

Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan"	Vol. 43	pp. 41-55	Trieste 2011
---	---------	-----------	--------------

DANIELE TENZE^(*), CARLA BRAITENBERG^(*),
ILDIKÒ NAGY^(*), FRANCO CUCCHI^(*)

DEFORMAZIONI INDOTTE DA FLUSSI IDRICI SOTTERRANEI NEL CARSO TRIESTINO

RIASSUNTO

Il Carso Classico è un vasto areale a carso maturo sviluppato in una potente idrostruttura, caratterizzata da intensa e diffusa carsificazione anche ben al di sotto del livello del mare. La zona satura è potente ed estesa con una zona di oscillazione che verso monte raggiunge il centinaio di metri di spessore durante le piene importanti, come risulta dagli strumenti posizionati nell'Abisso di Trebiciano, circa 20 km in linea d'aria dalle sorgenti.

Fra l'Abisso di Trebiciano e le foci, a circa 12 km da queste ultime, si apre la Grotta Gigante, all'interno della quale, dal 1960, è presente una stazione geodetica per la registrazione delle deformazioni cristalli.

Si analizzano le deformazioni indotte dalle variazioni di livello delle acque di fondo del Carso confrontando i dati geodetici della Grotta Gigante con quelli idrologici dell'Abisso di Trebiciano. Analizzando i dati con campionamento giornaliero, si riconosce una correlazione fra il segnale clinometrico e le piene; i due segnali hanno sfasamento temporale massimo di un giorno. Il segnale clinometrico è un transiente, per cui il clinometro torna alla posizione iniziale successivamente al passaggio della piena ed ha un'orientazione caratteristica lungo la direttrice N150W-N30E. Il segnale clinometrico è proporzionale al livello raggiunto nell'Abisso di Trebiciano (100 nrad di inclinazione corrispondono a 9.7 m di incremento di livello). Le piene nell'Abisso di Trebiciano devono superare 23.2 m, per provocare il segnale clinometrico a Grotta Gigante.

ABSTRACT

CRUSTAL DEFORMATION DUE TO FLOODS OF THE UNDERGROUND TIMAVO RIVER

The Classical Karst is a vast area of a mature Karst system that has a well developed hydrostructure, characterized by a diffuse Karstification that protrudes also below the sea level. The water saturated zone can reach up to 100 m of oscillation during high levels as has been demonstrated by the tide gauge installed in the Trebiciano Abyss, about 20 km distant from the springs. The area is characterized by a high number of natural cavities and by the complex underground flows of the Timavo river. The Timavo can be seen in some of the cavities, as for example the Trebiciano Abyss, which is equipped with instruments that measure the water level.

^(*)Dipartimento di Geoscienze dell'Università degli Studi di Trieste, via Weiss 2, I-34100 Trieste.

From Trebiciano, moving 12 km towards the delta of the Timavo, the Grotta Gigante Cave is located, untouched by the course of the river. Inside the cave, since 1960 a tiltmeter station has recorded the crustal deformation continuously.

The aim of this work is to determine whether the water level of the Timavo has an impact on the crustal deformation and the Karst system and to gain more information about the underground Timavo course, still partly unknown. For this purpose we analyze and compare the tilt data from Grotta Gigante cave with the hydrologic measurement from the Trebiciano Abyss. Analyzing the daily sampled data we find a clear correlation between the hydrologically induced tilt signal and the high levels in the Trebiciano Abyss with a maximum phase shift of a day. The tilt signal has a characteristic orientation (N150W-N30E). The induced tilt is a transient, as the deformation returns to its state previous the hydrologic event. The relation between tilt amplitude and water level in Trebiciano Abyss is linear (100 nrad of inclination each 9.7 meters of level variation). There is a threshold value of 23.2 meters for the water level increase in the Trebiciano Abyss, below which no tilt signal is observed.

Introduzione

Oggetto di questo lavoro è l'analisi delle relazioni fra il regime delle acque sotterranee del Carso Classico ed il segnale clinometrico registrato dai pendoli orizzontali della Grotta Gigante (MARUSSI, 1960; BRAITENBERG e ZADRO, 1999; BRAITENBERG, 1999). I pendoli della Grotta Gigante sono sensibilissimi strumenti atti ad osservare la componente di deformazione crostale data dalla deformazione di taglio e dalla inclinazione del suolo. La deformazione di taglio può essere osservata grazie alla particolare costruzione degli strumenti, che riescono a rilevare spostamenti relativi anche minimi fra l'attacco alto, fissato alla volta della grotta, e l'attacco basso, fissato sul fondo della grotta. I due attacchi, quello basso e quello alto, si muovono nello spazio seguendo la rotazione della grotta o le sue deformazioni. Le cause che possono provocare tali deformazioni sono molteplici e comprendono gli effetti del movimento della placca Adria, le oscillazioni libere, le maree terrestri, le onde sismiche, il carico delle maree marine dell'Adriatico, gli effetti termoelastici e i movimenti delle acque sotterranee. Gli studi eseguiti su oltre quarant'anni di registrazione clinometrica hanno portato a distinguere le diverse cause e a stimare in parte l'entità della loro influenza (e.g ZADRO e CHIARUTTINI, 1975; ZADRO e BRAITENBERG, 1999; BRAITENBERG e ZADRO, 1999; BRAITENBERG, 1999; BRAITENBERG *et al.*, 2001; BRAITENBERG *et al.*, 2006).

Nella presente nota si intende caratterizzare l'effetto delle acque e ribadire l'utilità dei pendoli installati nella Grotta Gigante nello studio dell'idrodinamica del Carso Classico. Le acque prese in considerazione sono quelle che alimentano il reticolo sotterraneo carsico, le cosiddette acque di fondo del fiume Timavo (vedi Fig. 1).

Inquadramento

Il Carso Classico è un'area di 900 km² circa, che si estende a SE dell'Isonzo fino a Postojna e a Škocjan. Nell'area sono presenti in gran numero e con notevoli dimensioni tutte le forme carsiche epigee ed ipogee, a tal punto da aver fatto dell'area il simbolo delle fenomenologie carsiche. Nel settore del Carso italiano, un'area di circa 200 km², sono conosciute più di 3.500 cavità, alcune delle quali hanno sviluppo orizzontale e/o verticale notevole.

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, eocenica al tetto (spessore fino a 2000 metri), sovrastata da un'altra, eocenica, in facies di flysch, entrambe disposte ad anticlinale debolmente asimmetrica con asse NW-SE.

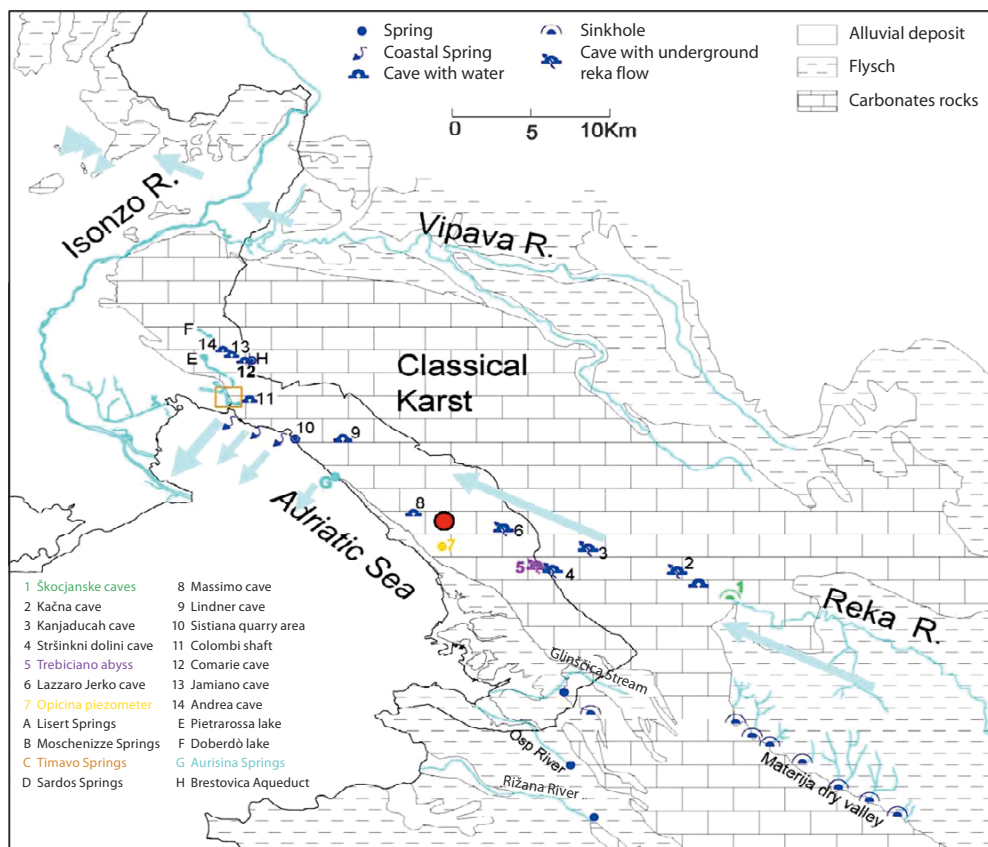


Fig. 1 – Il Carso Classico e i punti acqua monitorati dal DiGEO. Le frecce azzurre rappresentano l'andamento delle acque sotterranee. In rosso è segnata la Grotta Gigante, in viola l'Abisso di Trebiciano (da CUCCHI *et al.*, 2001).

Il fianco sud-occidentale dell'anticlinale si affaccia sul golfo di Trieste determinando il margine dell'altopiano: una serie di sovrascorrimenti ad andamento NW-SE porta l'unità (la cosiddetta Unità di Comeno; PLACER, 1981) a sovrastare la successione torbiditica. Nelle zone di Duino e Monte Grisa i termini carbonatici sono da molto inclinati a sub verticali o rovesciati, mentre all'interno dell'altopiano (dove tra l'altro sono ubicati la Grotta Gigante e l'Abisso di Trebiciano) hanno inclinazioni tra i 10° e 30° verso SW (vedi Fig. 2). Sul fronte di sovrascorrimento che Placer (1981) stima avere un rigetto orizzontale di circa 4 km, il Flysch ha un assetto complesso legato anche all'azione di faglie SW-NE che traslano tratti dei sovrascorrimenti (CARULLI e CUCCHI, 1991; BENSI *et al.*, 2009).

All'interno dell'Unità di Comeno-Carso Classico si è sviluppato il reticolo del Timavo ipogeo. Il Timavo nasce con il nome sloveno di "Reka" al confine fra Slovenia e Croazia sulle pendici del monte M. Dletvo (GABROVŠEK e PERIC, 2006). Dopo aver percorso 40 chilometri su terreni silico-clastici si inabissa nell'area di Škocjan, nel maestoso complesso di gallerie sotterranee delle Škocjanske Jame, in territorio sloveno. Il percorso ipogeo dovrebbe avere indicativamente una lunghezza di 70-80 chilometri verso NW ma è sicuramente caratterizzato da uno sviluppo articolato, con frequenti variazioni di direzione di deflusso ed un complicato

reticolo secondario connesso alle vie d'acqua preferenziali; basti pensare che sul fondo dell'Abisso di Trebiciano le acque scorrono da Sud a Nord e sul fondo della Grotta Meravigliosa di Lazzaro Jerko da Est verso Ovest (CUCCHI *et al.*, 2001). Gran parte della rete di cavità è oggi sotto il livello del mare: sicuramente da Trebiciano alle foci, probabilmente già prima, le gallerie principali sono in condizione di acqua in pressione sifonante.

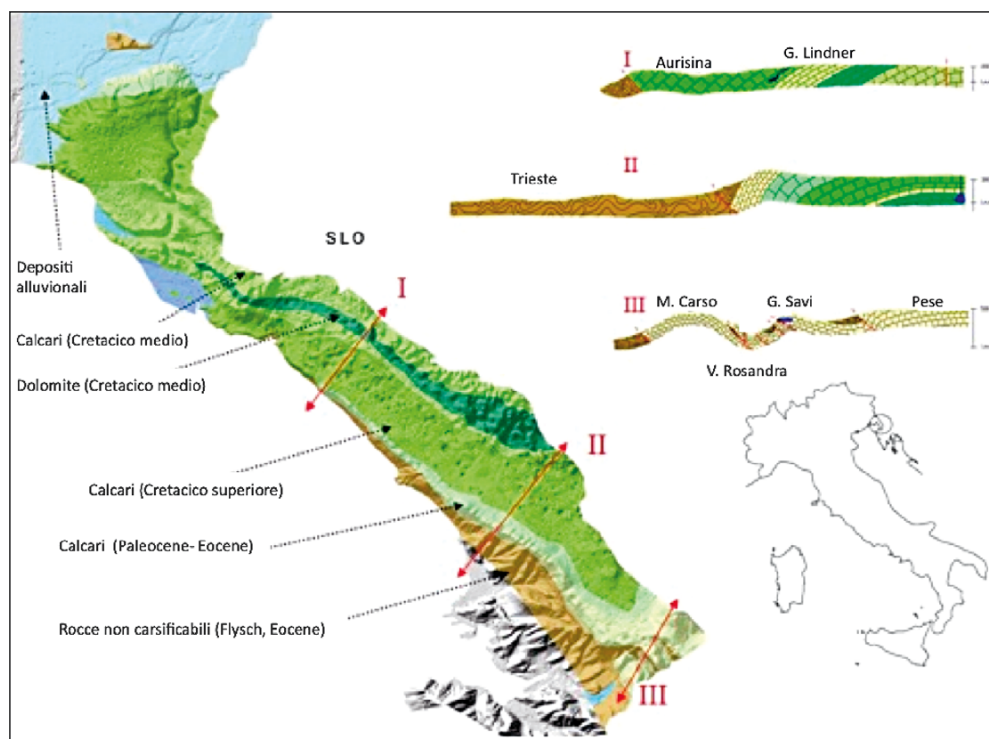


Fig. 2 – Geologia e sezioni geologiche del Carso Triestino (da CUCCHI e ZINI, 2007). L'Abisso di Trebiciano è all'estremo NE della Sezione II.

La stazione geofisica della Grotta Gigante

I pendoli orizzontali della Grotta Gigante sono stati installati in occasione dell'Anno Internazionale della Geofisica nel 1959 da Antonio Marussi (MARUSS, 1960) allo scopo di registrare tutte le deformazioni alle quali è sottoposto il substrato roccioso ed in particolare per lo studio delle maree terrestri. Per le loro grandi dimensioni e la estensione della serie temporale (la registrazione è continua dal 1964) i pendoli sono unici al mondo. I pendoli hanno una lunghezza di 95 metri e sono disposti in modo tale da sfruttare tutta la grandezza della cavità. Sono strumenti in grado di rilevare lo spostamento relativo orizzontale del punto di attacco superiore del pendolo rispetto al punto di attacco inferiore. La notevole lunghezza conferisce loro una grande stabilità ed un fattore di amplificazione naturale notevole. Rispetto a clinometri tradizionali di piccole dimensioni (base di osservazione dai decimetri a qualche metro) essi sono meno sensibili alle sorgenti di rumore, come pressione atmosferica e temperatura (e.g. BRAITENBERG, 1999; BRAITENBERG e ZADRO, 2001; BRAITENBERG *et al.* 2004; 2005). Oltre ai

pendoli, nel 1997 è stata installata una coppia di clinometri tradizionali di dimensioni di 0,5 metri. La differenza costruttiva è che i pendoli hanno l'attacco superiore fissato alla volta della grotta, mentre i clinometri poggiano con tre punti sul terreno. Questa differenza costruttiva è molto importante nella interpretazione dei segnali clinometrici registrati, in quanto la direzione del segnale può essere opposta nei due strumenti, a seconda del tipo di deformazione alla quale è sottoposta la grotta. Sia i pendoli che i clinometri sono pendoli a sospensione Zöllner (BRAITENBERG, 1999). Il principio di funzionamento viene chiamato "principio della porta da giardino": la massa del pendolo è disposta su un'asta tenuta sospesa orizzontalmente da due fili, uno superiore ed uno inferiore. Questi vincoli consentono all'asta di ruotare nel piano orizzontale attorno ad un'asse di rotazione virtuale che collega il punto di attacco superiore ed il punto inferiore. Le deformazioni o i movimenti agiscono sull'inclinazione dell'asse di rotazione virtuale. L'escursione dell'asta viene registrata con un angolo di diversi ordini di grandezza maggiore all'inclinazione dell'asse. Le due aste registrano rispettivamente la componente NS ed EW. Il movimento del pendolo viene registrato da un dispositivo ottico analogico che intercetta (con una campionatura di 30 campioni/sec) un fascio laser riflesso da uno specchietto montato sull'asta del pendolo (ROMEO, 2000). I dati acquisiti vengono registrati su un PC che consente un collegamento remoto.

La stazione idrogeologica dell'Abisso di Trebiciano

L'Abisso di Trebiciano, conosciuto fin dal 1841, e la Grotta Meravigliosa di Lazzaro Jerko, scoperta nel 2000, sono le due sole cavità in territorio italiano in cui appaiono tratti significativi del reticolo del Timavo (CUCCHI *et al.*, 2001). L'abisso è gestito dalla Società Adriatica di Speleologia ed ospita alcuni strumenti di monitoraggio delle acque installati dal Dipartimento di Geoscienze. La cavità consiste in una serie di pozzi che dopo 270 metri circa dal piano campagna, consentono l'accesso alla Caverna Lindner, vasto ambiente sul cui fondo, alla profondità di 329 metri dal piano campagna e quindi a 12 metri sul livello medio del mare scorre un ramo del Timavo. Fra il sifone d'entrata e quello di uscita, un tratto di circa 200 metri, le acque del fiume sotterraneo scorrono da NNW verso SSE. In prossimità del sifone d'uscita sono installati dal 1994 strumenti per la misura in continuo di livello, temperatura e conducibilità dell'acqua.

Dal 1994 ad oggi si sono utilizzati strumenti via via più affidabili e capaci; dal 2002 è operativa una sonda CTD-Diver della Ejkelkamp che misura, oltre a temperatura e conducibilità, l'altezza della colonna d'acqua sovrastante 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 (CASAGRANDE *et al.*, 2003; CUCCHI *et al.* 1997; 1998;). La precisione nominale fornita da questi strumenti è dell'ordine del centimetro per misure comprese fra 0 e 30 m, appena superiore per quelle fra 30 e 100 m. La quota alla quale sono posizionati gli strumenti è di 11.7 m s.l.m. corrispondente all'incirca al livello in magra del fiume.

Presentazione dei dati

Nella figura 3 sono rappresentate le serie temporali delle due componenti dei pendoli della Grotta Gigante dal 13 ottobre 1966 al 12 gennaio 2010. L'andamento a lungo periodo è costituito da una funzione oscillatoria del periodo di 33 anni e da una deriva lineare. Si osserva una variazione annuale, che produce un massimo tilting verso NE, mediamente tra il 4 e 7 ottobre, e un tilting in direzione opposta verso SW, mediamente tra il 7 e 10 aprile. Nella figura 4 la causa del segnale annuale è una combinazione tra effetti termoelastici e carico dell'Adriatico.

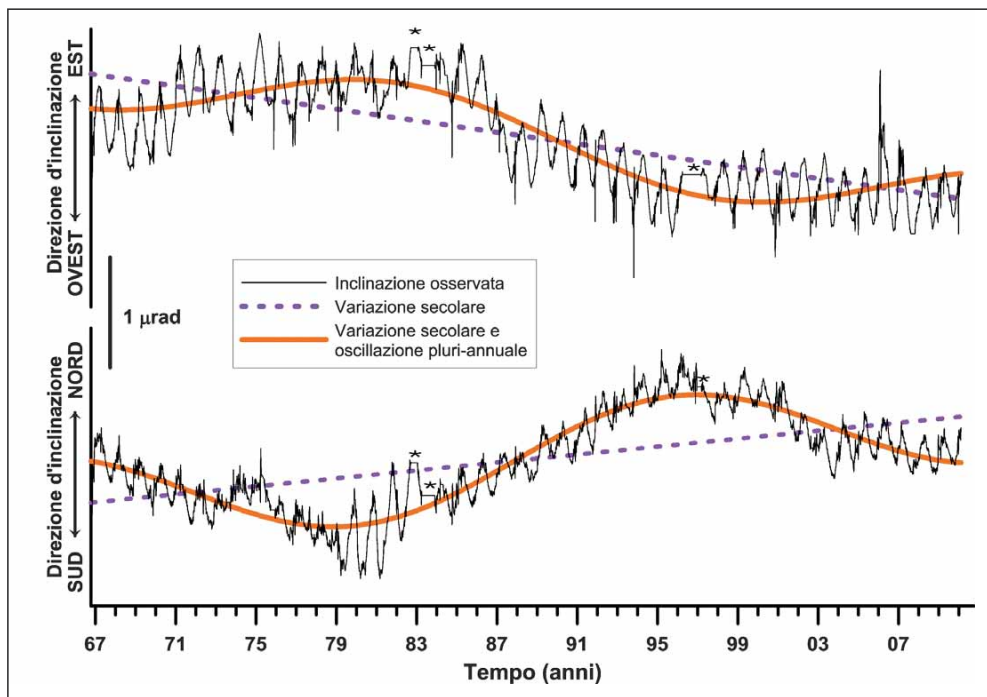


Fig. 3 – Rappresentazione della registrazione a lungo periodo delle due componenti NS ed EW dei pendoli della Grotta Gigante dal 13 ottobre 1966 al 10 gennaio 2010. I dati originali sono stati ricampionati ad un intervallo giornaliero, previo filtraggio passa basso per evitare fenomeni di aliasing.

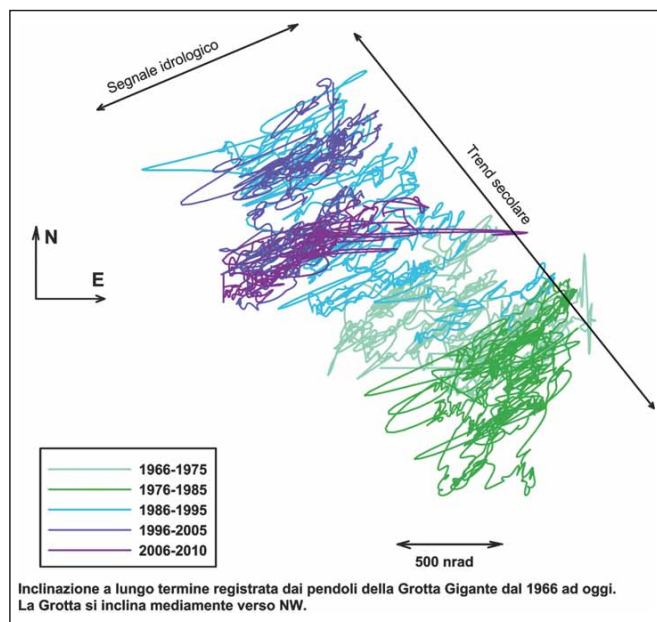


Fig. 4 – Inclinazione osservata nella Grotta Gigante (anni 1966-2010).

La variazione lineare risulta corrispondere ad una inclinazione con direzione N57W con un tasso di 27 nrad/a (per dettagli vedasi BRAITENBERG *et al.*, 2006). Il grafico rappresenta il tilting complessivo, dove la componente EW è riportata in ascisse e la componente NS in ordinata.

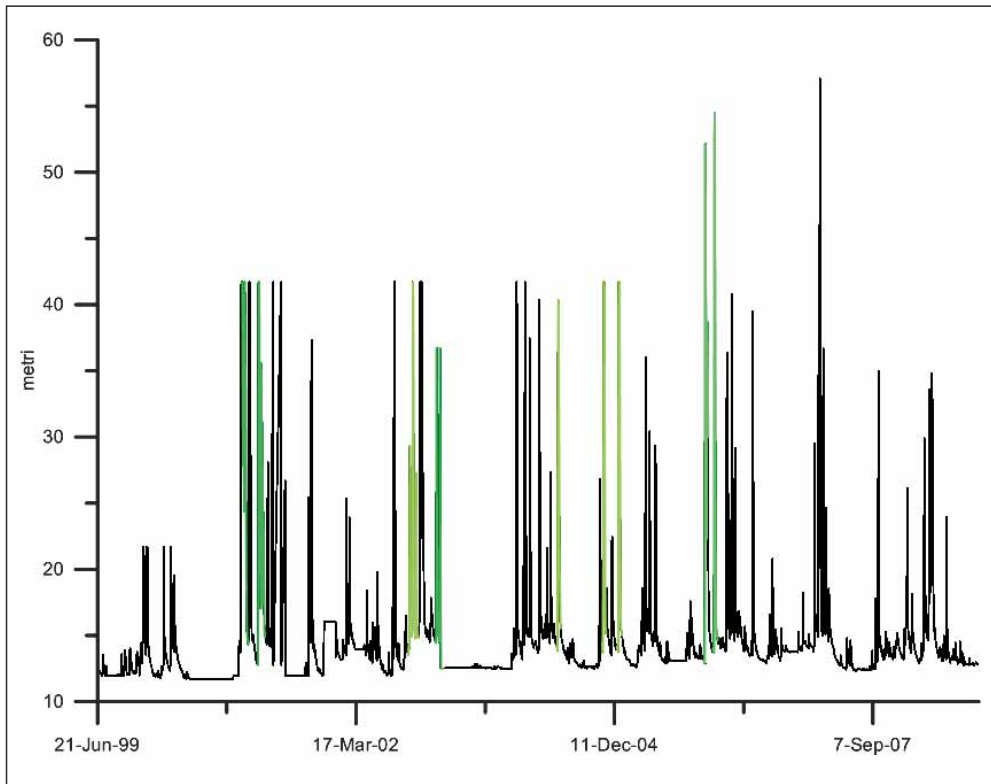


Fig. 5 – Oscillazioni del livello del fiume Timavo misurate nell’Abisso di Trebiciano dal 21 giugno 1999 al 16 ottobre 2008. I valori sono stati uniformati riferendoli al livello mare; per gli anni precedenti il 2005 avevano una saturazione strumentale a +41.7 metri. In verde chiaro gli eventi isolati, in verde scuro gli eventi multipli.

Sovrapposti al segnale annuale ed all’oscillazione con periodo di 33 anni si osservano i segnali di breve periodo, di forma anche impulsiva, che sono oggetto di studio del presente lavoro.

La figura 5 riporta le registrazioni del livello delle acque nell’Abisso di Trebiciano. Le sonde campionano i valori dei diversi parametri ogni mezz’ora. Dal momento che si è preso in considerazione un arco temporale di quasi dieci anni, per gestire meglio il database si è reputato sufficiente ricampionare la sequenza con un valore unico al giorno, ottenuto mediando i dati disponibili.

Per tutti gli eventi di piena, evidenziati in figura 5, per il confronto con il segnale del pendolo è stato scelto un intervallo temporale di una ventina di giorni a cavallo della piena. Nei due eventi di piena, avvenuti nel 2005 e nel 2006, gli strumenti di più recente installazione hanno potuto registrare l’intera escursione delle acque, rispettivamente pari a 52,51 m e 54,51 m. Nella figura sono evidenziati 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 in verde scuro eventi multipli, piene susseguitesi in un breve arco di tempo; gli eventi di piena multipli non sono riportati in dettaglio ma i loro valori di ampiezza d’inclinazione del tilting e i rispettivi livelli di piena a Trebiciano, sono inclusi nella figura 10.

Il segnale del pendolo

Si sono analizzati in dettaglio i dati dei pendoli della Grotta Gigante e le osservazioni del livello di acqua nell'Abisso di Trebiciano. Il periodo analizzato va dal 21 giugno 1999 al 16 ottobre 2008. Al fine di isolare i segnali di deformazione causati dalle piene del Timavo, sono state applicate diverse operazioni di trattamento del segnale. Per rimuovere le componenti a lungo periodo è stata tolta una deriva polinomiale di secondo grado stabilizzando il segnale e riportando i valori sullo zero (fig. 6-B); successivamente si è applicato un filtro di frequenza che elimina le periodicità maggiori di 300 giorni (fig. 6-C e 6-D).

Si sono poi eseguite le operazioni atte a ricavare i valori di direzione, velocità ed ampiezza del segnale clinometrico nei giorni interessati dalle piene.

I valori di velocità e direzione riguardanti un intervallo temporale a cavallo della piena sono stati riportati in grafico. Nella figura 8 sono riportati i risultati dell'evento di piena del 5 novembre 2002. Com'è ben visibile, il segnale complessivo determinato dalla piena si può suddividere in due fasi: segnale di andata e segnale di recupero (o di ritorno).

Nella prima fase il segnale si orienta verso SW adottando una direzione di N150°W (giorno 4 e punto A nel grafico della velocità ζ). La velocità nei punti di virata è minima e la direzione subisce un forte cambiamento (brusca discesa dal quarto al quinto giorno nel grafico della direzione, tratto verde). Successivamente (seconda fase ed inizio del segnale di andata) la direzione rimane pressoché costante dal quinto al settimo giorno (tratto verde nei grafici di direzione e velocità) e la velocità aumenta progressivamente. Questa fase finisce al punto massimo di velocità raggiunta (punto B nel grafico della velocità ζ). La terza fase (tratto viola), dal settimo al decimo giorno, è caratterizzata da una direzione pressoché costante ed uguale alla fase precedente. Essa 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 (decimo/undicesimo giorno nel caso in esame) la velocità di spostamento è minima ed il segnale abbandona la direzione N150W (punto C nel grafico della velocità ζ). La quarta ed ultima fase comincia dalla brusca variazione di direzione che determina la fine del segnale di andata. Nei segnali migliori come nell'esempio riportato, la direzione rimane quasi la stessa ma si ha il cambiamento di verso. Questa fase è chiamata anche segnale di ritorno o di recupero in quanto comporta il ritorno alle condizioni di partenza. Come si può vedere la velocità aumenta e la direzione poi viene gradualmente abbandonata per il finire dell'effetto delle acque.

La traccia dell'inclinazione nel tempo (in alto e a destra in figura 8 d) consente di definire i valori di ampiezza del segnale idrologico. Il segnale spesso mette in luce una marcata differenza tra le escursioni in andata e in ritorno, il che comporta la necessità di evidenziarle entrambe. Nel grafico 8 d la linea verde rappresenta l'ampiezza di escursione del segnale di andata, il tratto a punti verdi l'ampiezza di escursione del segnale di ritorno.

Il segnale del clinometro

Analizzato l'andamento del segnale dei pendoli nei giorni concomitanti gli eventi di piena registrati a Trebiciano sono stati selezionati otto eventi considerati rappresentativi in termini di direzioni assunte e tempi di reazione. Tali eventi sono raggruppati in un unico grafico (figura 9) che illustra l'andamento simile di tutti gli eventi, i due segnali di andata e ritorno e le rispettive pressoché simili direzioni assunte. Inoltre è possibile stimare gli anticipi ed i ritardi medi di reazione del sistema, nonché le ampiezze di escursione di oscillazione indotte dalle piene del sistema idrico sotterraneo. Le linee color senape tratteggiate evidenziano il campo di direzioni assunte dai segnali di andata che oscillano tra -135° e -174°, mentre quelle amaranto evidenziano il gap delle direzioni assunte dai segnali di ritorno che oscillano tra 25° e 58°.

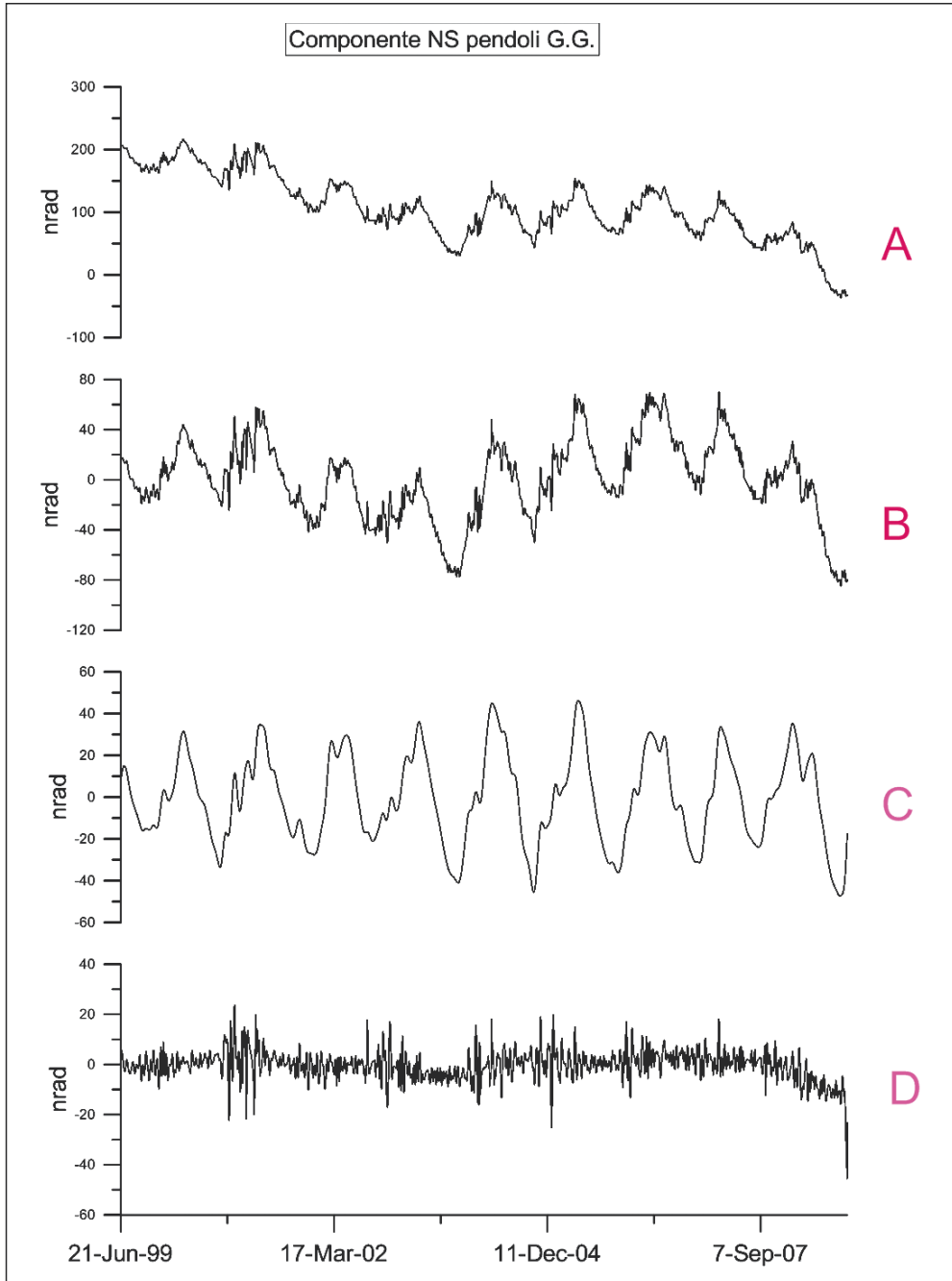


Fig. 6 – Le diverse fasi del trattamento del segnale per isolare il segnale idrogeologico. A: registrazione originale. B: dati originali meno una deriva polinomiale. C: il segnale annuale ottenuto da successivo filtraggio con filtro passa alto, per eliminare le basse frequenze (Periodo > 400 d). D: il segnale utilizzato nello studio.

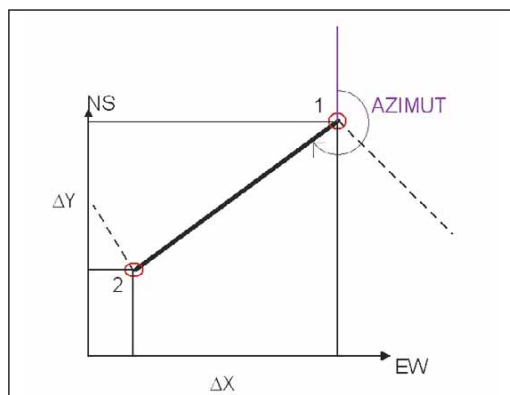


Fig. 7– Esempio di grafico rappresentante il movimento di tilting. Nella figura l'asse delle ascisse corrisponde ai valori della componente Est-Ovest del pendolo, l'asse delle ordinate corrisponde ai valori della componente Nord-Sud. Supponiamo che la registrazione assuma in due giorni successivi prima la posizione indicata con il numero 1 e successivamente la posizione 2. Definiamo il vettore d'inclinazione che unisce i due punti 1 e 2, con le componenti Δx e Δy , che avrà una ampiezza ed una direzione. Definiamo la direzione dell'inclinazione dal valore di azimut, pari all'angolo orario del vettore rispetto a nord. Il modulo del vettore è pari alla velocità dell'inclinazione calcolata in nrad per giorno.

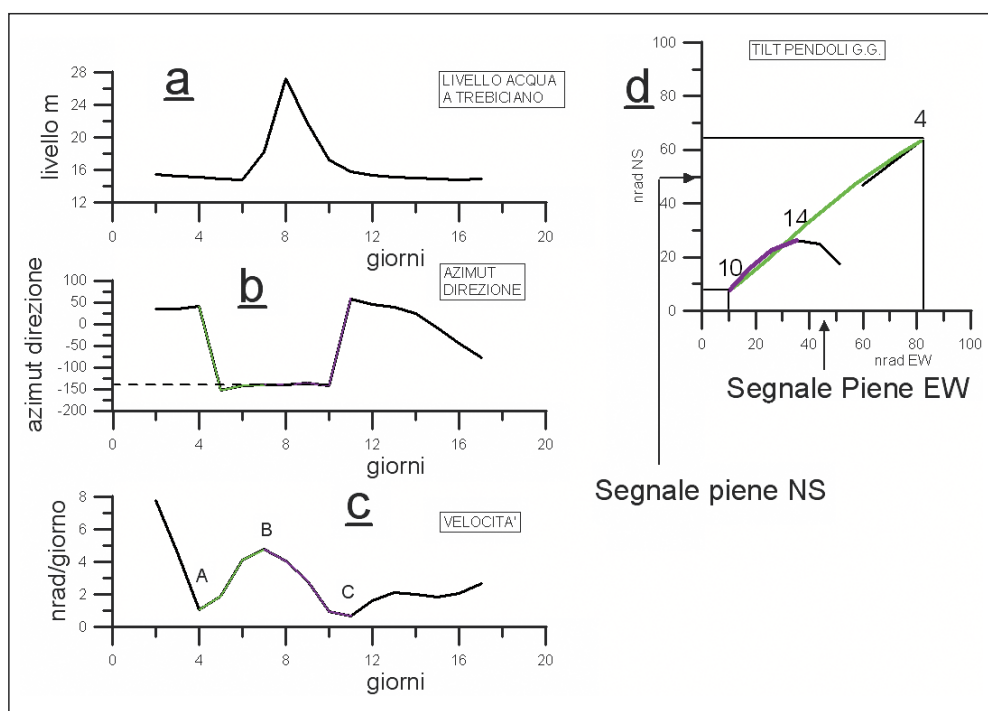


Fig. 8 - Le rappresentazioni utilizzate in fase di studio degli eventi di piena. Tutti i grafici riguardano gli stessi giorni riguardanti l'evento di piena. In alto a sinistra (figura a) è riportato il livello dell'acqua nell'Abisso di Trebiciano, sotto (figure b e c) sono riportate la direzione e la velocità di inclinazione con il movimento composto di inclinazione. In d l'andamento dell'inclinazione effettiva del pendolo ottenuto dalle due componenti plottate insieme con evidenziati i tratti e le fasi del segnale indotti dalle piene, il segnale di andata e il segnale di ritorno.

I grafici riguardano lo stesso intervallo temporale associato alla piena. Il giorno in cui si è raggiunto il punto massimo di livello è stato fatto coincidere con l'ottavo dei giorni considerati al fine di consentire una buona visualizzazione del fenomeno nei sette giorni precedenti. Per quanto riguarda il grafico con il movimento di tilt, i giorni sono rappresentati dai numeri visibili in prossimità della curva; si è avuto cura di riportare i giorni salienti del segnale del pendolo: essi sono il giorno dell'inizio e della fine ed il punto di massima escursione del segnale.

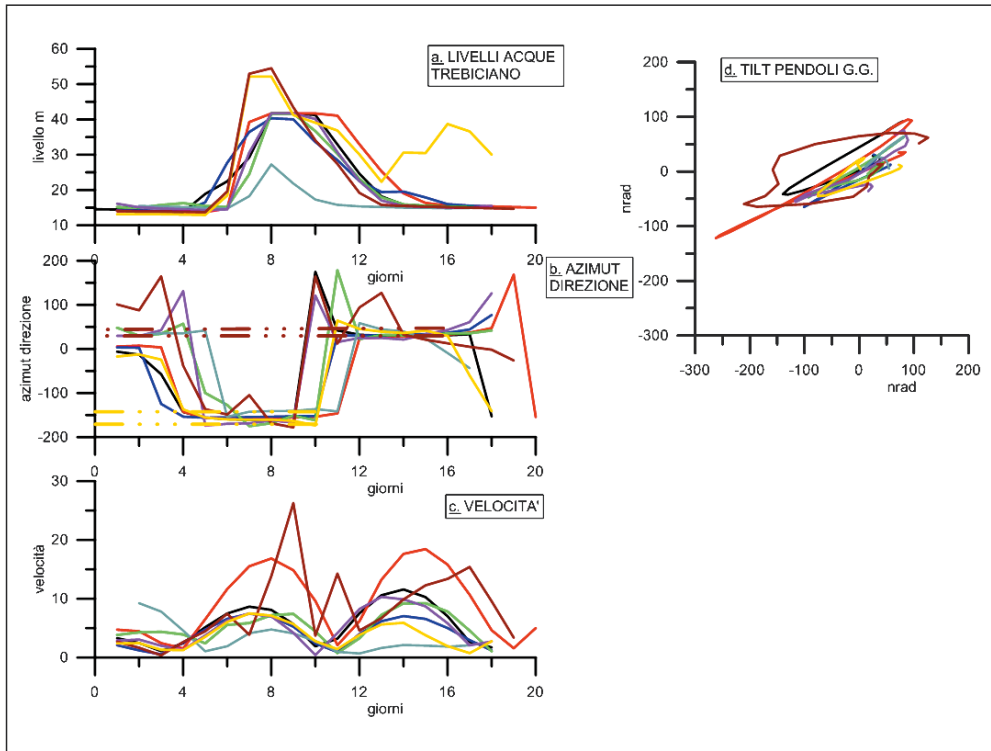


Fig. 9 – Diagrammi riassuntivi del segnale di piena del Timavo e del relativo segnale di inclinazione osservato nella Grotta Gigante. Linea tratteggiata color senape: valori entro i quali si colloca la direzione del segnale di inclinazione generato dalla piena. Linea tratteggiata color amaranzo: valori 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, curva giallo ocra 28 novembre 2005, curva marrone 3 gennaio 2006. Come in figura 8 I grafici a,b,c e d rappresentano rispettivamente: livello del Timavo registrato a Trebiciano, azimut di direzione assunta, velocità di inclinazione e tilt registrato dal pendolo. Sono riportati solamente gli eventi singoli.

La piena del 29 dicembre 2004, riportata in rosso, ha valori di tilting quasi doppi rispetto alle altre piene e comporta stranamente un leggero anticipo del segnale clinometrico rispetto all'inizio della piena registrata nell'Abisso di Trebiciano. Nel grafico delle direzioni si nota come la linea rossa raggiunga valori attorno -155° già il quarto giorno di analisi, due giorni prima dell'inizio della piena a Trebiciano.

Sfasamenti fra segnale del pendolo e piena a Trebiciano sono tuttavia la costante, quando per sfasamento si intende il tempo fra l'ultimo giorno di livello normale delle acque e la disposizione nel campo attorno al valore di 150° di direzione del segnale dei pendoli. Lo sfasamento è definito dal numero di giorni che intercorrono tra il segnale registrato dai pendoli, che si vuole imputare all'effetto delle acque, e l'effettivo innalzamento del Timavo nell'Abisso di Trebiciano. Tale sfasamento varia tra 1 e 2 giorni circa.

Analisi di regressione fra segnale clinometrico indotto e ampiezza della piena nell'Abisso di Trebiciano

È interessante porsi la domanda sulla relazione quantitativa dell'ampiezza del segnale clinometrico e l'escursione in metri delle piene osservate nell'Abisso di Trebiciano. A tale scopo si sono selezionati tutti gli eventi di piena che non hanno superato i livelli massimi e si sono determinati i valori delle ampiezze dei segnali di andata e di ritorno corrispondenti (figura 8). Nella figura 10 si osserva la relazione tra ampiezza del segnale clinometrico in nanoradianti e altezza dell'acqua del Timavo. I dodici eventi i cui livelli non hanno saturato le sonde, tra cui quelli del 2005 e del 2006 misurati in tutta l'oscillazione, sono rappresentati dalle croci nere. Le ampiezze 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 di ampiezza. I cerchi rossi rappresentano gli eventi che hanno saturato lo strumento, eventi superiori ai 41.7 metri. La retta di regressione è pari a $Y = 0.099 * X + 23.2$, dove Y è il livello dell'acqua a Trebiciano in metri e X è l'escursione massima del segnale clinometrico in nanoradianti. Tale relazione, rappresentata dalla linea verde nella Figura 10, assegna un valore di 23.2 metri come minimo valore percettibile dai pendoli della Grotta Gigante che corrisponde a piene con un minimo di 12 metri di escursione. Il coefficiente lineare equivale all'inclinazione di 100 nanoradianti per ogni 9,7 metri di variazione del livello dell'acqua misurata nell'Abisso di Trebiciano.

Discussione

Nel presente lavoro si è trovata una relazione quantitativa fra l'innalzamento delle acque sotterranee del Carso e le deformazioni misurate dal pendolo orizzontale della Grotta Gigante. Il segnale osservato dai pendoli ha una durata e una direzione tipica, le cui caratteristiche sono simili nel tempo. Il segnale indotto è un transiente e implica una deformazione temporanea della cavità (e con lei dell'idrostruttura carsica) che viene recuperata al termine del deflusso delle acque. La durata complessiva della deformazione è di circa 8 giorni.

Allo stato attuale non è possibile fornire informazioni sulla profondità, sullo spessore e sulla localizzazione delle acque che generano il segnale di deformazione. La deformazione della grotta è un fenomeno complesso e richiede un'accurata modellazione che tenga conto della forma della grotta, della portata, della distanza e della posizione delle acque che generano il segnale. Recenti studi su deformazioni crostali osservate in zone carsificate della Francia hanno proposto come causa della deformazione il carico delle acque, il loro deflusso profondo o il riempimento temporaneo di vuoti (e.g. REROLLE *et al.*, 2006; JACOB *et al.*, 2010; LONGUEVERGNE *et al.*, 2009). Resta il fatto che l'entità della deformazione generata dal solo carico è troppo esigua per spiegare le loro osservazioni, anche se la saturazione dell'epicarso comporta una deformazione significativa (JACOB *et al.*, 2010).

Abbiamo stabilito che l'inizio del segnale di tilting indotto dalle piene e l'andamento dell'acqua nell'Abisso di Trebiciano sono quasi coincidenti, con uno o due giorni di possibile sfasamento. Dato che l'analisi ha per il momento preso in considerazione un campionamento giornaliero, gli sfasamenti registrati rientrano nella incertezza posta dalla risoluzione temporale adottata. Il leggero anticipo del tilting del pendolo dovrà essere confermato dall'analisi dei dati orari. L'anticipo può essere legato all'effetto di altre acque in altri bacini.

Le deformazioni indotte vengono registrate più chiaramente dai pendoli che non dai clinometri, fenomeno giustificato dalla estrema sensibilità del pendolo, fissato alla volta e alla base della grotta.

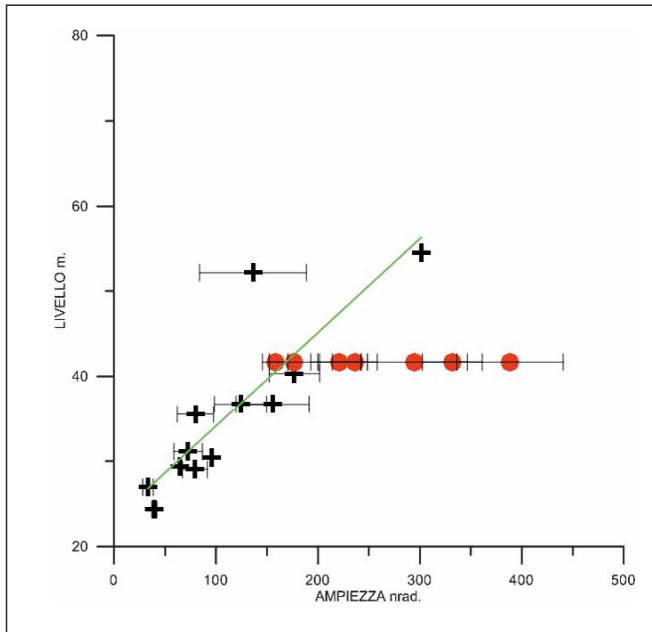


Fig. 10 – Relazione fra l'ampiezza di inclinazione generata nella Grotta Gigante dalle piene osservate nell'Abisso di Trebiciano. Crocette: eventi di piena che non hanno saturato la strumentazione. Punti rossi: eventi di piena che hanno superato o raggiunto il livello di saturazione pari a 41.7 metri 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. I punti rappresentano eventi di piena isolati e multipli.

Conclusioni

Si è potuto riscontrare che a particolari periodi di piena del Timavo ipogeo si possono associare caratteristiche deformazioni della Grotta Gigante individuate dalle misure dei pendoli orizzontali installati nella grotta stessa. Tali segnali consistono in un'inclinazione verso SW di ampiezza proporzionale all'entità della piena e nel successivo recupero dell'inclinazione. Quantificando tale relazione si può dire che la minima piena registrata nell'Abisso di Trebiciano apprezzabile dai pendoli della Grotta Gigante è di 23.2 metri (riferiti al livello medio marino) e che superato questo valore ad ogni variazione di livello dell'acqua di 9.7 metri i pendoli registrano un'inclinazione di 100 nanoradianti verso SW.

Ringraziamenti

Si ringraziano per l'aiuto nell'elaborazione dei dati la Dott.ssa Patrizia Mariani e per il recupero dei dati idrologici il dott. Walter Boschin e il dott. Luca Visintin.

Si ringrazia l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) ed in particolare il dott. Gianni Romeo e il dott. Quintilio Taccetti per la collaborazione alla stazione geodetica della Grotta Gigante.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- BENSI S., FANUCCI F., PODDA F., 2009 – *Strutture a macro e mesoscala delle Dinaridi triestine (carta GEO-CGT del FVG)*. Rendiconti online Società Geologica It., 5: 32-35.
- BRAITENBERG C., 1999 – *The Friuli (NE Italy) tilt/strain gauges and short term observations*. Annali di Geofisica, 42: 1-28.
- BRAITENBERG C., ZADRO M., 1999 – *The Grotta Gigante horizontal pendulums — instrumentation and observation*. Boll. Geof. Teor. Appl., 40: 577-582.
- BRAITENBERG, C., NAGY, I., NEGUSINI, M., ROMAGNOLI, C., ZADRO, M., ZERBINI, S., 2001 – *Geodetic measurements at the northern border of the Adria plate*. J. Geodyn., 32: 267-286.
- BRAITENBERG C., NAGY I., PAPANICHIOLI S., 2004 – *I pendoli della Grotta Gigante*. Rassegna Tecnica del Friuli Venezia Giulia, anno LV: 16-20.
- BRAITENBERG C., NAGY I., GRILLO B., 2005 – *Alcune informazioni sulla stazione geofisica ipogea della Grotta Gigante (Carso Triestino)*. Progressione, 52: 60-69.
- BRAITENBERG C., ROMEO G., TACCETTI Q., NAGY I., 2006 – *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.
- 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., ZINI L., 2007 – *La acque del Carso Classico in: L'acqua nelle aree carsiche in Italia, a cura di Cucchi F., Forti P., Sauro U*. Mem. Ist. It. Spel., 19: 33-40.
- 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.
- 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.
- JACOB, T., CHERY J., BOUDIN F., BAYER R., 2010 – *Monitoring deformation from hydrologic processes in a karst aquifer using long-baseline tiltmeters*. Water Resources Research, 46, W09542, doi: 10.1029/2009WR008082.
- 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.
- MARUSSI A., 1960 – *The University of Trieste station for the study of the tides of the vertical in the Grotta Gigante*. Proceedings of the Third International Symposium on Earth Tides, Trieste: 45-52.
- PLACER L., 1981 – *Geologic structure of southwestern Slovenia*. Geologija, 24: 27-60.

- 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.
- ZADRO, M., CHIARUTTINI, C., 1975 – *Loading effects of the Mediterranean tides.* Proceedings of the Seventh Symposium on Earth Tides: 495–501.
- ZADRO, M., BRAITENBERG, C., 1999 – *Measurements and interpretations of tilt-strain gauges in seismically active areas.* Earth Sci. Rev, 47: 151–187.

