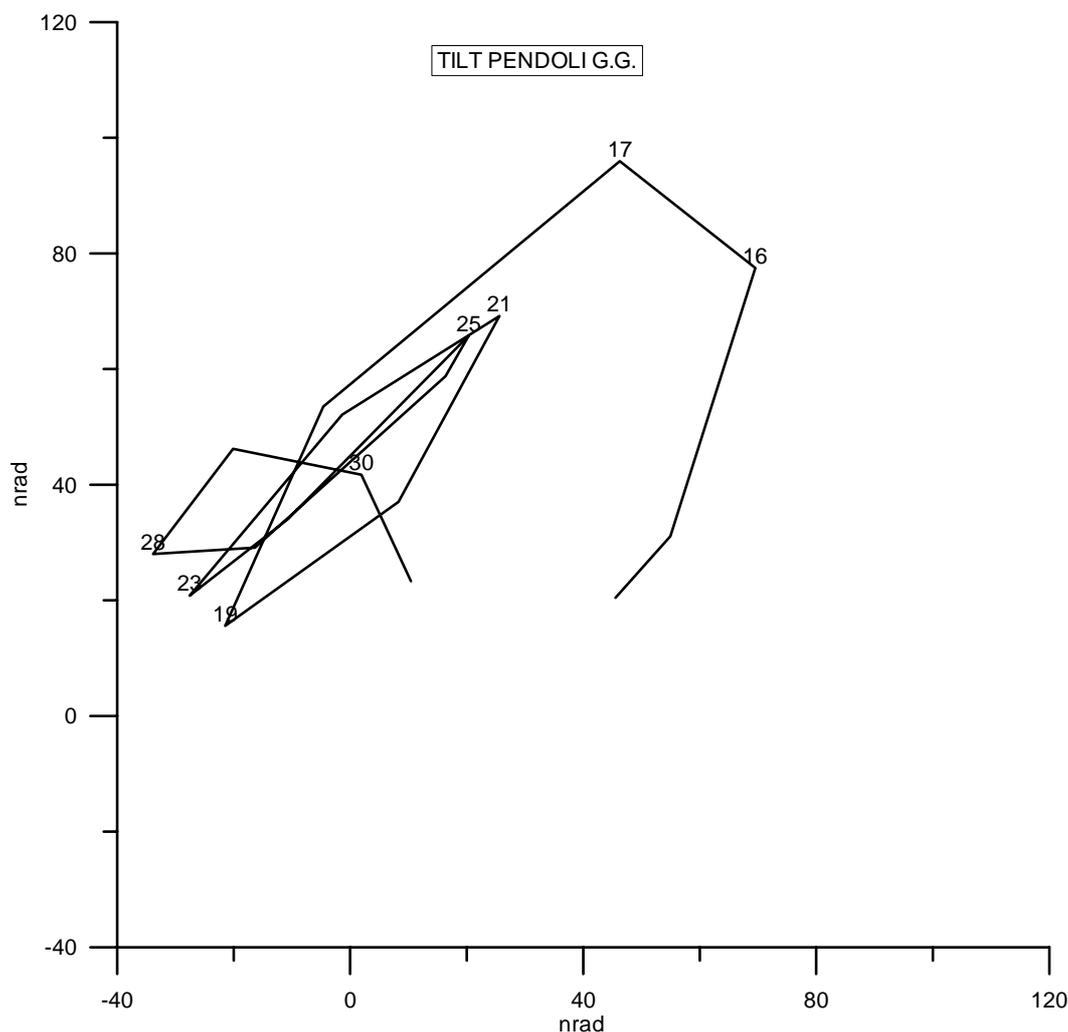


Fig. 23 Segnali di andata e ritorno indotti dalle piene successive alla prima.

Il grafico comincia il quattordicesimo giorno e rappresenta quindi l'ultima parte del segnale di recupero indotto dalla prima piena. Il secondo picco d'acqua avviene il quindici marzo 2001, al diciottesimo giorno, mentre si nota che già il diciassettesimo giorno il movimento del tilt lascia la fase finale del segnale di recupero e si dispone per l'inizio del segnale di andata della seconda piena. Tale evento non ha superato il livello massimo ed è stato misurato con 35,53 metri; il pendolo lo sente il diciannovesimo giorno con ampiezza di andata di 105,081 nrad calcolata dal diciassettesimo al diciannovesimo giorno. L'ampiezza di ritorno viene calcolata dal diciannovesimo al ventunesimo giorno con 71,072 nrad di ampiezza. Il 19 marzo il terzo picco è stato misurato uguale a 31,12 metri, al ventitreesimo giorno. Il pendolo lo sente lo stesso giorno mostrando quindi una strana coincidenza nei tempi di reazione (si tenga presente che sono valori giornalieri e quindi si potrebbe avere un ritardo di dimensioni orarie non apprezzabile in questo studio). Le ampiezze di andata e di ritorno sono 71,90 e 65,74 nrad, rispettivamente calcolate dal ventunesimo al ventitreesimo giorno e dal ventitreesimo giorno al venticinquesimo giorno. L'ultimo picco avviene il ventisettesimo giorno e il pendolo lo sente con un giorno di ritardo. Il dislivello è 24,34 metri e l'oscillazione di andata, calcolata da venticinquesimo al ventottesimo giorno, è di 66,09 nrad; quella di ritorno, calcolata dal ventottesimo al trentesimo, di 38,24 nrad. E' stato riportato questo evento perché molto rappresentativo della relazione ampiezza di tilting e livello dell'acqua. Non si sono potute fare considerazioni a riguardo dei ritardi di chiusura dei cicli dei pendoli essendo tutti

gli eventi quasi consecutivi. Le direzioni dei segnali di andata e di ritorno sono tutte molto coerenti fra loro, con valori mediati pari a: N151W in andata e N47E in ritorno.

EVENTI DEL 23 GENNAIO E 5 FEBBRAIO 2003.

Nessuno dei due eventi, avvenuti il 23 gennaio ed il 5 febbraio 2003 ha superato il livello massimo di saturazione. Il primo è stato fatto corrispondere all'ottavo giorno con un livello raggiunto pari a 36,73 metri (P1). I pendoli lo sentono con due giorni di ritardo, raggiungendo l'escursione massima di inclinazione verso SW il decimo giorno. E' rilevabile un anticipo di 2 dell'inizio del segnale di tilt rispetto all'inizio della piena. L'ampiezza di andata è di 75,96 nrad. ed è stata calcolata dal quarto al decimo giorno. L'ampiezza di ritorno invece è di 137,614 nrad. calcolata dall'undicesimo al sedicesimo giorno. In questo caso il segnale del pendolo ha riportato un ritardo di quasi cinque giorni, dovuto alle ultime acque in fase di deflusso. La seconda piena (P2) arriva il ventunesimo giorno con 36,73 metri. Il pendolo la sente il ventitreesimo con 2 giorni di ritardo. L'ampiezza di andata è calcolata dal 16° al 23° giorno ed è di 161,9 nrad. quella di ritorno 111,4 calcolata dal 23° al 31° giorno. Va sottolineato il grande ritardo in chiusura: quasi sei giorni per questo evento.

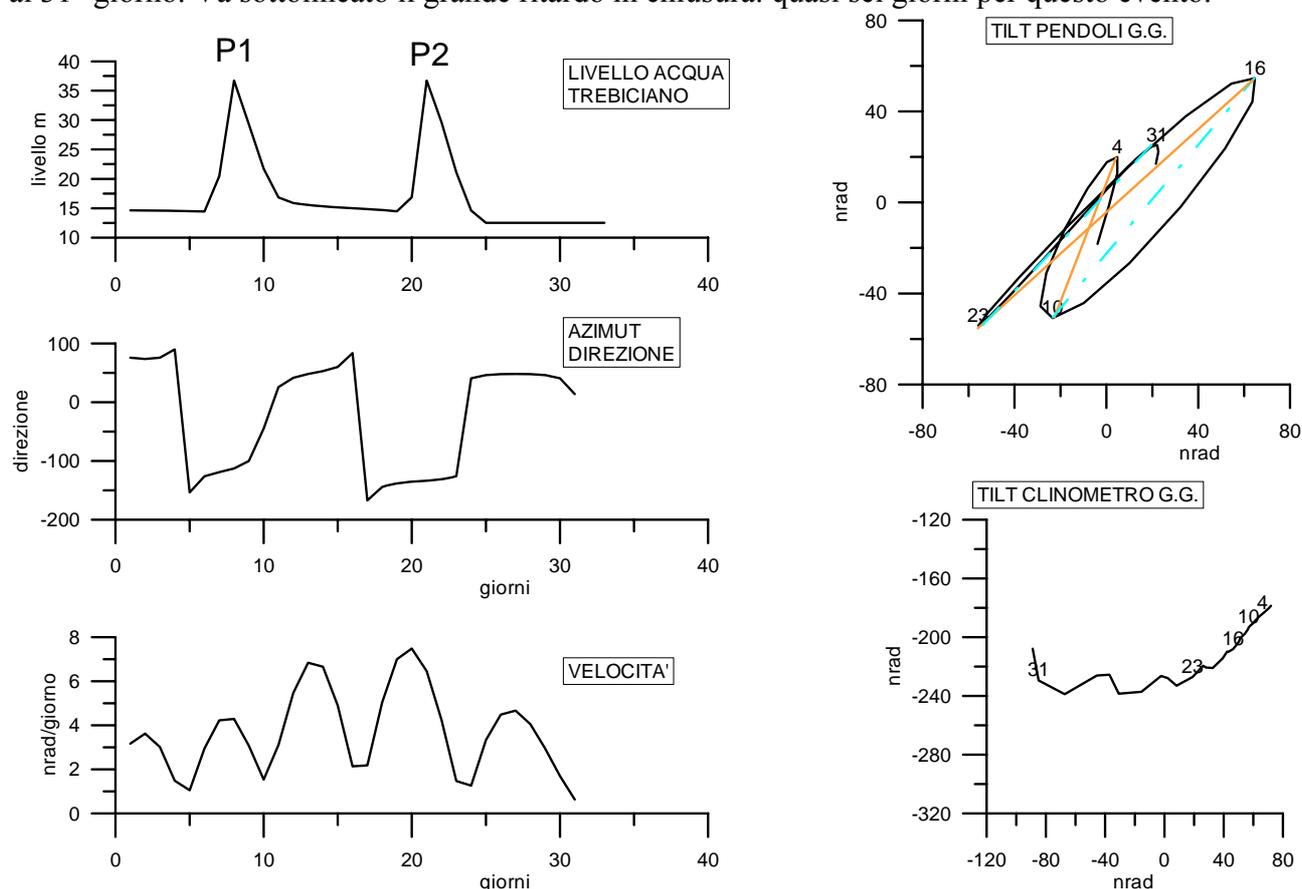


Fig. 24 Rappresentazione degli eventi multipli di piena del Timavo e del segnale indotto su pendoli e clinometri della Grotta Gigante, in analogia alla Figura 22. Evento multiplo del 23 gennaio (P1) e 5 febbraio (P2).

5.6 Relazione ampiezza livello dell'acqua

Per gli eventi di piena che non hanno superato il livello di saturazione delle sonde nell'Abisso di Trebiciano, è stato possibile studiare una relazione con le ampiezze di escursione indotte nel

segnale dei pendoli. I sei eventi i cui livelli non hanno saturato i campionamenti delle sonde nell'Abisso di Trebiciano sono rappresentati dalle croci nere. L'ampiezza del segnale di inclinazione è pari alla media tra il segnale di andata e di ritorno per ogni evento di piena considerate sono ottenute dalle medie tra le ampiezze del segnale di andata e di ritorno per ogni evento di piena. Per ogni punto è riportata una barra di errore rappresentante l'incertezza riguardo al valore dell'ampiezza. I cerchi rossi rappresentano gli eventi che hanno saturato la misura delle sonde hanno tutti il valore di saturazione di 41.7 metri. La retta di regressione risulta pari a :

$$Y = 0.098 * X + 23.34$$

Nel grafico essa e' rappresentata dalla linea verde. Tale relazione assegna una valore di 23.24 metri come minimo percettibile dai pendoli della Grotta Gigante.

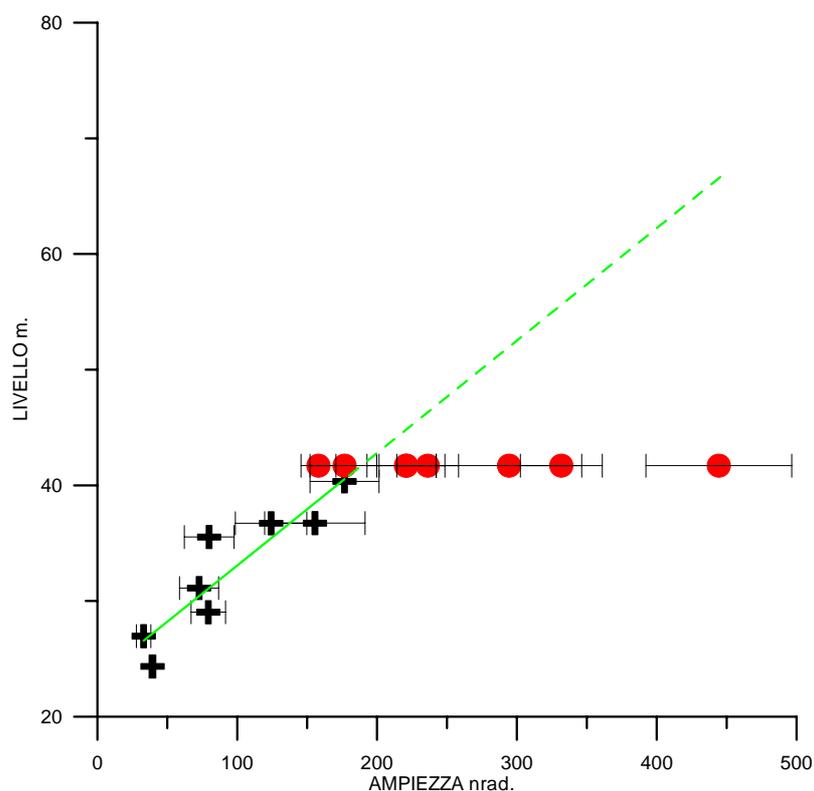


Fig. 25 Relazione fra l'ampiezze di inclinazione generata nella grotta Gigante dalle piene del fiume Timavo osservate nell'Abisso di Trebiciano. Crocette: eventi di piena che non hanno saturato la strumentazione. Punti rossi: eventi di piena che hanno superato o raggiunto il livello di saturazione pari a 41.7 metri di livello dell'acqua. L'incertezza nella stima dell'ampiezza del segnale clinometrico è indicato dagli intervalli orizzontali. La retta verde indica la retta di regressione, che nella parte tratteggiata permette di stimare il livello delle piene oltre il livello di saturazione.

5.7 Conclusioni.

Lo scopo di questa tesi è trovare e stimare le deformazioni crostali indotte dal peso delle acque sotterranee del Carso triestino. A tal fine si sono considerati i segnali geodetici dei pendoli e dei clinometri della Grotta Gigante e i valori di livello del fiume Timavo nell'abisso di Trebiciano.

Si è potuto riscontrare che in periodi di piena viene associato un caratteristico segnale di tilt della Grotta Gigante. Tale segnale è caratterizzato da una forte inclinazione verso SW (un valore medio di N156W) e da un successivo recupero dell'inclinazione. Si sono considerati i migliori segnali in termini di inizio e fine della deriva e costanza di direzione avvenuti in concomitanza di eventi di piena segnalati nell'Abisso di Trebiciano. Per questi si è fatta una stima delle direzioni e di velocità di spostamento di tilt dovute alle piene del Timavo. Da queste stime si è realizzato che la velocità di deformazione è minima nei punti di cambiamento di direzione, dovuti all'inizio e alla fine dell'effetto delle acque di piena. La velocità è massima nei tratti intermedi, dove l'effetto delle acque porta a deformare l'intera Grotta Gigante. Tale inclinazione è stata rilevata meglio dai pendoli che non dai clinometri; fenomeno che può trovare risposta considerando il tipo di deformazioni che i due strumenti misurano. I pendoli, essendo fissati rispettivamente alla volta e alla base della grotta registrano le deformazioni subite dall'intera cavità, mentre i clinometri, vincolati solo al fondo, registrano unicamente le inclinazioni della base della grotta.

Interpretando la deformazione indotta dalle piene come una rotazione, la direzione di inclinazione verso SW inoltre può indicare che il corso del Timavo passi a SW della Grotta Gigante, percorso confermato anche da studi geomorfologici che reputano la parte a Nord della Grotta Gigante meno carsificabile e non interessata dalle acque del Timavo. Analizzando i percorsi tracciati dai pendoli si sono fatte una serie di ulteriori considerazioni riguardo i tempi di reazione della deformazione rispetto all'innalzamento dei livelli dell'acqua. Da tale analisi si è realizzato che certi segnali cominciavano prima degli eventi di piena osservati a Trebiciano.

Questo fenomeno può essere spiegato considerando l'effetto di altre acque che influenzano il segnale dei pendoli, rispetto quelle provenienti da Trebiciano.

E' stata fatta una correlazione tra il valore di livello dell'acqua registrato sul fondo dell'Abisso di Trebiciano e le ampiezze del segnale indotto nei casi di piene che non hanno superato il livello massimo di misurazione dello strumento. La relazione è quasi lineare e assegna un valore di circa 23.24 metri (riferiti al m.s.l. oppure a piene con un minimo di 12 metri di escursione) di livello dell'acqua nell'Abisso di Trebiciano come minimo percettibile dai pendoli della Grotta Gigante. Da tale relazione si può assegnare un inclinazione di 100 nano radianti a ogni 9.7 metri di variazione del livello del fiume Timavo misurato nell'Abisso di Trebiciano.

Lo studio si poneva come obiettivo la definizione delle relazioni fra i segnali idrologici misurati a Trebiciano e quelli geodetici misurati nella Grotta Gigante: queste relazioni sono state trovate e quindi si possono considerare i pendoli della Grotta Gigante come uno strumento utile a nuove considerazioni sul percorso del fiume Timavo.

5.8. Appendice

Si riportano in Tabella 2 i periodi per i quali non sono disponibili dati di livello del fiume Timavo nell'Abisso di Trebiciano a seguito di manutenzione/ riparazione degli strumenti.

| | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 21.06.1999 – 25.06.1999 | 23.11.1999 – 27.11.1999 | 10.06.2000 – 26.11.2000 |
| 14.11.2001 – 28.12.2001 | 15.03.2002 – 17.04.2002 | 15.09.2002 – 16.09.2002 |
| 10.02.2003 – 27.02.2003 | 01.03.2003 – 09.06.2003 | 23.09.2003 – 29.09.2003 |
| 01.10.2003 – 10.11.2003 | 14.07.2005 – 13.09.2005 | |

5.9. Bibliografia del Capitolo 5.

Braitenberg C., Zadro M. (1999). *The Grotta Gigante horizontal pendulums –instrumentation and observations*. Boll. Geof. Teor. Appl., 40, 577-582.

Braitenberg C., Nagy I., Papacchioli S. (2004). *I pendoli della Grotta Gigante*. Rassegna Tecnica del Friuli Venezia Giulia, anno LV, 16-20.

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 and Sun (Eds.), Hubei Science and Technology Press, Wuhan, 457-462.

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 28°, 60-69.

Carulli G.B., Cucchi F. (1991). *Proposta di interpretazione strutturale del Carso triestino*. Atti Ticinensi di Scienze della Terra, 161-166.

Casagrande G., Cucchi F., Zini L. (2003). *Monitoraggio in continuo di acque carsiche e interpretazione idrodinamica dei dati: alcuni casi nel Carso Classico*. Atti Convegno Nazionale "L'ambiente carsico e l'uomo", Cuneo, 63-72.

Cucchi F., Giorgetti F., Marinetti E., Kranjc A. (1997). *Experiences in monitoring Timavo River (Classical Karst)*. Tracer Hydrology ed. Kranjc. Bolkema, Rotterdam. May 26-31, 1997, 213-218.

Cucchi F., Marinetti E., Zini L. (1998). *Monitoraggio in continuo della acque carsiche presso le sorgenti del Livenza e del Timavo*. Atti Convegno Nazionale Inquinamento delle grotte e degli acquiferi carsici e possibili ricadute sulla collettività, Ponte di Brenta (PD), 26-27 Settembre 1998, 63-72.

Cucchi F., Casagrande G., Manca P., Zini L. (2001). *Il Timavo ipogeo tra l'Abisso di Trebiciano e la Grotta Meravigliosa di Lazzaro Jerko*. Le Grotte d'Italia, 2, 39-48.

Cucchi F., Zini L., (2007). *La acque del Carso Classico*. L'acqua nelle aree cariche in Italia, a cura di Cucchi F., Forti P., Sauro U., Mem. Ist. It. Spel., 19, 33-40.

Crevatin G., Cucchi F., Marinetti E., Zuppin C. (1999). *Strumentazione per il monitoraggio in continuo di acque carsiche*. Mondo sotterraneo, 1-2, 13-24.

Fabian M., Kämpel H.-J. (2003). *Poroelasticity: observations of anomalous near surface tilt induced by ground water pumping*. Journal of Hydrology, 281, 187-205.

Forti F., Semerario R., Ulcigrai F. (1978). *Carsogenesi e geomorfologia dell'Abisso di Trebiciano*. Atti e memorie della Commissione Grotte "Eugenio Boegan", vol. XXVIII, 49.

Glavina M., Comello L. (2006). Rilievi della Grotta Gigante.
<http://www.catastogrotte.it/rilievi.php?ID=2>. Consultato ottobre 2009.

Gabrovšek F., Peric B. (2006). *Monitoring the flood pulses in the epiphreatic zone of karst aquifers: The case of Reka river system, Karst plateau, SW Slovenia*. Acta Carsologica 35/1, 35–45.

Longuevergne L., Florsch N., Boudin F., Oudin L., Camerlynck C. (2009). *Tilt and strain deformation induced by hydrologically active natural fractures: applications to the tiltmeters installed in Sainte-Croix-aux-Mines observatory (France)*. Geophys. J. Int. 178, 667-677.

Restaino M., Radovan R. (2005). Rilievi dell'Abisso di Trebiciano.
<http://www.sastrieste.it/SitoSAS/images/Abisso1.jpg>. Consultato ottobre 2009.

Rerolle T., Florsch N., Llubes M., Boudin F., Longuevergne L. (2006). *L'inclinométrie, un nouvel outil pour le suivi temporel des aquifères?*. Comptes Rendus Geoscience, 338, 775-786.

Romeo G. (2000). *Digitization of optical lever instruments*. Annali di Geofisica, 34, 545-557.

6 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.

7 Riferimenti bibliografici per i capitoli 1-4

- 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.

8 Pubblicazioni recenti del gruppo di lavoro (dal 2004)

- 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., Roullet 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
- Mariani P., Braitenberg C., Antonioli F. (2009) Sardinia coastal uplift and volcanism, *Pageoph*, 166, 1369-1402, DOI: 10.1007/s00024-009-0504-3, (PDF file, 1.14 MB)
- Antonioli F., Ferranti L., Fontana A., Amorosi, A. M., Bondesan A., Braitenberg C., Dutton A., Fontolan G., Furlani S., Lambeck K., Mastronuzzi G., Monaco C., Spada G., Stocchi P. (2009) Holocene relative sea-level changes and vertical movements along the Italian and Istrian coastlines, *Quaternary International*, 206, 102-133, Available online 11 December 2008, ISSN 1040-6182, DOI: 10.1016/j.quaint.2008.11.008., (PDF file, 2,6 MB)

- Braitenberg C., Ebbing J. (2009) The GRACE - satellite gravity and geoid fields in analysing large - scale, cratonic or intracratonic basins, *Geophysical Prospecting*, 57, 559-571, doi: 10.1111/j.1365-2478.2009.00793.x .
- Braitenberg C., Ebbing J. (2009) New insights into the basement structure of the West Siberian basin from forward and inverse modelling of GRACE satellite gravity data, *Journal of Geophysical Research*, 114, B06402, 1-15, doi: 10.1029/2008JB005799 .
- Gimenez M.E., Braitenberg C., Martinez M. P., Introcaso A. (2009). A comparative analysis of seismological and gravimetric crustal thicknesses below the Andean Region with flat subduction of the Nazca Plate. *International Journal of Geophysics*, Volume 2008, 8 pages, doi:10.1155/2009/607458,

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.
- Grillo B., Braitenberg C., Nagy I., Piccin A. (2009) Tilting tra il Friuli-Venezia Giulia ed il Veneto dal 2006 al 2008, *Atti del 3° Congresso Nazionale AIGA - Centro di GeoTecnologie, Università di Siena*, Università di Siena, San Giovanni Valdaro (AR), 25-27 Febbraio 2009.

9 Seminari di divulgazione inerenti a osservazioni clinometriche ed alla Grotta Gigante e non solo 2008-2009

20 febbraio 2008 Aula Magna del Liceo "Copernico" di Udine.

Carla Braitenberg: I cambiamenti climatici nella storia della Terra: cause naturali e antropiche.

04-05 Aprile 2009 Esercitazione di Protezione Civile a Fregona

Barbara Grillo: Perché la terra trema sotto il Cansiglio ?

5 Giugno 2009 ore 21:00 Istituto Scolastico LUZZATTI Vittorio Veneto (TV)

Barbara Grillo, Riccardo Rossi: Rischio sismico nel Nordest

17-24 Agosto 2009 Convegno per il Gemellaggio di Protezione Civile tra Gruppo Lucano e Friuli Venezia Giulia

Barbara Grillo: Rischio sismico nel Nord Est e applicazioni ad uso di Protezione Civile

29 Ottobre 2009 Sala parrocchiale di Oderzo
Barbara Grillo: Rischio sismico nel Nord Est. Perché la terra trema tra Veneto e Friuli (ieri e oggi)?

Visite guidate scientifiche in Grotta Gigante con seminario divulgativo nel 2009:

20 Marzo 2009, Liceo Scientifico "Belfiore" di Mantova Prof.ssa Tonelli. 60 studenti
Carla Braitenberg:

22 Luglio 2009 ICTP - Centro di Fisica Teorica, Trieste. Escursione nell'ambito del Convegno Internazionale From Core to Crust: Towards an Integrated Vision of Earth's Interior, July 20—24, 2009.

Carla Braitenberg: Grotta Gigante Ultra broadband Geodetic station.

Videoregistrazione: http://www.ictp.tv/eya/core2crust2009/roomG/2009/07/22/2009.07.22_14.00-14.59.zip

27 Agosto 2009 ICTP- Centro di Fisica Teorica, Trieste. Escursione nell'ambito del Convegno Advanced Workshop on Evaluating, Monitoring and Communicating Volcanic and Seismic Hazards in East Africa, 17—28 August, 2009

Carla Braitenberg: Grotta Gigante Ultra broadband Geodetic station.

Videoregistrazione: http://www.ictp.tv/eya/smr2053/roomG/2009/08/27/2009.08.27_14.00-14.59.zip

2 ottobre 2009 GIMNAZIJA BEZIGRAD di Ljubljana, Prof. Mitja Rosina e prof.ssa Florjana Zigon, escursione premio per 45 studenti di eccellenza.

Daniele Tenze: Deformations at the northern border of the Adria Plate and the Grotta Gigante geodetic station