

La rete dei dilatometri
in pozzi profondi dell'Etna

Quaderni di Geofisica



126



Quaderni di Geofisica

Direttore Responsabile

Stefano Gresta

Editorial Board

Luigi Cucci - Editor in Chief (INGV - RM1)

Andrea Tertulliani (INGV - RM1)

Nicola Pagliuca (INGV - RM1)

Umberto Sciacca (INGV - RM2)

Alessandro Settimi (INGV - RM2)

Aldo Winkler (INGV - RM2)

Salvatore Stramondo (INGV - CNT)

Milena Moretti (INGV - CNT)

Gaetano Zonno (INGV - MI)

Viviana Castelli (INGV - BO)

Antonio Guarnieri (INGV - BO)

Mario Castellano (INGV - NA)

Mauro Di Vito (INGV - NA)

Raffaele Azzaro (INGV - CT)

Rosa Anna Corsaro (INGV - CT)

Mario Mattia (INGV - CT)

Marcello Liotta (INGV - PA)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860068

redazionecen@ingv.it

in collaborazione con:

Barbara Angioni (INGV - RM1)

La rete dei dilatometri in pozzi profondi dell'Etna

The borehole dilatometers network of Etna

Alessandro Bonaccorso, Gilda Currenti, Antonino Sicali

INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Catania - Osservatorio Etneo)

La rete dei dilatometri in pozzi profondi dell'Etna

Dopo una lunga fase preparatoria sull'Etna è stata installata una rete composta da 4 dilatometri installati in pozzi profondi. Questa attività è avvenuta in due fasi successive (2010-2011 e 2013) supportate da altrettanti progetti di ricerca. I dilatometri da pozzo sono installati in fori trivellati a profondità solitamente maggiori di 100 m, e misurano lo *strain* volumetrico a cui è sottoposta la roccia circostante potenzialmente con precisioni nominali fino a 10^{-12} in un ampio intervallo di frequenze ($10^{-7} - 10^2$ Hz). In questo lavoro sono illustrate le caratteristiche degli apparati utilizzati, le metodologie di installazione in pozzo, e le problematiche della gestione strumentale. Vengono poi descritti i risultati delle calibrazioni strumentali ottenute dopo l'installazione tramite differenti metodologie. Sono inoltre illustrati i risultati ottenuti dalle variazioni di strain registrate nel breve termine durante le numerose fontane di lava emesse dall'Etna nel periodo 2011-2013, e sono anche presentate le variazioni di segnale registrate a tutte le stazioni durante la fontana di lava del 28 dicembre 2014. Infine sono anche mostrate le potenzialità del segnale a rilevare nel medio-lungo termine variazioni significative connesse a differenti fasi dell'attività vulcanica.

After a long preparatory phase on Etna a network of 4 borehole dilatometers has been installed. This activity took place in two successive phases (2010-2011 and 2013) supported by two research projects. The borehole dilatometers are installed in holes drilled at depths usually greater than 100 m, and they measure the volumetric strain of the surrounding rock potentially with nominal precision up to 10^{-12} in a wide frequency range ($10^{-7} - 10^2$ Hz). In this paper we describe the characteristics of the equipment used, the methods for the borehole installations, and the problematic related to the instrumental working. We describe the results of the instrumental calibrations obtained by different methods after the installations. We illustrate the results obtained by the changes of strain recorded in the short-term during the several lava fountains emitted from Etna during 2011-2013, and we also show signal changes recorded at all four stations during the recent lava fountain of 28 December 2014. Finally, we show the potential of the signal in the medium-term to detect significant changes related to different stages of volcanic activity.

Introduzione

L'interesse della comunità scientifica per l'installazione di dilatometri all'Etna si manifesta già a metà degli anni '90, quando Alan Linde del Carnegie Institution – Department Terrestrial Magnetism (CIW-DTM) su invito del Gruppo Nazionale per la Vulcanologia (GNV) effettua i primi sopralluoghi sul vulcano. Di fatto il progetto di avvio delle prime installazioni all'Etna resta in stand-by per diversi anni. La svolta avviene con l'INGV attraverso il contributo del progetto FIRB "Sviluppo Nuove Tecnologie per la Protezione e Difesa del Territorio dai Rischi Naturali" (denominato FUMO), che con il sottoprogetto "Sviluppo dei Sistemi di Osservazione Innovativi" ha supportato l'installazione dei primi due dilatometri all'Etna. Dopo alcuni anni dedicati all'individuazione dei siti idonei, ai preparativi e alla esecuzione delle perforazioni, realizzate nell'estate-autunno 2010 e nella primavera-estate 2011, le prime

due installazioni sono avvenute nell'Ottobre-Novembre 2011. I due siti prescelti, riportati nella figura 1, si trovano nel versante occidentale dell'Etna presso Monte Egitto (DEGI) e presso Monte Ruvolo (DRUV), rispettivamente ad una distanza di circa 6 km e 10 km dal Cratere Centrale.

Il successivo ampliamento della rete è avvenuto nel 2014 attraverso il supporto del progetto PON *Potenziamento strutturale di centri di ricerca per lo studio di aree VULCANICHE ad alto rischio e del loro potenziale geotermico nel contesto della dinamica geologica e ambientale MEDITERRANEA* (VULCAMED), finanziato all'INGV all'interno del "Quadro Strategico Nazionale 2007-2013 per le Regioni della Convergenza Programma Operativo Nazionale Ricerca e Competitività". L'obiettivo generale del progetto è stato di innalzare gli standard operativi e di eccellenza di strutture di ricerca attive nell'ambito del monitoraggio vulcanico, sismico ed ambientale. In particolare il progetto prevedeva anche il rafforzamento della

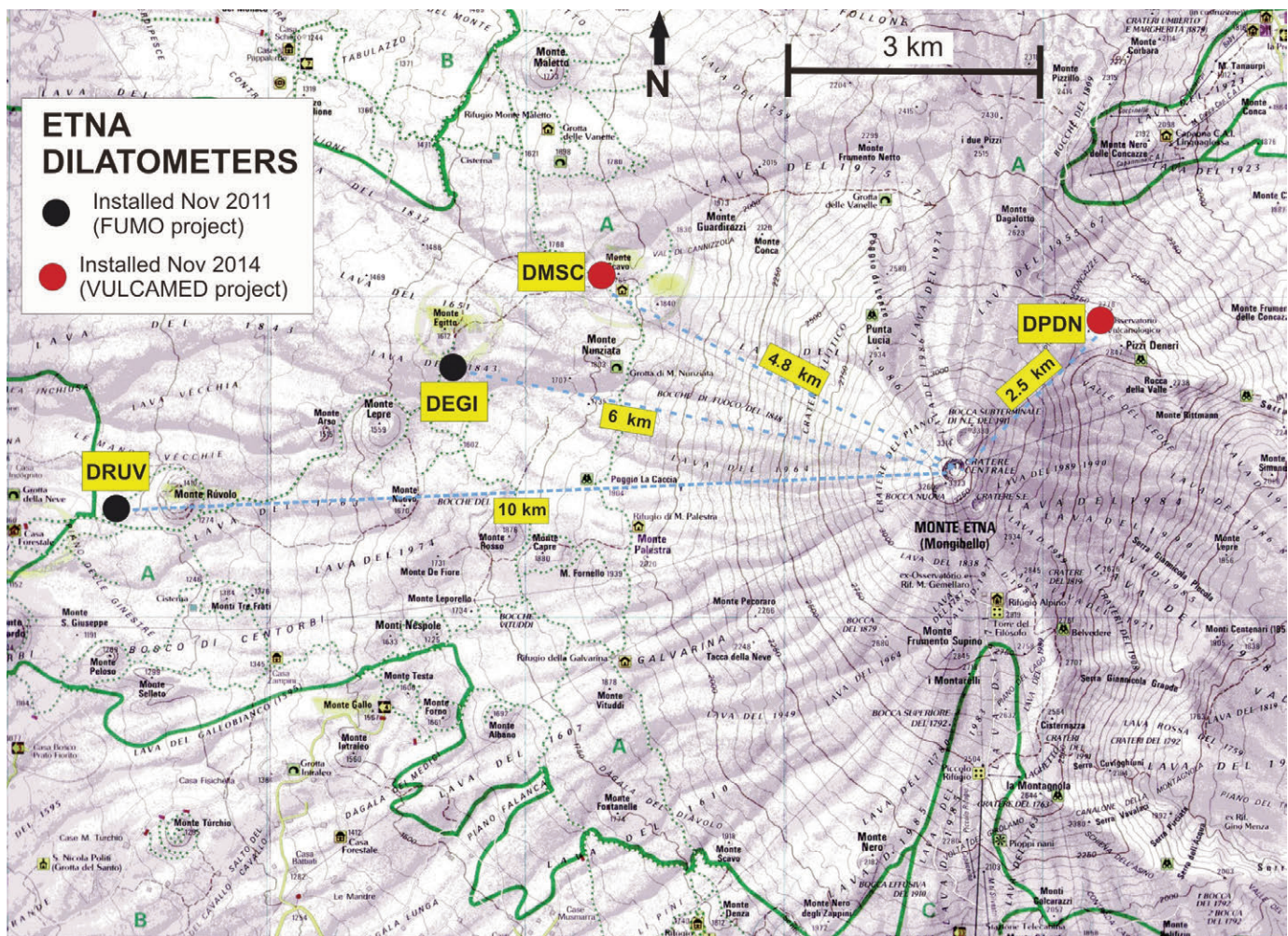


Figura 1a Mappa dell'Etna con i siti in cui sono state realizzate le installazioni degli strainmeters (dilatometri) in pozzi profondi. I siti si trovano rispettivamente ad una distanza dal Cratere Centrale di circa 10 km (Monte Ruvolo – DRUV), 6 km (Monte Egitto – DEGI), 4.8 km (Monte Scavo, DMSC) e 2.5 km (Pizzi Deneri, DPDN).

Figure 1a Map of Etna. The dilatometer positions are shown. The sites are located, respectively, at distance from Central Crater of about 10 km (Monte Ruvolo – DRUV), 6 km (Monte Egitto – DEGI), 4.8 km (Monte Scavo, DMSC) and 2.5 km (Pizzi Deneri, DPDN).

dotazione di strumentazione scientifica e tecnologiche. Nello specifico sono state previste altre due installazioni di dilatometri in pozzi profondi all'Etna. I siti selezionati sono rispettivamente quello di Monte Scavo (DMSC), distante circa 4.8 km dal Cratere Centrale, dove già insisteva una stazione permanente di monitoraggio sismico dell'INGV, e quello in località di Pizzi Deneri (DPDN), in prossimità dell'omonimo osservatorio vulcanologico di alta quota (2800 m s.l.m.), distante circa 2.4 km dal Cratere Centrale (Fig. 1). La scelta dei quattro siti ha seguito determinati requisiti principali, che consistevano in:

- individuare i siti tra quelli già occupati da strumentazione di monitoraggio dell'INGV. Questo punto è in sintonia con i contenuti del Protocollo di Intesa stipulato tra l'Ente Parco dell'Etna e l'INGV - Sezione di Catania nel 2003 in cui tra l'altro è previsto, in una visione virtuosa del rapporto tra Scienza e Ambiente, di favorire le autorizzazioni per lavori di potenziamento del monitoraggio

presso stazioni già esistenti all'interno del Parco;

- realizzare un profilo con le installazioni poste in direzione radiale con distanze crescenti dall'area sommitale verso il fianco esterno del vulcano. Questa soluzione è finalizzata a ottenere un modellazione delle sorgenti attraverso il decadimento dei loro effetti di strain con la distanza di registrazione;
- ubicare il profilo con le installazioni nel fianco Ovest. Questo fianco, come ben noto in letteratura [i.e. Bonaccorso and Davis, 2004], è quello con l'andamento deformativo che meglio risponde alle fasi di accumulo (*inflation*) e rilascio di magma (*deflation*) provocate dalla sorgente vulcanica rispettivamente prima e durante le eruzioni.

Nel lavoro vengono illustrate le caratteristiche generali della strumentazione, la metodologia d'installazione che avviene in appositi pozzi trivellati, il lavoro condotto all'Etna e le problematiche incontrate nelle fasi di predisposizione delle per-

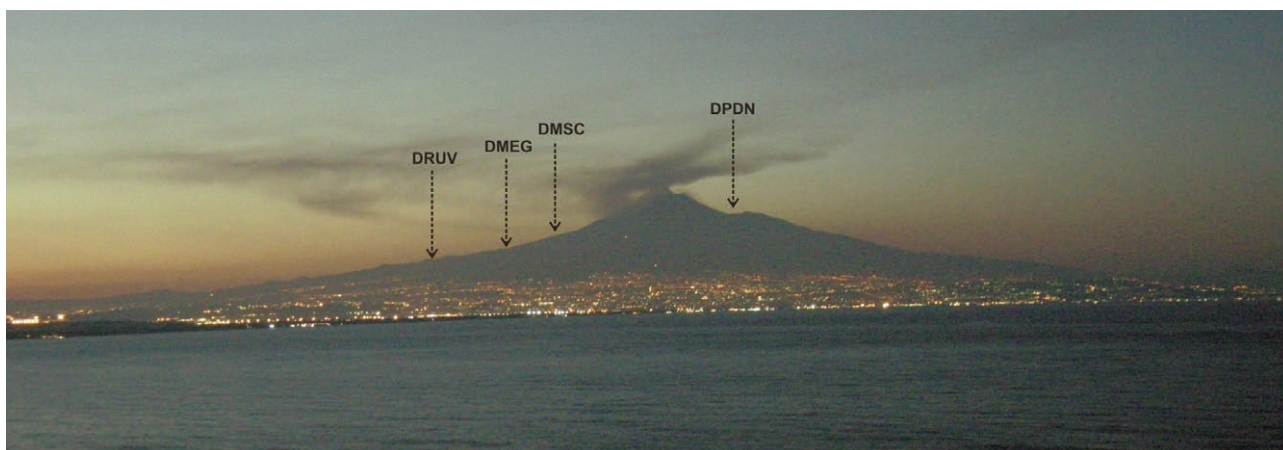


Figura 1b Golfo di Catania e Etna visti da Sud. Sul profilo O-E del vulcano sono indicate le posizioni delle stazioni con i dilatometri in pozzo.

Figure 1b Gulf of Catania and Etna volcano seen from the South. On the W-E profile of the volcano the positions of the dilatometer stations are indicated.

forazioni e nelle successive installazioni. Vengono poi illustrati i metodi e i risultati delle calibrazioni (dall'analisi mareale e con la sismicità registrata) ottenuti per determinare la risposta strumentale finale ad installazione avvenuta. Quindi sono presentati i principali risultati scientifici ottenuti subito dopo le prime installazioni, avvenute a Novembre 2011, mediante le variazioni del segnale di strain registrato durante le numerose fontane di lava del 2011-2013 prodotte dal nuovo cratere di SE (NSEC) dell'Etna, che principalmente hanno permesso di modellare la sorgente superficiale che ha originato questi parossismi e porre dei precisi vincoli sulle quantità dei volumi di lava emessi. Vengono anche presentati i segnali registrati a tutte le 4 stazioni durante la fontana del 28 Dicembre 2014, appena due mesi dopo l'installazione degli ultimi due strumenti. Infine, anche come lavoro da approfondire ulteriormente in prospettiva, vengono presentati i primi risultati del segnale depurato dagli effetti di lungo termine finalizzati a meglio evidenziare possibili variazioni a lungo termine rispetto agli eventi a breve termine come le fontane di lava.

1. Dilatometri in pozzo: caratteristiche generali

Per il monitoraggio e lo studio dell'azione delle sorgenti in ambiente vulcanico risulta di notevole importanza riuscire a misurare con estrema precisione le variazioni di strain che subisce il mezzo. Questo obiettivo è perseguibile attraverso l'utilizzo di strumenti in generale noti come *borehole strainmeters*, che solitamente sono installati in fori profondi (> 100 m) per attenuare i disturbi ambientali e migliorare la rilevazione di segnali fini. Questi strumenti sono predisposti per rilevare le componenti dello strain, e nel caso in cui misurano la componente totale volumetrica sono definiti e noti come dilatometri da pozzo.

Lo strumento di base è da un punto di vista teorico abbastanza semplice. Consiste di un tubo cilindrico, al suo interno riempito di specifico fluido (solitamente olio di silicone), che viene installato in un foro appositamente trivellato ponendolo in contatto con le pareti rocciose del foro attraverso l'utilizzo di appositi cementi ad alta espansione, che consentono un perfetto accoppiamento strumento-mezzo. La variazione di livello del fluido interno indotta nello strumento dalla variazione dello strain nel mezzo circostante è quindi misurata con estrema precisione attraverso un apposito sensore. Lo schema strumentale è descritto in figura 2. La tipologia di strumentazione utilizzata nelle installazioni all'Etna è quella nota come *Sacks-Evertson borehole strainmeter* (o anche *dilatometer*) [Sacks et al., 1971, Sacks and Evertson, 1972]. Le principali caratteristiche tecniche di questa strumentazione sono riportate in tabella 1. La camera di rilevamento dello strumento (Fig. 2) è lunga ~ 4 m e si compone di un cilindro di acciaio inox (diametro di ~5-7 cm) riempito con un liquido, tipicamente olio di silicone. Lo strain orizzontale e verticale modifica il volume di questo cilindro, forzando l'olio a muoversi dentro o fuori il volume della camera. Presso la camera di rilevamento vi è un piccolo foro (12,7 mm di diametro) a cui è collegato un soffiutto (*bellows*) la cui lunghezza cambia in proporzione alla quantità di olio che entra o esce nella camera. La posizione della parte superiore del soffiutto viene misurata per mezzo di un trasduttore differenziale basato sulla rilevazione dello spostamento (DT1) con una risoluzione di circa 1 nanometro ($1 \text{ nm} = 10^9 \text{ m}$). Negli strumenti utilizzati il trasduttore è un trasformatore variabile differenziale lineare (VLDT), formato da un avvolgimento principale, due avvolgimenti secondari ed un nucleo. Gli avvolgimenti principali e secondari sono alloggiati in un cilindro di metallo, con un'asta, corredata di un nucleo magnetico,

movibile che può scorrere dentro il cilindro secondo la variazione di pressione a cui è soggetto. Il soffiutto ha limitata capacità di estensione (circa 5 mm), pertanto una valvola idraulica, controllata dall'elettronica di superficie, viene utilizzata per consentire un reset della misurazione ottenuta attraverso il sistema idraulico. La gamma dinamica dello strumento è di circa 140 dB (convertitore analogico-digitale a 24 bit). Per evitare problemi di fuori scala o di rottura strumentale, qualora fossero presenti forti deformazioni, dal 1998 lo strumento è stato ottimizzato includendo un secondo soffiutto, più largo e meno sensibile, sempre accoppiato a un trasduttore spostamento-valvola (DT2) (Fig. 2). Dunque l'apertura di uscita della valvola primaria V1, comandata da DT1, è collegata ad un secondo foro accoppiato con un soffiutto di diametro maggiore (50 mm) che viene monitorato con un altro trasduttore spostamento-valvola (DT2). Una seconda valvola consente a questo soffiutto di essere equilibrato attraverso un serbatoio di olio non sollecitato da tensioni. Durante il normale funzionamento, entrambe le valvole sono chiuse in modo che il primo soffiutto risponde alle sollecitazioni indotte dalle variazioni di strain sul volume della camera strumentale, mentre il secondo soffiutto è connesso a un volume insensibile allo stress e di conseguenza risponde solo alle sollecitazioni termiche fornendo una misura delle variazioni di temperatura con risoluzione migliore di 10^{-4} °C. Nel caso della nuova rete dell'Etna i dilatometri e l'elettronica di controllo sono stati prodotti dal CIW-DTM, che detiene anche il brevetto [Sacks and Evertson, 1972]. I colleghi del CIW-DTM sono stati inoltre presenti durante le fasi finali d'installazione e di avvio dell'operatività strumentale per una completa assistenza tecnico-professionale.

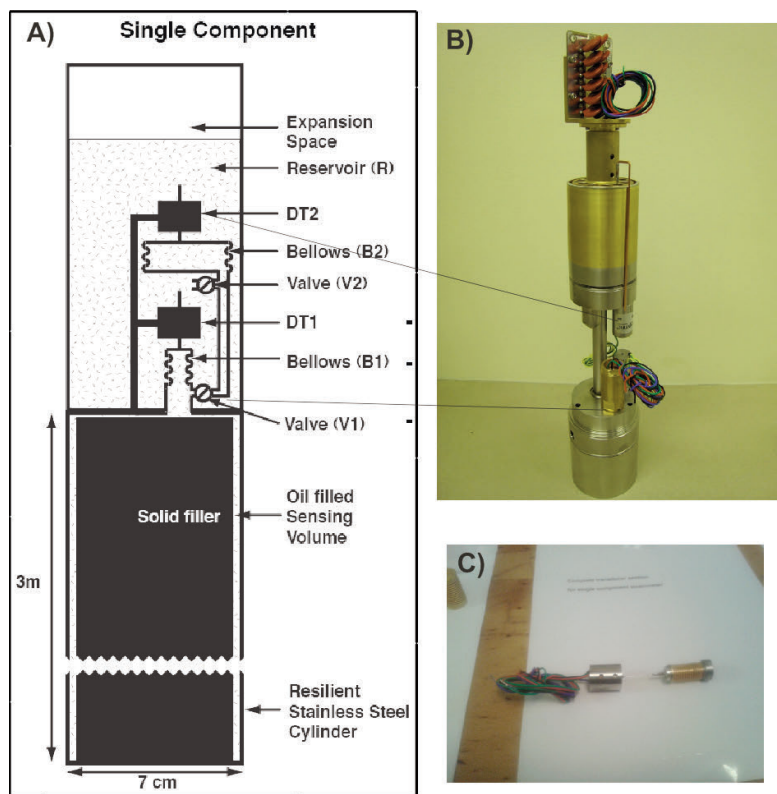


Figura 2 Schema della parte strumentale (A), con l'immagine della parte sensoristica (B), e del sistema di misura (C). Vedere il testo per una descrizione più dettagliata.

Figure 2 Scheme of the instrumental part (A), with the image of the sensor (B), and of the measuring system (C). See text for a more detailed description.

I dilatometri da pozzo sono gli strumenti più sensibili alle variazioni dello stato degli sforzi finora realizzati a fini geofisici (sensibilità nominale $\delta V/V$ fino a 10^{-12}). Comunque, la risposta e l'accuratezza finale dipendono da vari fattori, quali la buona riuscita dell'accoppiamento strumento – mezzo, la qualità della roccia dove si installa lo strumento, disturbi ambientali (movimenti di falda, pressioni di poro indotte dalle piogge, variazioni profonde di temperatura). Pertanto, come di seguito presentato nel capitolo 4, la risposta finale dello strumento si deve verificare con apposite calibrazioni *in situ*, dopo che è stata completata l'installazione.

sensibilità nominale max. 10^{-12}
dinamica 'ampia' ~ 140 dB
intervallo misura sino $\sim 5 \times 10^{-5}$
intervallo frequenze $10^{-7} - 10^2$ Hz

Tabella 1 Principali caratteristiche tecniche della strumentazione.
Table 1 Main technical characteristics of the instrumentation.

2. Installazioni e siti della rete dilatometrica in pozzo

2.1 Metodologia d'installazione

A causa dell'elevata sensibilità strumentale il segnale registrato è affetto da rumore ambientale. Forti miglioramenti del rapporto segnale/rumore sono ottenibili attraverso l'ausilio di installazioni realizzate a profondità usualmente comprese tra 100-200 metri all'interno di fori trivellati di piccolo diametro (solitamente inferiore a 15 cm). Questo principalmente

serve per abbattere il rumore caratteristico del primo strato superficiale delle rocce, principalmente dovuto agli effetti espansivi/contrattivi termici e termo-elastici, influenzati dalla topografia e dalla eterogeneità del mezzo [i.e. Meertens and Wahr, 1986; Bonaccorso et al., 1999]. Un diagramma schematico dell'installazione in foro è riportato in figura 3.

Ciascuna perforazione è di norma costituita da un foro trivellato della profondità maggiore di 100 metri incamiciato nella parte superiore alla zona d'installazione strumentale. La realizzazione di ciascun pozzo di alloggiamento dei dilatometri comprende le seguenti fasi principali:

- Tecnica di perforazione a carotaggio continuo (preferibile essenzialmente per un controllo diretto e più sicuro della roccia attraversata) o a distruzione nel primo tratto e proseguimento a carotaggio continuo nella profondità finale dove verrà installato lo strumento.
- Quando sono trovate rocce consistenti idonee per l'alloggiamento della strumentazione, a profondità non inferiore a 100 m, installazione di camicia e cementazione della stessa.
- Perforazione del tratto terminale con diametro minore (prossimo alla sezione del dilatometro), fino a trovare un tratto di materiale consistente ed idoneo per l'installazione.
- Cementazione del pozzo fino alla camicia e ri-perforazione

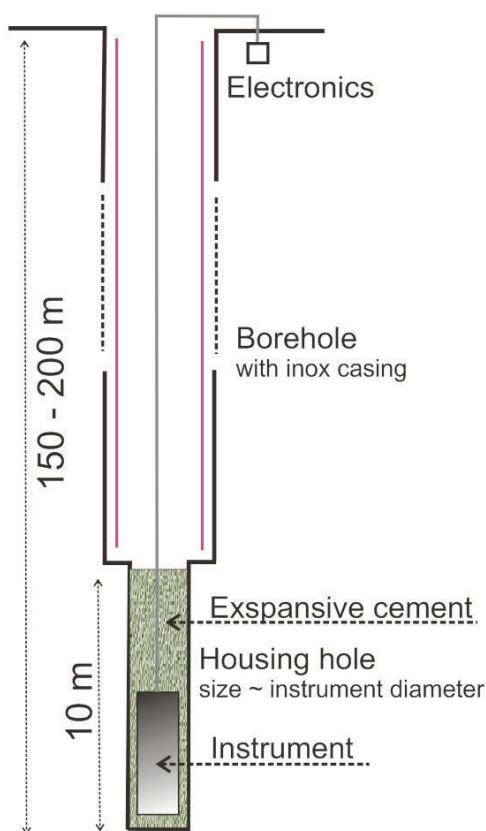


Figura 3 Diagramma schematico dell'installazione di uno strainmeter (o dilatometro) in pozzo.

Figure 3 Schematic diagram of the installation of a borehole strainmeter (or dilatometer).

zione fino alla profondità massima con un diametro di poco più grande della sezione dello strumento (in modo da rendere sottile lo strato di cemento tra lo strumento e le rocce circostanti).

- Prove di 'sealing' del pozzo, cioè prove di perfetta sigillatura delle pareti del foro che si possono ottenere anche mediante appositi test di tenuta dell'acqua all'interno del foro.
- Posa in opera del dilatometro alla base del foro trivellato e immergendolo dentro uno strato di cemento ad alta espansione immesso a fondo pozzo appena prima dell'installazione strumentale.

Dunque in sintesi, quando il foro è completato con le caratteristiche sopra specificate, una quantità di cemento ad alta espansione viene fatta scendere con un apposito contenitore a fondo del foro. Il contenitore giunto a contatto del fondo pozzo, attraverso un sistema automatico di apertura, si apre, viene riportato in superficie e nel frattempo lascia depositare il cemento nella parte inferiore del foro. A questo punto il dilatometro viene fatto scendere nel foro e nella parte finale affonda all'interno del cemento, che quindi circonda e copre completamente lo strumento. Quando il cemento indurisce, si espande e accoppia lo strumento al mezzo circostante iniziando a rilevare le variazioni dello strain trasmesse dalla roccia attorno ad esso. Le successive calibrazioni *in situ* verificheranno la risposta strumentale definitiva.

Lo strumento è collegato in superficie all'elettronica da un cavo che fornisce alimentazione per i trasduttori di spostamento così come per i vari segnali. L'unità elettronica fornisce una tensione regolata e monitora i segnali di uscita per attuare l'apertura e la chiusura delle valvole. I segnali di uscita del trasduttore di spostamento sono tensioni analogiche collegate a convertitori A/D. Poiché anche le variazioni di pressione atmosferica deformano la roccia in prossimità della superficie, è necessario anche registrare variazioni barometriche con risoluzione di almeno 1 ettopascal (1 hPa = 1 millibar). Un ricevitore GPS economico è integrato per fornire informazioni di tempo.

2.2 Installazioni all'Etna

Le prime due perforazioni DRUV (2010) e DEGI (2011) sono state condotte sino quasi 200 metri di profondità con tecnica a carotaggio continuo (Fig. 4). Questo ha permesso un ottimo controllo della tipologia di roccia perforata, consentendo di scegliere lo strato di roccia competente massiva dove posizionare e installare gli strumenti (Fig. 5, Tab. 2). Il carotaggio continuo (tecnica *wire-line*) consente il recupero del campione trivellato, però in ambiente vulcanico presenta difficoltà operative in quanto il carotiere può facilmente restare bloccato nella roccia quando incontra stratificazioni poco competenti come vulcaniti, e/o sabbie vulcaniche, e/o stratificazioni prodotte da materiale piroclastico.



Figura 4a Immagini del sito DEGI riprese durante le operazioni d'installazione in Novembre 2011.
Figure 4a Images of DEGI site taken during the installation operations in November 2011.



Figura 4b Immagini del sito di DPDN, presso l'osservatorio vulcanologico di Pizzi Deneri a quota 2850 m s.l.m. Le condizioni estreme di lavoro e operatività sono ben evidenti.
Figure 4b Images of DPDN site, close the volcanological observatory of Pizzi Deneri 2820 m a.s.l. The extreme work and operational conditions are evident.

Sito	mese/anno installazione	Coordinate Lat / Long	Quota s.l.m. (m)	Distanza Cratere Centrale	Profondità installazione	carotaggio perforazione	Tipo roccia
DRUV	Nov 2011	37° 44' 48.480" 14° 52' 58.800"	1.210	10 km	172.5 m	continuo	basalto massivo
DEGI	Nov 2011	37° 45' 51.840" 14° 55' 38.640"	1.575	6 km	162.5 m	continuo	basalto con presenza fratture
DMSC	Nov 2014	37° 46' 22.800" 14° 56' 48.768"	1.675	4.8 km	108 m	distruzione	basalto massivo
DPDN	Nov 2014	37° 45' 57.960" 15° 0' 59.400"	2.820	2.4 km	112 m	distruzione	piroclastiti ben saldate

Tabella 2 Siti delle stazioni dilatometriche con le relative principali caratteristiche (data di installazione, coordinate geografiche, altitudine s.l.m., distanza dal Cratere Centrale, profondità d'installazione in foro, tipologia di carotaggio, tipo di roccia circostante l'alloggiamento strumentale).

Table 2 Sites of the dilatometer stations reporting the main characteristics (date of installation, geographic coordinates, altitude above sea level, distance from the central crater, installation depth in the hole, type of core drilling, type of rock surrounding the instrumental housing).

Infatti in entrambe le installazioni si sono avuti incagli che hanno rallentato le operazioni e prodotto danni alle aste di perforazione. A DRUV si è verificato un incaglio a circa 120 m di profondità che ha comportato la perdita del foro e la necessità di ripetere l'intera perforazione in un altro foro limitrofo. A DEGI l'incaglio finale a circa -180 m ha comportato la perdita della parte terminale delle aste di perforazione, che a sua volta ha implicato un posizionamento più alto (-162.5 m) dello strumento in un tratto di roccia meno massivo di quello individuato, prima dell'incaglio, a -180 m. Tutto questo, come poi verificato nelle calibrazioni, ha comportato a DEGI un accoppiamento meno ottimale dello strumento con la roccia circostante limitando la sensibilità strumentale.

Nel 2014 per evitare queste difficoltà operative, anche in considerazione dei tempi residui molto ristretti del progetto (scadenza fine anno 2014), si è deciso di effettuare le perforazioni con tecnica a distruzione che presentano meno problemi di incaglio e permettono una perforazione più rapida. A DMSC, tra maggio e luglio 2014, si è perforato sino a circa 180 m. Tra 98 m e 113 m si è trovato materiale molto massivo, però da 114 a 180 m si è incontrato materiale poco consistente (scorie vulcaniche e lave fratturate). Pertanto si è cementato il foro sino a 115 m, si è poi cementato con malta cementizia ad espansione (prodotto Weber CS206) tra 115 e 95 m, e infine si è ri-perforato sino a 108 m (parte centrale della zona massiva) che è stata scelta come la profondità inferiore dove è poi stata posizionata la base dello strumento. A DPDN la perforazione ha avuto corso tra Agosto e Ottobre 2014 con diverse difficoltà dovute alla logistica (il sito è a 2820 m di quota) e alle condizioni meteorologiche, soprattutto a causa delle numerose giornate di vento molto forte, hanno penalizzato le giornate lavorative. Considerate poi le nevicate di metà Ottobre (Fig. 4b), che hanno determinato ulteriori disagi e ritardi, la trivellazione è stata fermata a 112 m. A

questa profondità è poi stata posizionata la base dello strumento durante l'installazione avvenuta ai primi di Novembre 2014.

Le foto dei siti, riprese durante le operazioni d'installazione, sono riportate in figura 4.

In tabella 2 è riportato uno schema con le caratteristiche delle perforazioni nei diversi siti.

3. Gestione strumentale

Una descrizione ampia e dettagliata del funzionamento e della gestione strumentale è stata fornita in un apposito rapporto tecnico [Sicali and Bonaccorso, 2013]. Nel presente lavoro vengono richiamati e riportati gli aspetti salienti relativi all'operatività strumentale, rimandando al report sopra citato per eventuali approfondimenti.

3.1 Elettronica e logica di comando

L'elettronica dello strumento si può suddividere in tre parti principali: elettronica digitale e logica di comando, elettronica analogica e convertitori A/D, attuatori elettromeccanici (elettrovalvole) e trasduttori LVDT. I tre blocchi implementano un sistema con controllo che permette allo strumento di funzionare sempre nelle condizioni migliori di misura e sicurezza. In generale, durante le normali operazioni di misura le valvole rimangono entrambe chiuse per aprirsi, e riequilibrare le tensioni, quando lo strain cumulato si avvicina al limite di misura dello strumento.

La parte digitale è composta essenzialmente da una scheda a microcontrollore tipo Rabbit Semiconductor RCM3200; tutte le funzionalità di acquisizione, archiviazione e trasmissione del dato vengono affidate al microcontrollore. Il microcontrollore ha anche il compito di decidere come e quando azio-



Figura 5 Cassetta con i campioni di roccia prelevati nella trivellazione di DRUV effettuata tramite carotaggio continuo (tecnica *wire-line* con prelievo della carota di materiale perforato). I campioni sono quelli incontrati tra -167 e -172 m, dove è stato posizionato e installato lo strumento in quanto in questo tratto la roccia presentava caratteristiche particolarmente uniformi e massive.

Figure 5 Box with rock samples taken from the drilling at DRUV done through continuous core sampling (wire-line technique). The samples are those encountered between -167 and -172 m, where the instrument was located and installed because in this depth range the rock had characteristics particularly uniform and massive.



Figura 6 L'aspetto esterno dell'elettronica di controllo (*Shoebox*) e la sua tipologia di ubicazione nei siti remoti. A sinistra la soluzione (adottata a DRUV, DEGI e DMSC) di un apposito pozzetto realizzato sotto terra per garantire una buona coibentazione. A destra la soluzione del contenitore coibentato ubicato all'interno del garage dell'osservatorio limitrofo alla perforazione dell'installazione. La *Shoebox* è collegata sia con il sensore in foro che con il sistema di alimentazione energetica e trasmissione. Vedi dettagli descrittivi nel testo.

Figure 6 The external view of the control electronics (*Shoebox*) and its type of location in the remote sites. Left: the solution (adopted at DRUV, DEGI and DMSC) of an appropriate cement housing positioned under the ground to ensure an effective insulation. Right: solution of the insulated container located inside the observatory's garage adjacent to the drilling installation. The *Shoebox* is connected both with the sensor in the hole and with the energy supply and transmission systems. See descriptive details in the text.

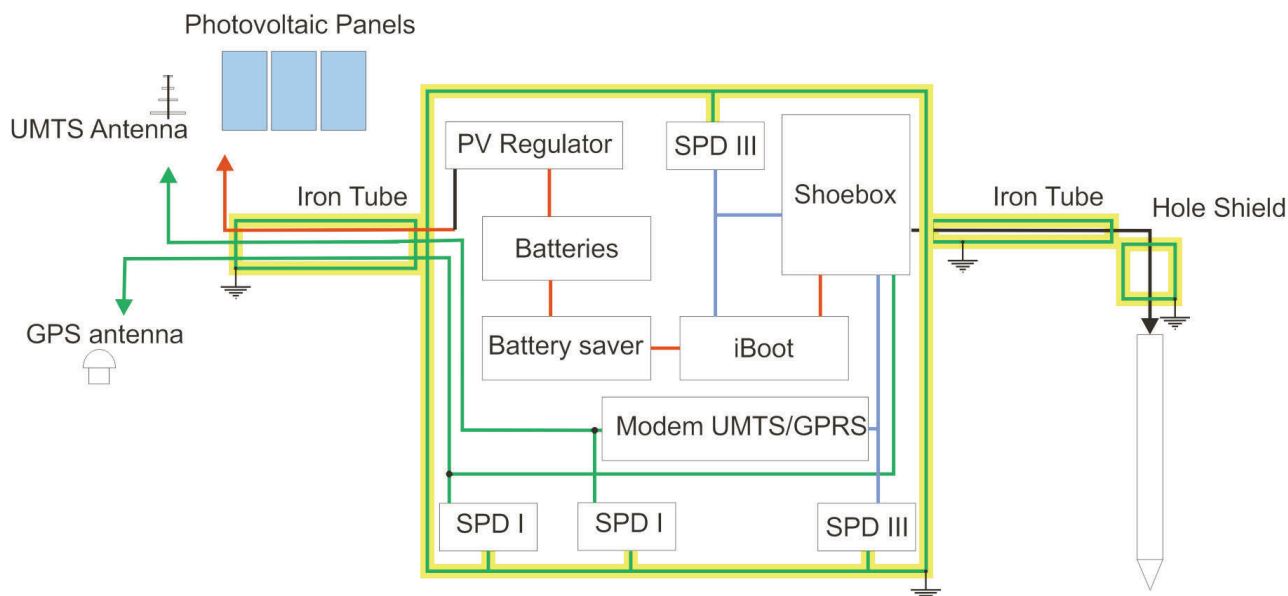


Figura 7 Schema a blocchi dell'intera stazione dilatometrica. I collegamenti in rosso sono relativi all'alimentazione energetica, quelli in blu alla rete ethernet, quelli in verde alle radio frequenze (trasmissione e GPS). La stazione è protetta attraverso da apposite gabbie di Faraday (segnate in giallo-verde) poste attorno la strumentazione e lungo il percorso esterno dei cavi. Gli SPD sono dei protettori di extra-tensioni (SPD III) ed extra-correnti (SPD I) per le linee energetiche e di segnale.

Figure 7 Block diagram of the entire dilatometer station. The links in red are related to the energy supply, the blue ones to the ethernet, the green ones to the radio frequencies (transmission and GPS). The station is protected by Faraday cages (marked in yellow-green) placed around the instrumental equipment and on the external route of the cables. The SPD are the protectors of extra-voltages (SPD III) and extra-currents (SPD I) for the energy and signal lines.

nare le elettrovalvole per evitare danni al sensore e rimettere lo strumento in *range*. Sulla scheda è installato un sistema operativo UNIX-like (*Linux*) con *kernel Linux* versione 2.6.12.2 compilato per architettura ARM. Il processore utilizzato è un Intel's ARM XScale PXA255. Nelle ultime versioni la scheda utilizza un disco a stato solido (SSD, *Compact Flash Rugged*) che permette ulteriormente di aumentare l'affidabilità e diminuire i consumi rispetto ad un classico disco meccanico. La parte analogica di acquisizione utilizza essenzialmente due tipi di convertitori a 24 e 20 bit. I convertitori a 24 bit vengono usati per i segnali principali che hanno bisogno di una maggiore precisione mentre i canali a 20 bit vengono utilizzati per i segnali di importanza minore come la tensione di batteria o per segnali che non hanno una grande precisione come la temperatura. La scheda è capace di leggere fino a 8 segnali a 24 bit e 4 a 20 bit. Ciascun canale a 24 bit permette di avere un *range* dinamico di 124 dB (teorici). I dati analogici acquisiti vengono utilizzati dal microcontrollore per comandare gli attuatori meccanici. Ogni stazione di misura viene sincronizzata grazie all'uso di un GPS. Tutto il sistema consuma un massimo di 8-10W esclusa la trasmissione.

In tre stazioni (DRUV, DEGI, DMSC) il sistema di controllo, che viene identificato con il nominativo "Shoebox", è stato posizionato in appositi pozzetti scavati sotto terra per garantire una buona coibentazione termica, mentre a DPDN è stato realizzato un apposito box termico posizionato all'in-

terno del limitrofo garage dell'osservatorio (Fig. 6). La *Shoebox* è collegata sia con il sensore in foro e che con il sistema di alimentazione energetico e trasmissione, e lo schema dei relativi collegamenti è riportato in figura 7.

3.2 Sistema energetico e ottimizzazioni per le stazioni remote

Per le stazioni remote dell'Etna, che sono lontane da centri abitati e da utenze di corrente elettrica, il sistema energetico è di tipo solare. Il sistema energetico predisposto dai colleghi americani del Carnegie Institution prevedeva di collegare lo strainmeter direttamente alle batterie per evitare che, in caso di crisi energetica, i ripetuti attacchi e distacchi della corrente potesse danneggiare il *file system* di *Linux*. Però la soluzione di assorbire continuamente corrente senza mai staccare il carico da un lato permette di non avere continui distacchi, ma anche determina il rischio di non poter utilizzare più il sistema qualora la batteria venga completamente stremata fino a scendere sotto la tensione minima di 10.5 V e, talvolta, provocandone il guasto definitivo. Per altro questo limite rischiava di rendere inutilizzabile lo strumento esponendolo a rischi meccanici qualora, a causa di non adeguati spegnimenti, le valvole non fossero state comandate per aprirsi in tempo. Ovviamente questa criticità è elevata soprattutto in condizioni estreme come accade con l'installazioni in aree vulcaniche, in cui le stazioni remote spesso sono anche coperte dall'innevamento.

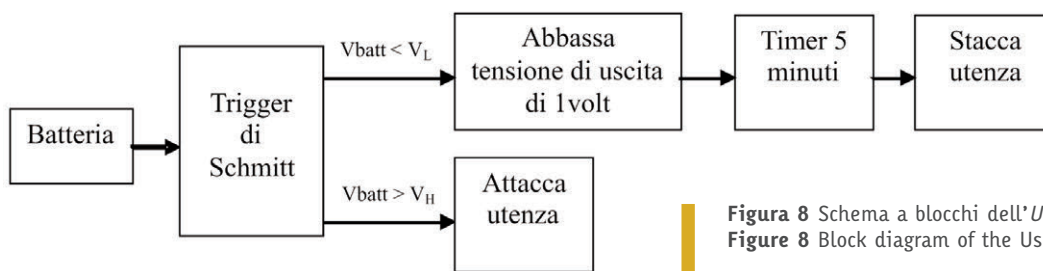


Figura 8 Schema a blocchi dell'User Controller.
Figure 8 Block diagram of the User Controller.

È stato dunque necessario ricercare una soluzione al problema, che modificasse il sistema energetico e scollegasse l'utenza in modo sicuro e non traumatico per Linux permettendo alla *Shoebox* di avviare e completare la procedura di *shutdown*, e salvaguardare le batterie. A tal fine come soluzione semplice e affidabile si è predisposto un apposito circuito *User Controller* che utilizza un trigger di Schmitt le cui soglie di stacco (V_L) e riattacco (V_H) dell'utenza sono regolabili e rispettivamente fissate a 11.7 e 12.5 V (Fig. 8). Il controller fa uso di un timer che permette alla *Shoebox* di spegnersi in sicurezza evitando allo stesso tempo il generarsi di falsi segnali di *shutdown* [Sicali and Bonaccorso 2013]. È importante evidenziare che nonostante i problemi di neve e maltempo che hanno accompagnato i periodi invernali, attraverso questa ottimizzazione a DEGI e DRUV le batterie hanno resistito grazie ai tempestivi distacchi del carico regolati dal nuovo componente.

3.3 Trasmissione e formato dati

La *Shoebox* insieme al suo alimentatore (*iBoot*) sono collegati attraverso una rete locale (LAN) per il reciproco scambio di dati, nello specifico dati di alimentazione e di funzionamento. Nella rete è stato inserito un router 3G che, attraverso l'interfacciamento con reti GPRS / EDGE / UMTS, per-

mette da remoto di accedere sia alla *Shoebox* che all'*iBoot*. Per l'archiviazione dei segnali si è usato il formato del programma SAC (Seismic Analysis Code) [Goldstein et al., 2003]. I segnali possono essere acquisiti a 20 bit o 24 bit secondo l'importanza del canale o semplicemente perché la precisione attesa è limitata come nel caso della temperatura. I canali S1A e S2A sono misurati all'uscita degli LVDT e sono espressione della deformazione misurata. Mentre S1A, misurato sul condotto più stretto, misura una deformazione, S2A (meno sensibile, in quanto il condotto è più largo) serve per riequilibrare lo strain a cui è soggetto il sensore e misura in maggioranza variazioni dovute alla temperatura. Vengono misurate anche la pressione atmosferica (BAR24), la tensione di alimentazione degli LVDT (S1S) e la temperatura (TMP). Ciascun canale viene campionato a 50 Hz e attraverso opportuni filtri di decimazione vengono generati in cascata i segnali a 1 secondo, 1 minuto e 1 ora. La descrizione di ciascun segnale è riportata nella Tabella 3. I dati a 50Hz sono oltre il 90% di tutti i dati prodotti giornalmente e dunque, preferendo non trasmettere tutti i dati prodotti, si è deciso di non scaricare questa parte più corposa e di trasmettere solamente i dati a 1 h, 1min, 1 sec. I dati a 50 Hz non scaricati possono essere comunque recuperati in locale oppure in remoto qualora fosse ritenuto opportuno in presenza di particolari eventi.

Id Canale	Precisione (bit)	Grandezza misurata
S1A	24	Strain LVDT 1 (sistema accoppiato 'piccola' capsula barometrica e trasduttore). Misura lo strain
S2A	24	Strain LVDT 2 (sistema accoppiato 'grande' capsula barometrica e trasduttore). Serve per riequilibrare lo strain all'interno dello strumento
BAR24	24	Pressione atmosferica misurata attraverso un sensore modello Setra
S1S	24	Tensione di alimentazione degli LVDT
TMP	20	Temperatura misura nella <i>Shoebox</i>
PWR	20	Tensione di batteria

Tabella 3 Descrizione dei segnali acquisiti.
Table 3 Description of the recorded signals.

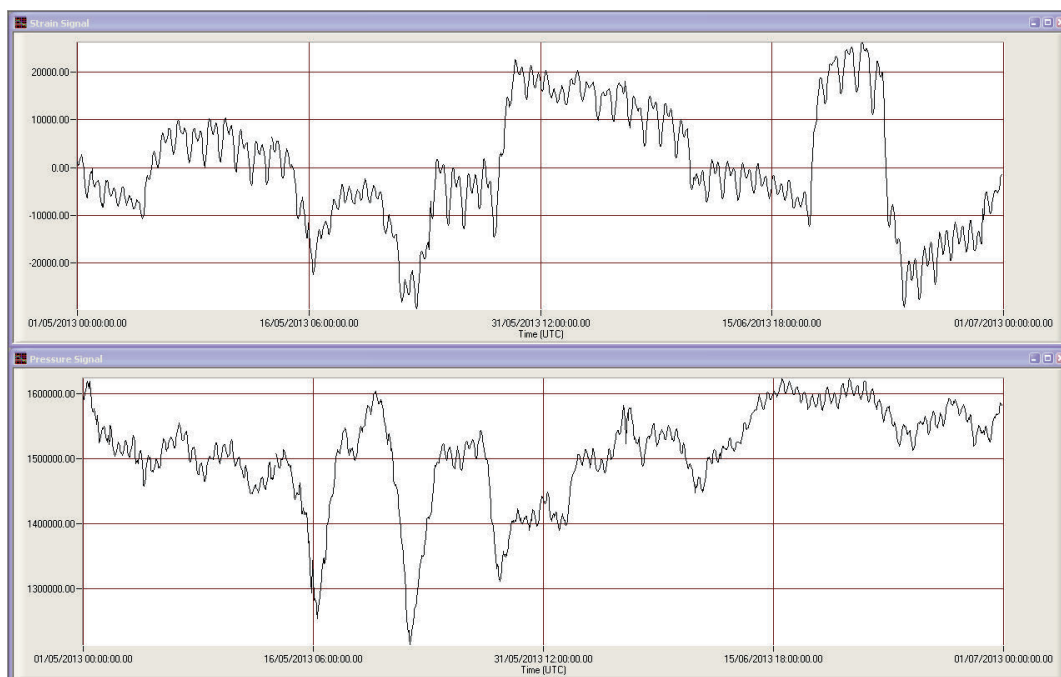


Figura 9a Segnali registrati a DRUV utilizzati come input nel programma di analisi mareale *Baytap-G* per la finestra bimestrale 1 maggio – 30 giugno 2013. Segnali di strain (in alto) e pressione atmosferica (in basso).
Figure 9a Signals recorded in DRUV and used as input in the tidal analysis program *Baytap-G* for the 2 months window from May 1 to June 30, 2013. Strain signal (top) and atmospheric pressure (bottom).

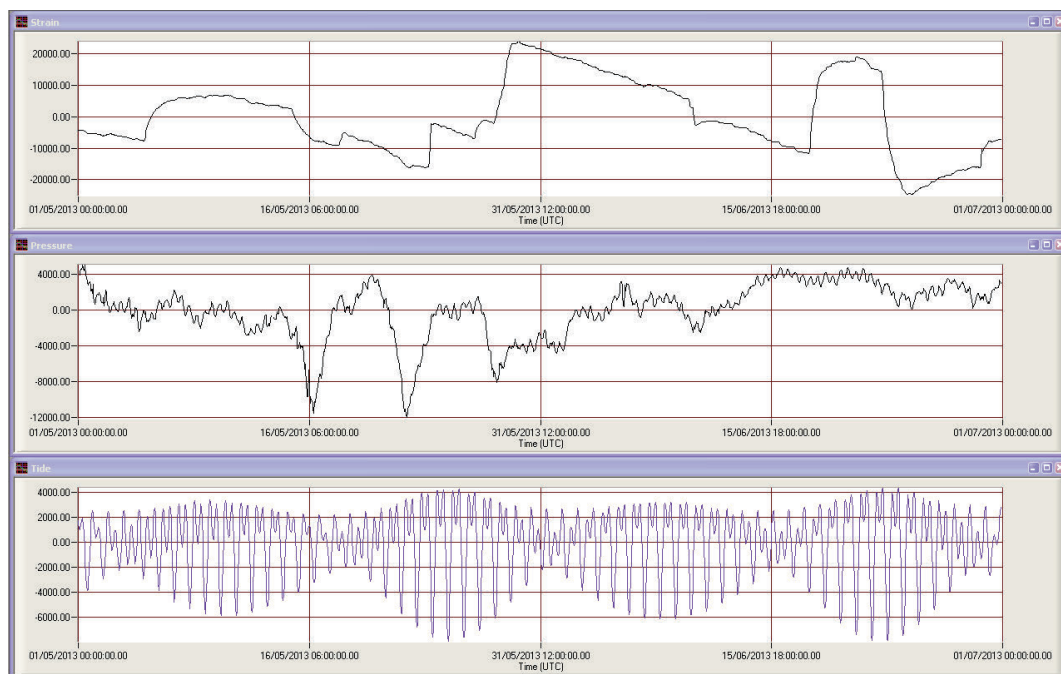


Figura 9b Segnali *output* per DRUV ottenuti dal programma di analisi mareale *Baytap-G* per la finestra bimestrale 1 maggio – 30 giugno 2013. Segnale di strain depurato dai contributi di pressione e maree (in alto), segnale residuo di pressione atmosferica (al centro), e segnale residuo dei contributi mareali (in basso, in blu). Per questo segnale residuo il programma calcola ampiezza e fase delle varie componenti mareali.
Figure 9b Output signals for DRUV obtained from the tidal analysis program *Baytap-G* for the 2 months window from May 1 to June 30, 2013. Strain filtered by the contribution of atmospheric pressure and tides (top), residual signal of atmospheric pressure (center), and residual signal with tidal contribution (bottom, in blue). For this residual signal the program calculates the amplitude and phase of the various tidal components.

4. Calibrazione segnali: metodi e risultati

I segnali dei sensori dilatometrici in foro sono solitamente affetti nei primi anni di funzionamento da una deriva di lungo termine [i.e., Roeloffs and Linde, 2007]. Questo andamento si attenua esponenzialmente negli anni ed è dovuto alla causa di diversi fattori, spesso di segno opposto e quindi non facilmente depurabili. I trend positivi di lungo termine sono dovuti sia al rilassamento del foro dopo la perturbazione dovuta alla perforazione che alla maturazione nel tempo del cemento, mentre eventuali trend negativi sono dovuti a possibili piccoli e lenti raffreddamenti che possono avvenire nel foro profondo dopo l'installazione. Maggiori dettagli sono forniti nel successivo capitolo 7. Comunque, dopo un certo periodo di tempo, solitamente mesi, è possibile verificare il grado di sensibilità strumentale ottenuta dopo l'installazione. Dunque, nonostante la deriva di lungo termine, dopo l'accoppiamento tra strumento e roccia in profondità, gli strainmeter necessitano di una calibrazione *in situ* per determinare in modo definitivo la risposta strumentale.

4.1 Calibrazioni assolute attraverso l'analisi delle maree terrestri

Il metodo tradizionalmente utilizzato per ottenere i fattori di calibrazione, cioè i coefficienti per convertire la registrazione da counts in nanostrain, si basa sul confronto tra le ampiezze atte-

se e quelle registrate del segnale mareale di strain sulla Terra. Solitamente sono utilizzate le oscillazioni mareali lunari diurna O1 (25.82 h) e semidiurna M2 (12.42 h) per confrontare i valori teorici di strain con i valori registrati dai dilatometri.

Le componenti O1 e M2 nei dati acquisiti dai dilatometri sono state stimate utilizzando il software BAYTAP-G [Tamura et al., 1991], che implementa la statistica Bayesiana per calcolare i parametri mareali di una serie di valori. I dati bruti sono selezionati in intervalli temporali di 1-2 mesi con campionamento di 1 ora e vengono pre-processati per rimuovere eventuali offset. Il programma considera pure possibili termini perturbatori, come la pressione atmosferica registrata alle stazioni che viene data in input. Un esempio di segnali di input e di segnali di output del programma è illustrato in figura 9. I parametri teorici delle maree M2 e O1 attese alle stazioni sono invece calcolati usando il software SPOTL package [Agnew, 1996] che calcola lo strain prodotto dalle forze astronomiche e dal carico oceanico. Infine i coefficienti di calibrazione sono ottenuti dal rapporto tra i valori delle maree osservate e quelle teoriche.

Per le prime due stazioni DEGI e DRUV installate a fine 2011, le calibrazioni sono state calcolate per finestre mobili di intervallo temporale di 2 mesi considerate nel periodo da gennaio 2012 a giugno 2013. I valori medi ottenuti per i coefficienti di calibrazione sono rispettivamente di 0.005 nstr/counts e 0.01 nstr/counts a DRUV e DEGI (Fig. 10).

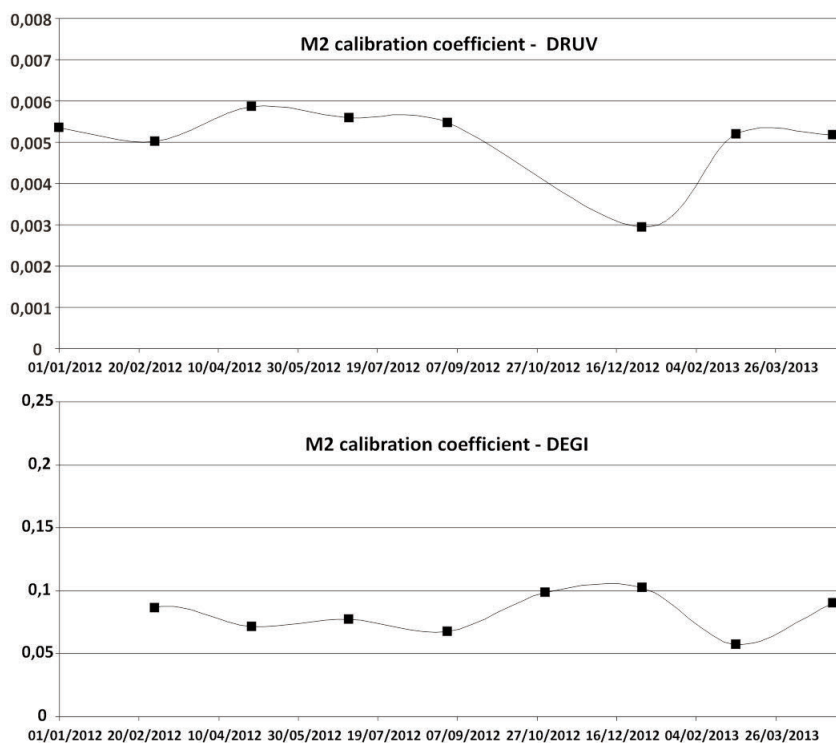


Figura 10 Coefficienti di calibrazione (per convertire da counts in nstrain) calcolati per finestre mobili di intervallo temporale di 2 mesi nel periodo da gennaio 2012 a giugno 2013. I coefficienti sono ottenuti dal confronto tra valori attesi e registrati per la variazione mareale lunare semi-diurna M2 (12.42 h).

Figure 10 Calibration coefficients (to convert from counts to nstrain) calculated for mobile windows with time interval of two months considered over the period from January 2012 to June 2013. The coefficients are obtained by comparing the expected and recorded values of the lunar tidal semi-diurnal oscillation M2 (12:42 h).

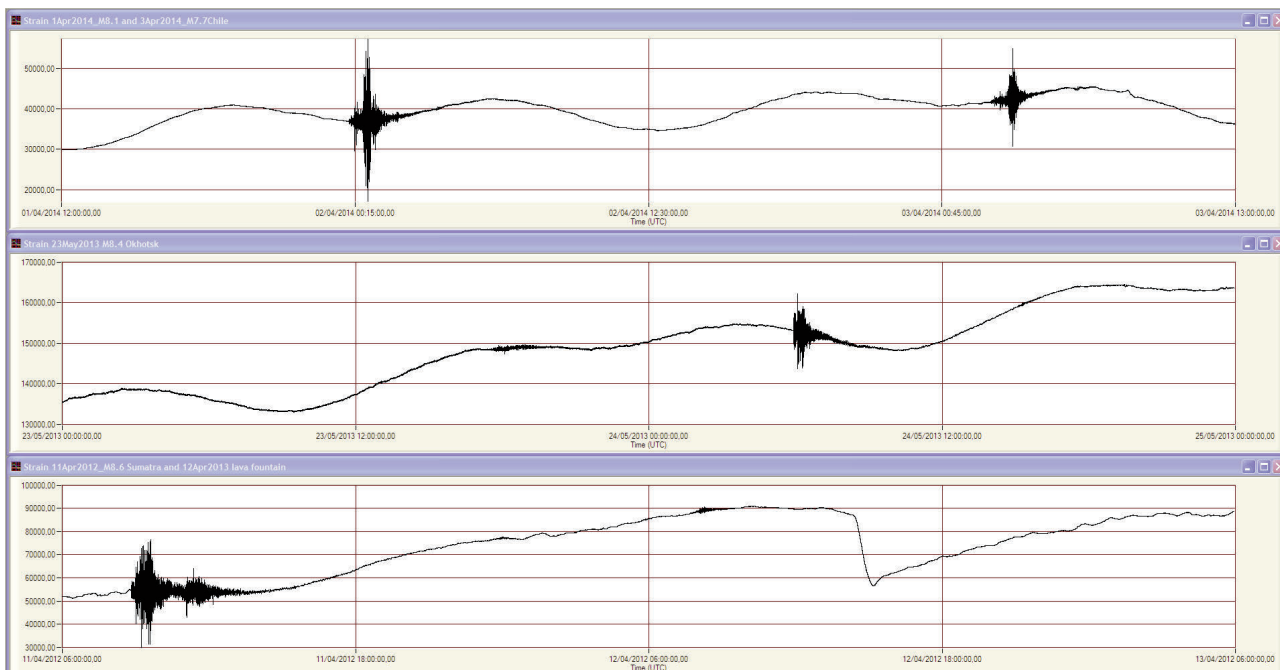


Figura 11 Esempi di registrazione di strain a DRUV di teleseismi $M > 8$. In alto il teleseisma M8.1 del 1 Aprile 2014 e il successivo M7.7 provenienti dal Cile. Al centro il teleseisma M8.4 del 23 Maggio 2013 proveniente dal Mare di Okhotsk. In basso il teleseisma M8.6 del 11 Aprile 2012 proveniente da Sumatra, con la variazione negativa del 12 Aprile 2012 registrata durante la fontana di lava dell'Etna. La finestra temporale è di 2 giorni (unità scala 12 ore). La scala verticale è in counts, con unità di scala 10.000 counts. **Figure 11** Examples of strain recordings of teleseismic events ($M > 8$) recorded at DRUV. Top signal, strain recording with the teleseismic event M8.1 of April 1, 2014 and the following M7.7 from Chile. Center signal, strain recording with the teleseismic event M8.4 of May 23, 2013 from the Sea of Okhotsk. Bottom signal, strain recording the teleseismic event of M8.6 April 11, 2012 from Sumatra followed 2 days after by the negative change recorded during the Etna's lava fountain of April 12, 2012. The time window is two days (scale unit 12 hours). The vertical scale is in counts, with the scale unit 10.000 counts.

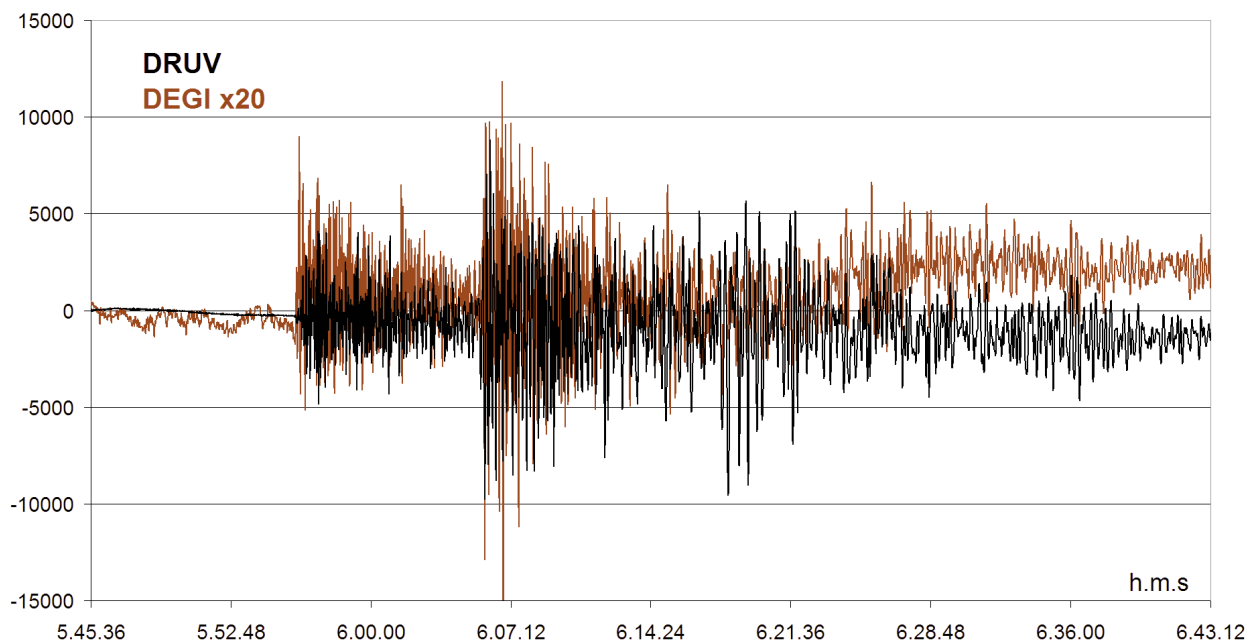


Figura 12 Segnali strain registrati (unità di scala in counts) a DRUV e DEGI al passaggio dell'onda del teleseisma M8.4 del 24 Maggio 2014 proveniente da Sea of Okhotsk. Per ottenere la buona sovrapposibilità dei segnali, il segnale di DEGI è stato moltiplicato per 20 che è lo stesso rapporto tra i fattori di calibrazione di DEGI e DRUV trovati nell'analisi mareale. **Figure 12** Strain recorded at DRUV and DEGI (scale unit in counts) during the travel wave from the teleseismic event M8.4 of 24 May 2014 from Sea of Okhotsk. To obtain the best overlap of the signals, DEGI has been multiplied by 20 that is the same ratio between the calibration factors of DEGI and DRUV inferred through the tide analysis.

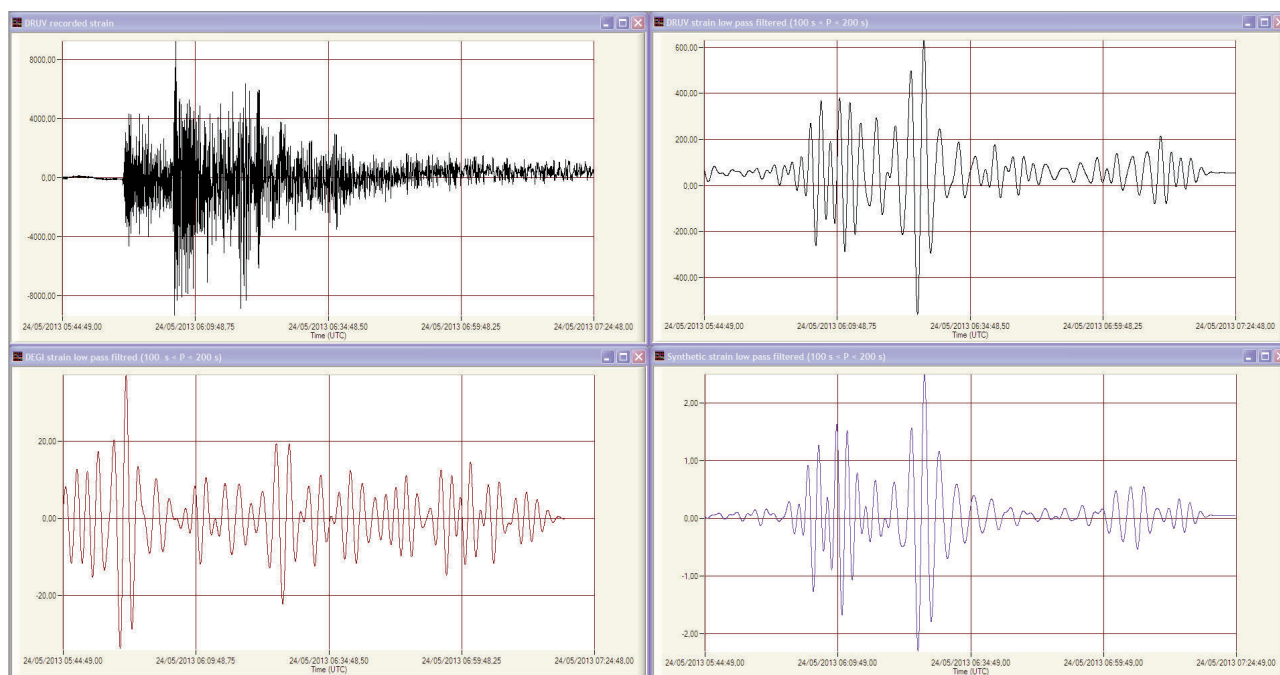


Figura 13 Telesisma M8.4 del 24 Maggio 2013, Sea of Oshotks (segnali dalle 05:44:49 alle 07:24:48 UT). In alto a sinistra, segnale di strain registrato a DRUV, campionamento 1 s. In alto a destra, segnale DRUV filtrato passa-basso con periodo $100 \text{ s} < P < 200 \text{ s}$. In basso a sinistra, segnale DEGI (marrone) filtrato passa-basso ($100 \text{ s} < P < 200 \text{ s}$). In basso a destra, segnale sintetico di strain (blu) dal codice Kamigaichi filtrato passa-basso ($100 \text{ s} < P < 200 \text{ s}$). I segnali sono in nanostrain e il filtro applicato è stato un Butterworth a 12 poli.

Figure 13 Sea of Oshotks M8.4 May 24, 2013. Top left DRUV recorded strain, sampling 1 s. Top right DRUV low pass filtered ($100 \text{ s} < P < 200 \text{ s}$) signal. Bottom left DEGI (brown) low pass filtered ($100 \text{ s} < P < 200 \text{ s}$) signal. Bottom right (blue signal) synthetic strain from Kamigaichi code filtered $100 \text{ s} < P < 200 \text{ s}$ (nanostrain).

Questi valori implicano un rapporto di 20 tra i fattori di calibrazione alle due stazioni, con DEGI che manifesta una minore sensibilità rispetto a DRUV che invece presenta una risposta eccellente. Questo è imputabile alla minore qualità dell'accoppiamento tra sensore e rocce circostanti a DEGI, in cui lo strumento è stato installato in rocce meno massive (con presenza di zone fratturate).

4.2 Calibrazioni relative attraverso il confronto con segnali registrati durante telesismi

Come validazione indipendente dei precedenti risultati delle calibrazioni, sono state comparate le ampiezze dei segnali di strain registrate durante i forti terremoti lontani (telesismi $M \geq 8$) (Fig. 11). I segnali di strain registrati confermano il rapporto 20 nella sensibilità delle risposte a DRUV e DEGI. Infatti moltiplicando per 20 i segnali registrati a DEGI durante il passaggio dei telesismi si ottengono segnali ben sovrapponibili a quelli registrati a DRUV, confermando il rapporto ottenuto dall'analisi mareale (Fig. 12).

4.3 Calibrazione assoluta attraverso comparazione tra telesismi registrati e sintetici

Un altro approccio per ottenere una calibrazione assoluta è quello di confrontare il segnale di strain registrato dai dilato-

metri al passaggio dell'onda di forti telesismi con i segnali sintetici dello strain attesi dal telesisma.

Per ottenere in uno specifico sito i segnali sintetici di strain provenienti da un determinato telesisma, definito dai suoi parametri e meccanismi di sorgente, si è utilizzato un codice fortran che applica la teoria dei modi normali (*normal modes theory*) di oscillazione della Terra [Gilbert and Dziewonski, 1975]. Il programma utilizza il 'preliminary reference Earth model' (PREM) come modello di rappresentazione delle proprietà medie della Terra in funzione del raggio planetario [Dziewonski and Anderson, 1981]. Per i dati di input del telesisma vengono utilizzati le localizzazioni e i meccanismi focali (*CMT solution*) calcolati e pubblicati dall'Università di Havard dai dati della rete mondiale dei sismogrammi di lungo periodo. Sono stati selezionati i pochi eventi $M > 8$ del 2012-2014, e quindi sono stati considerati i segnali registrati e sintetici con periodi $T > 100 \text{ s}$ applicando un filtro passa basso Butterworth di ordine 12. Per queste basse frequenze la somiglianza ottenuta tra i segnali sintetici e registrati è molto buona. I coefficienti di calibrazione ottenibili dal confronto delle ampiezze sintetiche e registrate confermano i precedenti risultati ottenuti attraverso l'analisi mareale.

Nelle figure 13 e 14 sono mostrati due esempi di risultati ottenuti dal confronto di segnali di strain sintetici e registrati per telesismi con $M > 8$.

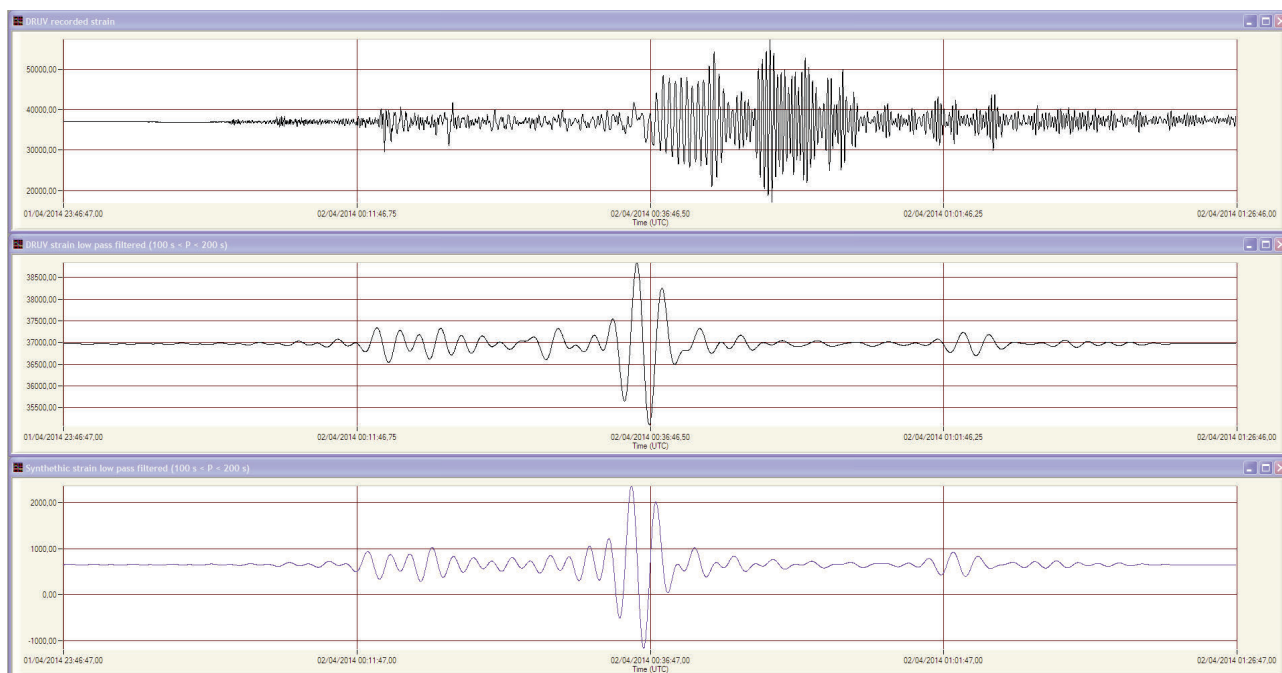


Figura 14 Telesisma M8.1 del 01 Aprile 2014, Cile (segnali dalle 05:44:49 alle 07:24:48 UT). In alto il segnale registrato a DRUV, campionamento 1'. Al centro il segnale DRUV filtrato passa-basso (100 s < P < 200s). In basso il segnale sintetico di strain ottenuto dal codice Kamigaichi filtrato passa-basso (100 s < P < 200s). I segnali sono in nanostrain e il filtro applicato è stato un Butterworth a 12 poli.

Figure 14 Northern Chile M8.1 April 01, 2014. (signals from 05:44:49 to 07:24:48 UT). Top: DRUV recorded signal. Center: DRUV low pass filtered (100 s < P < 200s) signal. Bottom: synthetic strain from Kamigaichi code, output filtered 100 s < P < 200 s.

5. Risultati scientifici ottenuti attraverso le prime installazioni (2011-2013)

5.1 Primi vincoli sulla sorgente delle fontane di lava all'Etna

Appena dopo il completamento delle installazioni, i dilatometri hanno avuto la possibilità di registrare interessanti variazioni di strain connesse all'attività eruttiva delle fontane di lava. Questi fenomeni rappresentano transienti veloci (durata media di qualche ora) che, come registrato dai dilatometri, riescono a essere ben rilevati anche in presenza di una deriva strumentale di lungo termine come quella inizialmente registrata da questi strumenti. I 44 eventi di fontana di lava, avvenuti tra il Gennaio 2011 e il Dicembre 2013, hanno avuto caratteristiche simili ad ogni evento con un'intensa attività esplosiva dal Nuovo Cratere di Sud Est (NSEC) della durata di qualche ora con altezze degli *ejecta* di 300-600 m, colonne di cenere che si espandevano sino 5-6 km di altezza e colate di lava che scendevano nel settore orientale del vulcano per 4-5 km (per maggiori dettagli vedere i report a www.ct.ingv.it)

La prima fontana di lava registrata è stata quella del 15 Novembre 2011, che è avvenuta appena due settimane dopo l'avvenuta installazione dei due dilatometri (Fig. 15). Entrambe le stazioni hanno registrato variazioni negative di

strain, che indicano espansione del mezzo circostante. Le variazioni di strain sono state registrate alle stazioni a distanze di 6 e 10 km dai crateri sommitali con un ordine di grandezza simile. Questo aspetto non può essere spiegato dalla sola azione di un condotto superficiale, a causa del rapido decadimento degli effetti deformativi attesi da questo tipo di sorgente [Bonaccorso and Davis 1999]. Pertanto, questo andamento di strain richiede un'altra sorgente che causa un rilassamento dell'edificio risentito anche a distanze di 10 km e che può essere associato all'azione di depressurizzazione di una sorgente (camera superficiale di magma) che alimenta la fontana di lava.

Se consideriamo l'azione di una cavità sferica, immersa in un semispazio elastico omogeneo sottoposto ad una variazione di pressione ΔP , allora lo strain volumetrico ϵ_{kk} in superficie [Roelloffs and Linde 2007] è:

$$\epsilon_{kk} = (1-2\nu) \frac{P}{G} a^3 \left[\frac{2}{(r^2 + d^2)^{3/2}} - \frac{3r^2}{(r^2 + d^2)^{5/2}} \right] \quad (1)$$

dove d è la profondità del centro della sorgente, r è la distanza orizzontale dal centro della sorgente, a è il raggio della sorgente e G è la rigidità del mezzo. Il modello elastico omogeneo, anche se è un caso semplificato, fornisce una prima

stima affidabile dello strain volumetrico atteso in quanto le stazioni di registrazione sono abbastanza lontane dall'area sommitale da non essere eccessivamente disturbate dagli effetti della topografia e della eterogeneità del mezzo. Infatti, metodi numerici [Bonaccorso et al., 2005] hanno verificato che all'Etna, per le distanze superiori a 5 km dalla zona sommitale, le perturbazioni nei campi di deformazione dovuti alla topografia e alle eterogeneità del mezzo sono abbastanza simili alle soluzioni analitiche ottenute nel caso del semi-spazio omogeneo.

Bonaccorso et al. [2013a] hanno mostrato che, in questo primo periodo di registrazione, dove erano presenti solo le calibrazioni relative ottenute dal confronto delle ampiezze registrate dai dilatometri durante i primi forti terremoti ($M > 7.5$), si possono ottenere precisi vincoli sulla profondità della sorgente. In figura 16 il valore normalizzato di strain è tracciato al variare del rapporto adimensionale r/d . Il grafico mostra che per una sorgente di depressurizzazione è atteso uno strain negativo (espansione) quando $r/d > \sqrt{2}$. Le variazioni di strain rilevate sono entrambe negative a DEGI

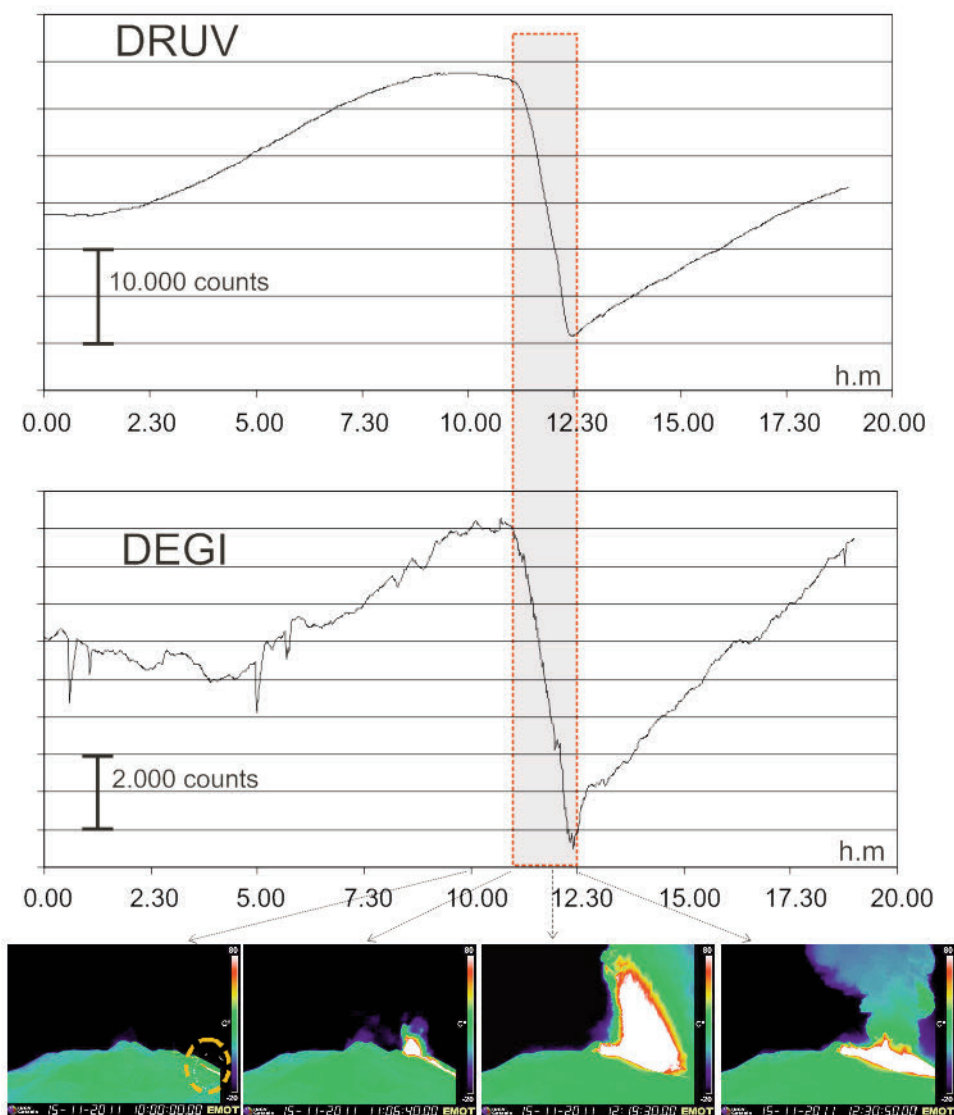


Figura 15 Segnali di strain registrati a DEGI e DRUV durante la fontana di lava del 15 Novembre 2011, appena due settimane dopo le installazioni dei dilatometri. Si osserva che la variazione negativa ad entrambe le stazioni (espansione del mezzo dovuta a una decompressione del vulcano durante la fase eruttiva) si verifica in modo marcato dall'inizio (ore 11:06 UT) alla fine (ore 12:30 UT) dell'attività di fontana. In basso sono riportate le immagini della telecamera termica della Montagnola (versante Sud, 2700 m s.l.m.)

Figure 15 Strain signals recorded at DEGI and DRUV during the lava fountain on 15 November 2011, just two weeks after the dilatometers installation. The negative variation at both stations (expansion of the medium due to a decompression of the volcano during the eruptive phase) occurs markedly from the beginning (11:06 UT) to the end (12:30 UT) of fountain activity. In the bottom the frames from the thermic cam of Montagnola (South flank, 2700 m a.s.l.) are reported.

e DRUV che sono entrambi situati a distanze maggiori di $d\sqrt{2}$ (Fig. 16). Il rapporto delle distanze delle stazioni (DRUV/DEGI) è ~ 1.6 (10 km / 6 km) e, considerata la calibrazione relativa, il rapporto delle ampiezze dei segnali DEGI/DRUV è di circa 5,7. Dunque, ne consegue dalla figura 7 che la distanza di DEGI deve essere almeno il doppio della profondità della sorgente. I limiti inferiore e superiore della profondità della sorgente sono indicati in figura 16 come DEGI_1 e DEGI_2, con le posizioni corrispondenti per DRUV anche esse indicate. Muovendosi in questo intervallo il rapporto tra le ampiezze va da ~ 2 ($r/d = 2$) a ~ 4 ($r/d = 4$), indicando che un fit migliore si ottiene per la sorgente

posizionata verso il limite di profondità superficiale. L'altitudine media dei 2 siti è 1,4 km s.l.m. e pertanto l'indicazione finale che ne scaturisce è che la profondità della sorgente è circa corrispondente al livello del mare o appena sopra [Bonaccorso et al., 2013a].

5.2 Variazioni registrate durante le fontane di lava, modellazione della sorgente, e considerazioni sui volumi eruttati

Dopo una prima fase iniziale in cui si è utilizzata la calibrazione relativa, nel corso del 2012 sono state avviate le analisi mareali per la valutazione dei coefficienti assoluti di calibra-

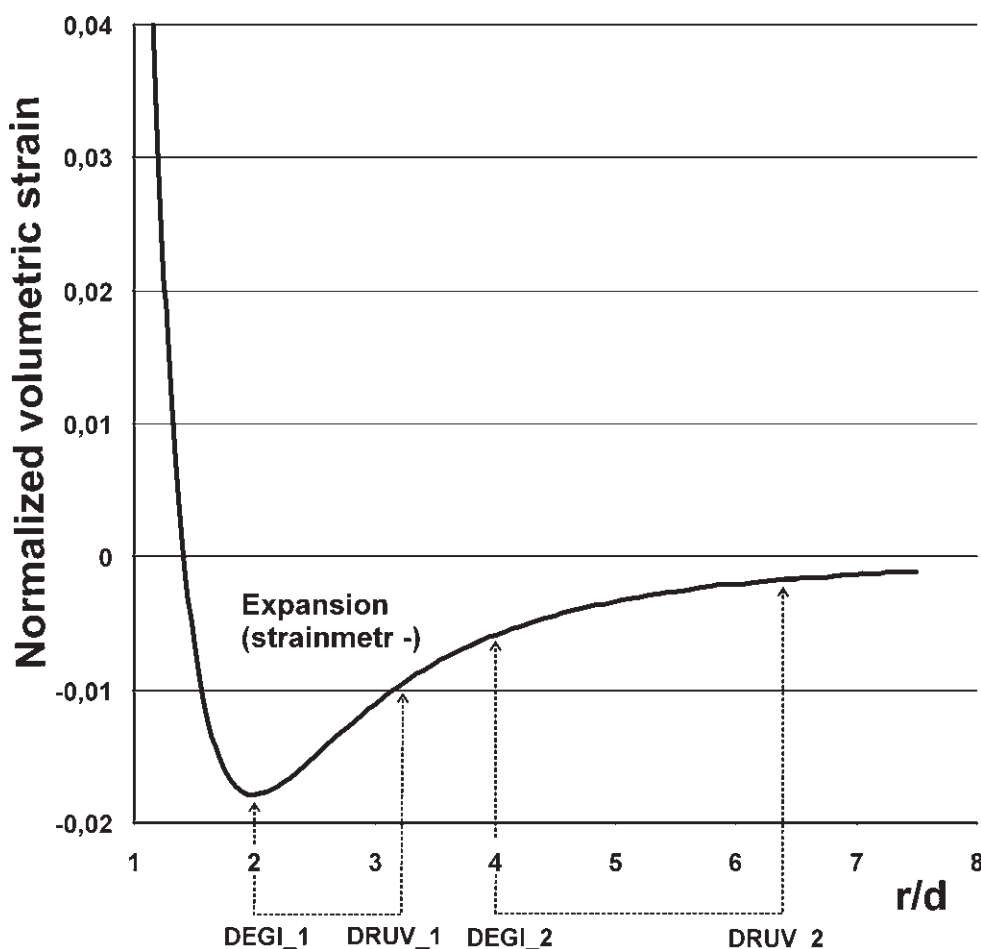


Figura 16 Strain volumetrico normalizzato relativo a una sorgente sferica depressurizzante (modello Mogi) al variare del coefficiente adimensionale r/d , dove r è la distanza orizzontale dalla sorgente e d è la profondità della sorgente. Lo strain volumetrico per $r = 0$ è $2 \frac{(1-2\nu) \Delta P a^3}{G r^3}$. I dettagli parametrici sono contenuti nell'equazione (1). Nei dilatometri utilizzati l'espansione è registrata come variazione negativa, mentre la compressione come variazione positiva. Durante le fontane di lava a DRUV e DEGI sono state registrate variazioni negative. La posizione DEGI_1 vincola il limite profondo della posizione della sorgente che non risulta maggiore di 3 km sotto la superficie di riferimento. Il limite superficiale della profondità della sorgente è almeno 1,5 km i.e. $r/d = 4$ per la posizione DEGI_2. Questo limite è meno vincolato nella curva, e potrebbe anche risultare meno profondo. Le posizioni corrispondenti per DRUV (DRUV_1 e DRUV_2) sono pure riportate.

Figure 16 Volumetric strain normalized relative to a depressurizing spherical source (Mogi model) varying the dimensionless coefficient r/d , where r is the horizontal distance from the source and d is the source depth. The volumetric strain for $r = 0$ is $2 \frac{(1-2\nu) \Delta P a^3}{G r^3}$. The parametric details are contained in the equation (1). In the used dilatometers, the expansion is recorded as a positive change, while the compression as a positive change. During the fountains lava fountains, at DRUV and DEGI negative changes were recorded. The position DEGI_1 constrains the deep position of the source that is not greater than 3 km below the reference surface. The limit of the shallower depth of the source is at least 1.5 km i.e. $r/d = 4$ for the location DEGI_2. This limit is less constrained in the curve, and may also be less deep. The positions corresponding to DRUV (DRUV_1 and DRUV_2) are also reported.

zione. La metodologia applicata e i risultati ottenuti sono stati descritti nel precedente capitolo 4. I valori ottenuti per i coefficienti di calibrazione (rispettivamente di 0.005 nstr/counts e 0.01 nstr/counts a DRUV e DEGI) hanno permesso di valutare i valori in strain delle variazioni dei segnali dilatometrici registrati durante le fontane di lava [Bonaccorso et al., 2013b]. Durante le fontane del 2011-2012 i dilatometri hanno registrato variazioni negative di strain simili con valori di 0.8 μ strain a DEGI e 0.15 μ strain a DRUV (Fig. 17).

Al fine di stimare in modo più robusto la profondità e la variazione di volume della sorgente che provoca queste

variazioni, Bonaccorso et al. (2013b) hanno applicato un modello numerico con il metodo agli elementi finiti (FEM) per valutare gli effetti di decompressione di una sorgente di volume di tipo ellissoidale all'interno di una reologia elastica. È stato utilizzato uno specifico software FEM in cui sono stati inclusi la topografia dell'Etna derivata da un DEM e l'eterogeneità del mezzo stimata dai risultati della tomografia sismica. Attraverso una procedura di *grid search*, si ottiene che lo strain registrato viene ben riprodotto dagli effetti di una sorgente con rapporto d'aspetto 0.5 (i.e., più allungata verticalmente) posta al livello del mare e che subisce una variazione

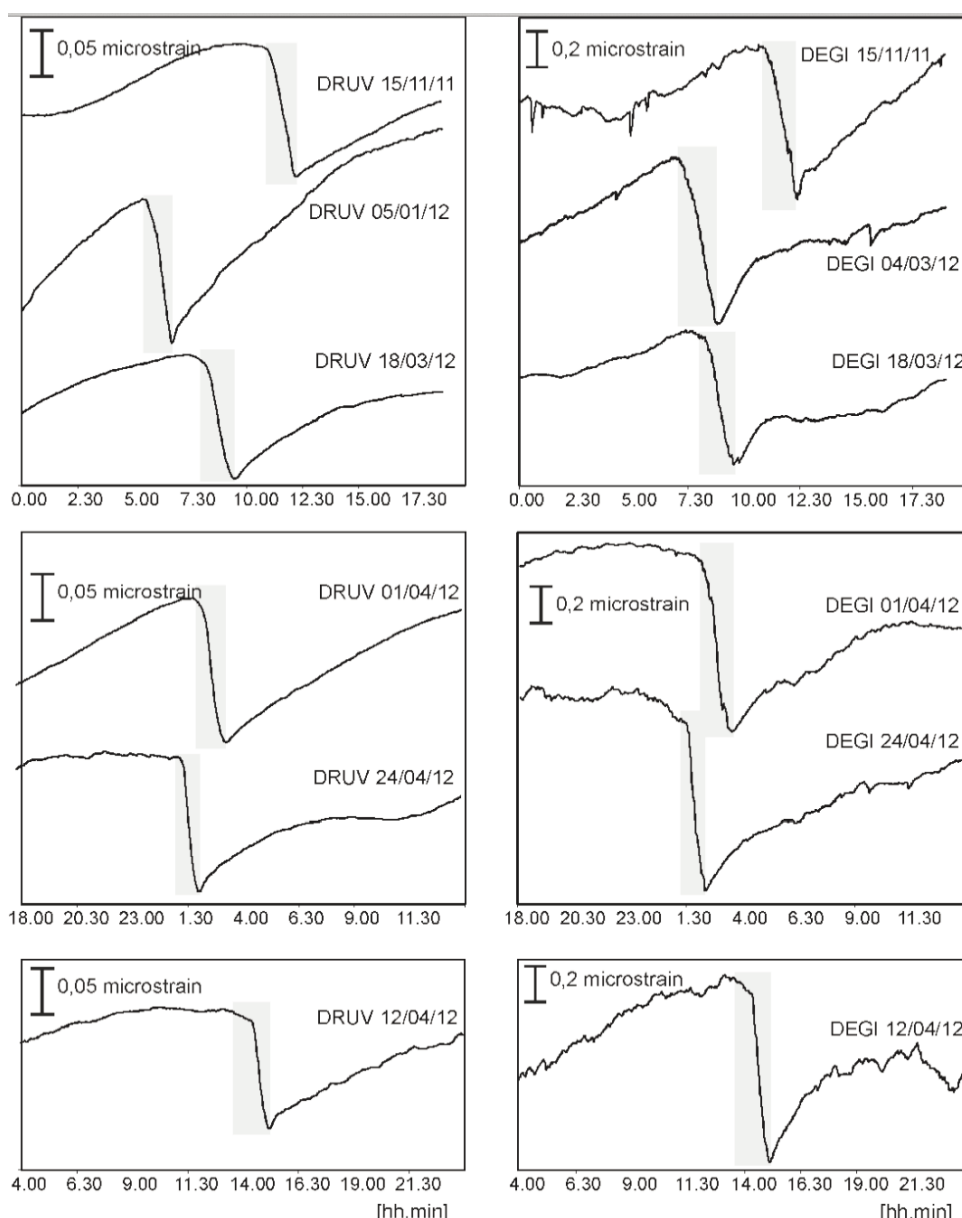


Figura 17 Segnali di strain registrati a DRUV e DEGI durante le fontane di lava nel periodo dal 15 Novembre 2011 al 24 Aprile 2012. Per DRUV sono mostrati i dati grezzi (campionamento al secondo) mentre per DEGI, a causa della forte deriva negativa presente in questo periodo, i dati sono stati detrended utilizzando un filtro lineare.

Figure 17 Strain signals recorded at DRUV and DEGI during the lava fountains occurred in the period from November 15, 2011 to 24 April 2012. For DRUV the raw data are shown (sample per second), while for DEGI, because of the strong negative drift present in this period, the data were detrended using a linear filter.

di volume ΔV_{source} di $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Fig. 18). Bonaccorso et al. [2013b] hanno inoltre considerato la stima di ca. $0.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ per il volume di magma aggiuntivo $\Delta V_{\text{compress}}$ che può essere accomodato nella sorgente per la compressibilità del magma. Pertanto, in base alla modellazione delle variazioni di strain registrate, il volume totale di magma emesso mediamente per ogni fontana di lava risulta:

$$\Delta V_{\text{magma}} = \Delta V_{\text{source}} + \Delta V_{\text{compress}} \sim 2.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3.$$

Questo valore medio, che può considerarsi un valore “rappresentativo” del volume totale di magma emesso per ciascuna fontana di lava [Bonaccorso and Calvari, 2013], è stato anche indipendentemente confermato dalla media per evento ottenuta dalla somma delle medie delle misure di volume

calcolate per la crescita del cono vulcanico del NSEC [Benncke et al., 2013] e per le colate prodotte dalle fontane [Ganci et al., 2012].

Tra i 44 episodi di fontane di lava del 2011-2013 l'evento più esplosivo è stato quello del 23 Novembre 2013 (Fig. 19 a,b). Questa fontana può essere considerata un *end-member* che ha mostrato caratteristiche prettamente esplosive con altezze massime della colonna della fontana di lava sino a 2.500-3.000 m sopra il NSEC, e a differenza dei precedenti non ha emesso un flusso lavico [Bonaccorso et al., 2014].

In figura 19c anche in questo caso si può osservare la buona coerenza dei segnali normalizzati registrati a DRUV e DEGI durante l'attività parossistica. In figura 19d si osserva inoltre come ci sia una prima fase a) con una minore altezza della colonna della fontana, quindi minore magma output, in cui

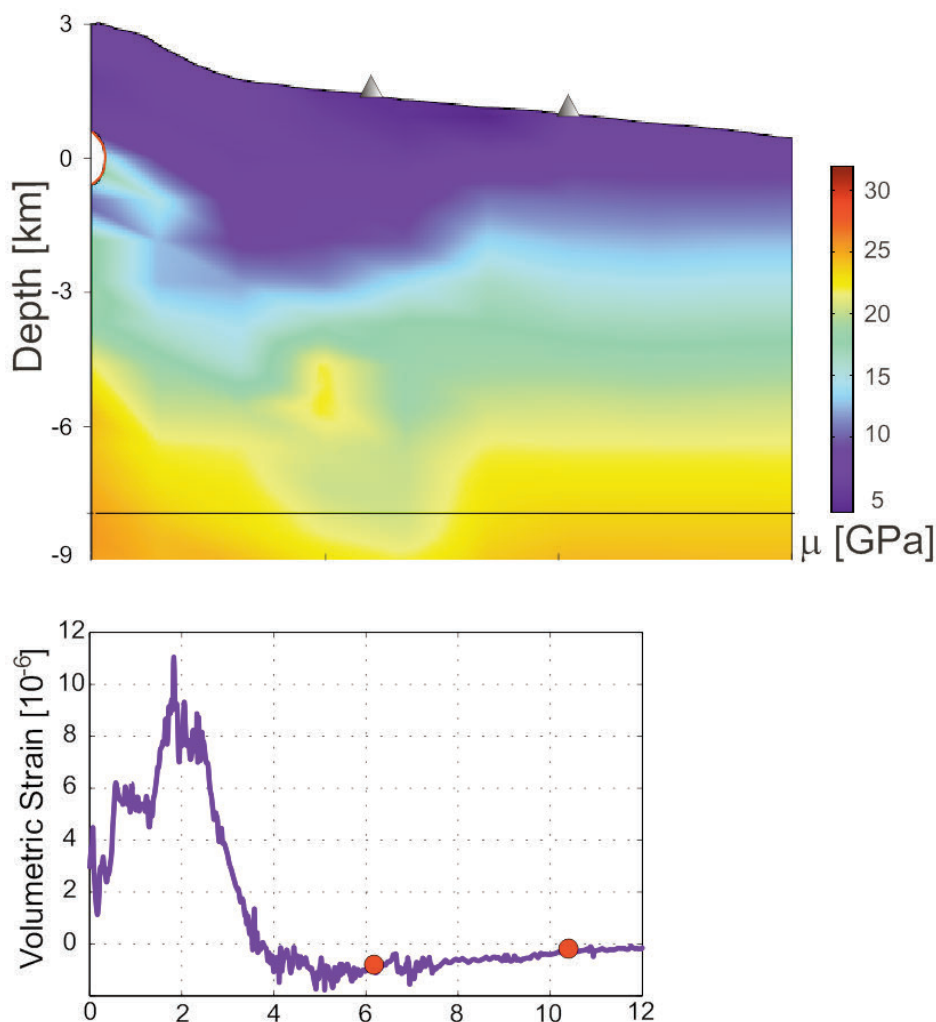


Figura 18 In alto: sezione del dominio di calcolo del modello elastico che utilizza la reale topografia ed eterogeneità del mezzo. La scala colorata riporta i valori del modulo di rigidità in GPa. In basso: variazioni di strain volumetrico registrate alle stazioni (cerchi rossi) e attese dal modello (linea blu). Come mostrato in Bonaccorso et al. (2013b) per la parte di sezione tra 4.5 e 2.5 km di distanza dall'asse centrale il modello numerico fitta anche le variazioni medie di tilt registrate a MSC (4.5 km dai crateri) e PDN (2.5 km dai crateri).

Figure 18 Top: section of the computational domain of the elastic model that uses with the real topography and heterogeneity of the medium. The color scale shows the values of the modulus in GPa. Bottom: changes in volumetric strain recorded at stations (red circles) and expected by the model (blue line). As shown in Bonaccorso et al. (2013b) for the part of the section between 4.5 and 2.5 km away from the central axis the numerical model also fits the mean changes of the tilt recorded at MSC (4.5 km from the craters) and PDN (2.5 km from the craters).

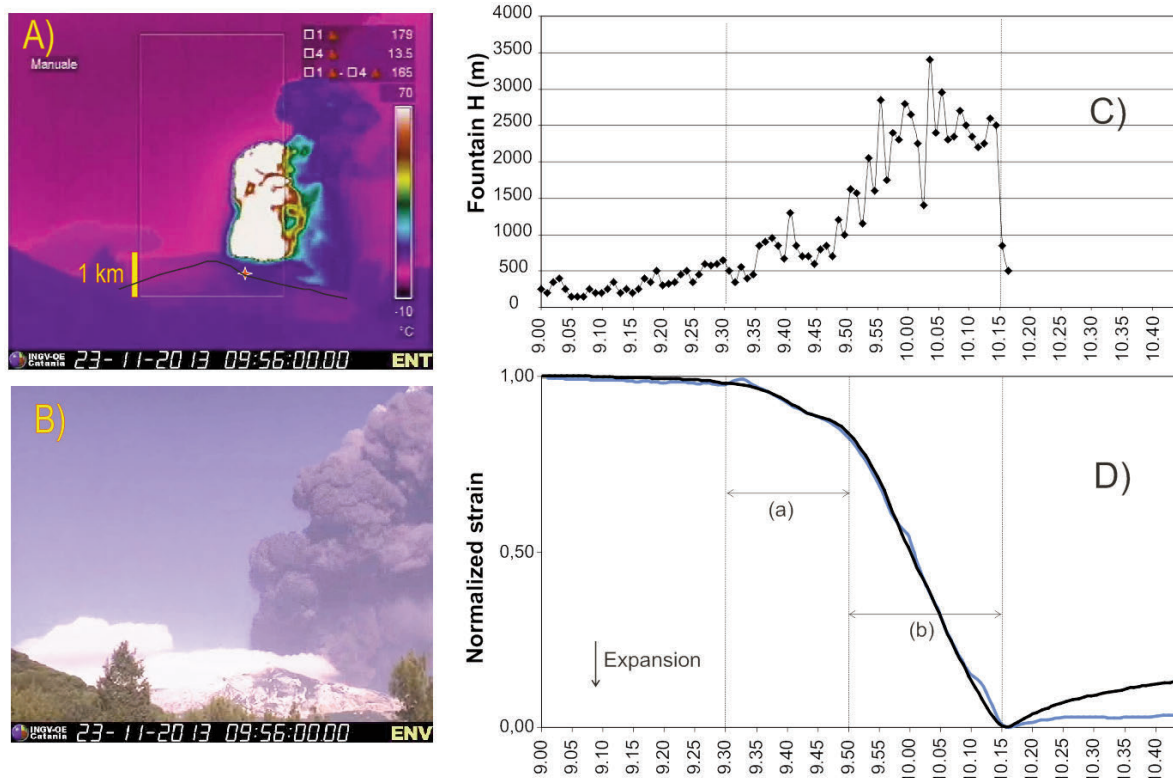


Figura 19 Fontana di lava del 23 Novembre 2013. A) Immagine dalla telecamera in campo termico ubicata a Nicolosi nel versante Sud. B) Immagine da telecamera in campo visibile ubicata a Nicolosi. C) Altezze nel tempo (tempo in hh.min) della colonna della fontana calcolate dalle immagini termiche. D) Segnali di strain normalizzati registrati a DRUV e DEGI. L'intervallo (a) indica la prima fase della fontana con una minore altezza della colonna eruttiva, mentre l'intervallo (b) indica la fase parossistica più intensa con l'altezza della fontana notevolmente incrementata.

Figure 19 Lava fountain of November 23, 2013. A) Image from the thermal cam located at Nicolosi in the South flank. B) Image from the visible cam located at Nicolosi. C) Heights in time (time in hh.min) of fountain column calculated from thermal images. D) Normalized strain signals recorded at DRUV and DEGI. The interval (a) indicates the first phase of the fountain with a lower height of the eruptive column, whereas the interval (b) indicates the more intense paroxysmal phase with the height of the fountain greatly increased.

lo strain varia negativamente con minore pendenza. A seguire si ha una fase b) con l'attività parossistica più intensa in cui si ha maggiore emissione di magma, e quindi maggiore decompressione del vulcano, e coerentemente i segnali di strain presentano un'accelerazione della pendenza negativa.

6. Esempio recente dei segnali a tutte le stazioni durante la fontana del 28 Dic. 2014

Dopo i numerosi eventi parossistici del 2011-2013, nei primi mesi (Gennaio-Aprile) e nell'estate (Luglio-Agosto) del 2014 l'Etna è stato caratterizzato da sola attività effusiva sub-terminale, cioè attività di colate di lave emesse dal cratere NSEC e da una bocca sommitale molto vicina ai crateri centrali. Dopo una sosta dell'attività esplosiva di circa un anno, il 28 Dicembre 2014, si è verificata l'unica fontana di lava del 2014 [vedere rapporti in www.ct.ingv.it]. Le quattro stazioni dilatometriche, dopo l'installazione di DPDN e DMSC appena avvenuta in Novembre 2014, erano tutte funzionanti.

Dunque, in attesa di avviare nel prossimo futuro le calibrazioni anche per i segnali di queste stazioni di recente più installazione, questa forte attività parossistica ha permesso di verificare lo stato di funzionalità e la risposta della rete completa durante un evento eruttivo significativo (Fig. 20).

Similmente alle precedenti fontane del 2011-2013, durante la fase parossistica entrambe le stazioni DRUV e DEGI registrano un evidente segnale negativo (espansione del mezzo circostante associata alla decompressione dell'esplosione) che inizia circa alle 16:15 e finisce alle 19:05 U.T. L'aspetto nuovo e interessante è che stavolta la stazione di Monte Egitto a partire dalle 13:50, cioè circa 2 ore e mezza prima dell'inizio del parossisma, registra un lieve e graduale segnale positivo (compressione del mezzo) che interrompe e contrasta l'andamento di deriva negativa di medio-lungo termine presente nel segnale. Questo andamento di segnale positivo (che significa compressione del mezzo circostante) che precede la fontana di lava è registrato in modo marcato alle due nuove stazioni DMSC e DPDN poste a quota superiore e più vicine all'asse craterico. Le tre stazioni (DEGI, DMSC

e DPDN) registrano questa variazione positiva a partire dalle 13:40 sino alle 16:15 quando bruscamente inizia la fontana di lava e la relativa decompressione provoca un segnale negativo a tutte le stazioni sino a circa le 19 circa quando la fontana si esaurisce (Fig. 20).

È interessante osservare che la variazione positiva che precede la fontana di lava, essendo meglio rilevata dalle due nuove stazioni più vicine all'area sommitale e di contro non risentita dalla stazione più distale (DRUV), è imputabile a una sorgente più superficiale che agisce con un'azione tensionale compressiva prima dell'innesco della fontana. Questo interessante elemento di novità associato a questa fontana è dunque ben evidenziato dal network completo e sarà oggetto di futuri studi di approfondimento.

7. Segnali di strain nel medio-lungo termine

I segnali registrati dai dilatometri in pozzo sono affetti nei primi anni di funzionamento da una deriva di lungo termine, che solitamente si attenua esponenzialmente negli anni. Il contributo al trend positivo (compressione) di lungo termine

è dovuto a due lente concause: il rilassamento del foro dopo la perturbazione dovuta alla trivellazione e alla maturazione nel tempo del cemento. Invece la parte di trend negativo (estensione) di lungo termine è imputabile a possibili piccoli e lenti raffreddamenti del mezzo che possono avvenire e nell'area circostante e all'interno del foro profondo dopo l'installazione (ad esempio il lento raffreddamento del cemento dopo la fase iniziale di riscaldamento per reazione chimica della malta cementizia con l'acqua di impasto).

Ovviamente la concausa di questi diversi fattori, anche di segno opposto, rendono non facilmente filtrabili i segnali. I trend di lungo termine sono comunque solitamente monotoni con pendenze che decrescono nel tempo, in modo da essere spesso associati a andamenti di tipo esponenziale [Roelloffs and Linde, 2007]. La tecnica comunemente utilizzata per depurare i segnali rimuovendo i trend di lungo termine è quello di considerare il *best fit* con una opportuna funzione parametrica e quindi rimuoverne il contributo. È comunque vero che qualsiasi tecnica di filtraggio si adotti, questa risulta sempre una scelta arbitraria sia per il tipo di funzione-filtro selezionata che per l'intervallo utilizzato.

Nelle figure 21 e 22 sono riportati i segnali registrati nel

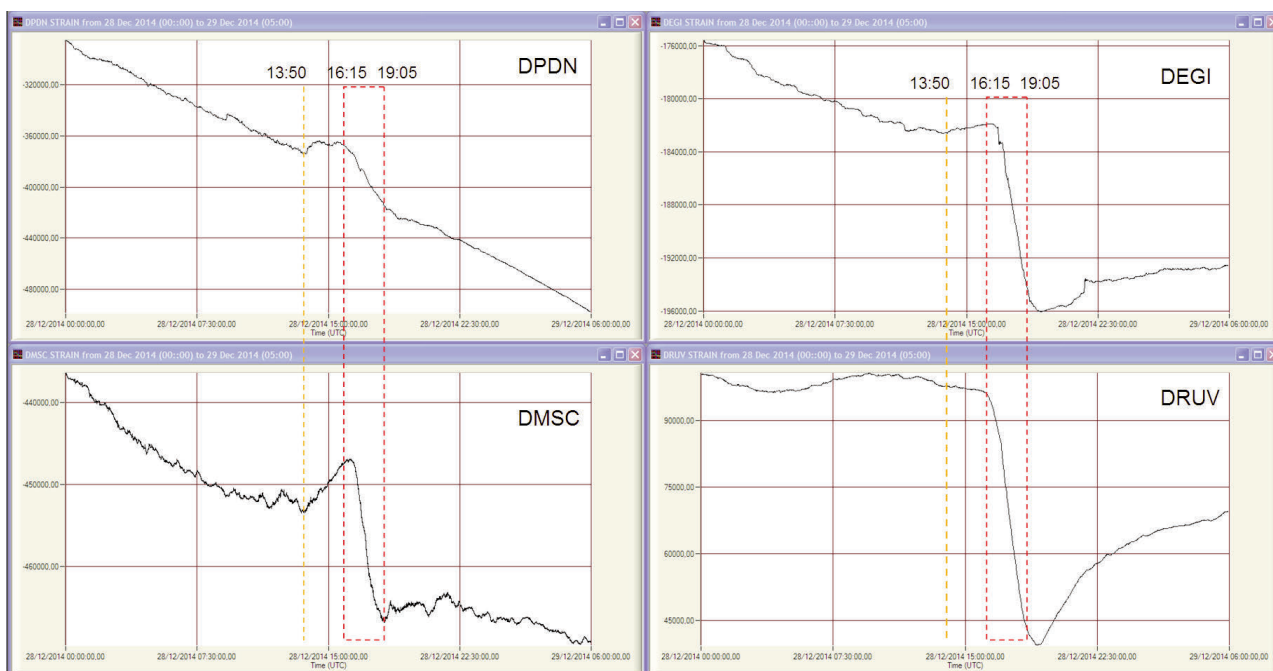


Figura 20 Segnali di strain registrati dal 28 (0:00) al 29 (06:00) Dicembre 2014 dai quattro dilatometri in pozzo installati all'Etna. Similmente alle precedenti registrazioni di DRUV e DEGI durante le fontane di lava del 2011-2013, durante la fase parossistica le stazioni registrano un evidente segnale negativo (espansione del mezzo circostante associata alla decompressione dell'esplosione) che inizia circa alle 16:15 e finisce alle 19:05 U.T. Le stazioni DEGI, DMSC e DPDN a partire dalle 13:50, cioè circa 2 ½ ore prima dell'inizio del parossisma, registrano una variazione positiva (compressione del mezzo), più marcata alle nuove stazioni più sommitali (DMSC e DPDN) che interrompe e contrasta l'andamento di deriva negativa di medio-lungo termine presente nel segnale. Questa variazione positiva essendo rilevata dalle stazioni più vicine all'area sommitale, è imputabile a una sorgente più superficiale che agisce prima dell'innesco della fontana.

Figura 20 Strain signals recorded from 28 (0:00) to 29 (06:00) December 2014 by the four borehole dilatometers installed at Etna. Similarly to the previous recordings of DRUV and DEGI during the lava fountains of 2011-2013, during the paroxysm phase the stations showed a clear negative signal (expansion of the surrounding medium associated with the explosion decompression) that starts at 16:15 and ends at about 19:05 UT. The stations DEGI, DMSC and DPDN starting at 13:50, that is about 2½ hours before the paroxysm, recorded positive signal (compression of the medium). This positive change was stronger at the new summit stations (DMSC and DPDN) and interrupted and opposed the negative long-term drift trend of the signal. This positive change, being detected by the stations closest to the summit, is attributable to a shallower source acting before the starting of the lava fountain.

lungo periodo di 3 anni (2012-2014) rispettivamente a DRUV e DEGLI. I segnali sono stati opportunamente ripuliti dai vari offset che si presentano durante l'apertura delle valvole di riequilibrio presenti nello strumento. Si può osservare che

DRUV, come atteso teoricamente, mostra un comportamento positivo esponenziale di lungo termine che si sta attenuando negli anni (Fig. 21). Il foro di DRUV non presenta particolari variazioni di lungo termine della temperatura che è sti-

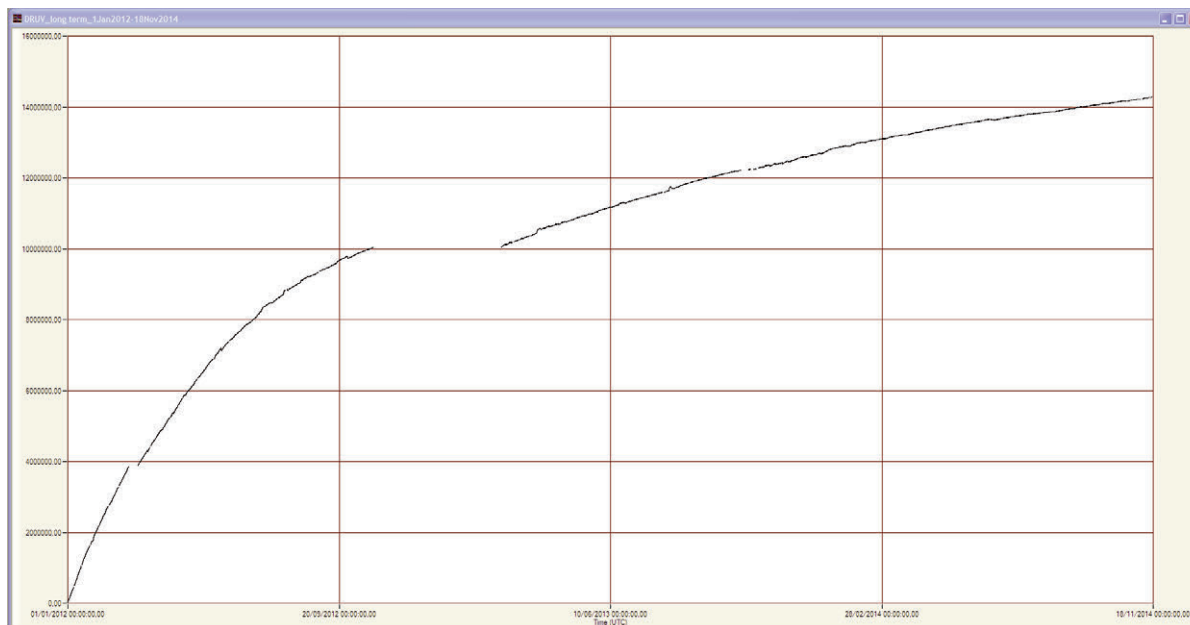


Figura 21 Segnale di strain registrato a DRUV dal 1 Gennaio 2012 al 18 novembre 2014. Il segnale è stato ripulito da tutti gli offset che si presentano durante l'apertura delle valvole presenti nello strumento per il riequilibrio degli eccessi di strain.
Figure 21 Strain signal recorded at DRUV from January 1, 2012 to November 18, 2014. The signal was cleaned from all the offsets that occur during the opening of the instrumental valves for the balance of the strain excess.

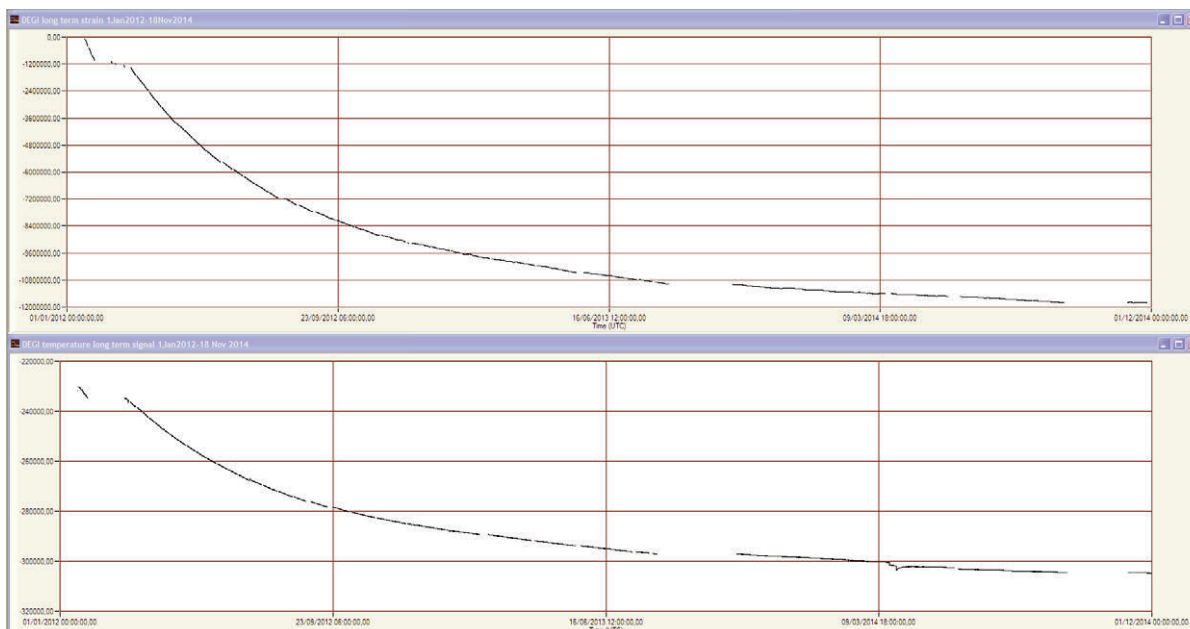


Figura 22 Segnali registrati a DEGLI dal 1 Gennaio 2012 al 18 Novembre 2014. In alto segnale registrato dal sensore accoppiato alla seconda valvola (DT2), che è sensibile solo alla temperatura. In basso il segnale di strain. I segnali sono stati ripuliti da tutti gli offset che si presentano durante l'apertura delle valvole di riequilibrio presenti nello strumento. Il segnale di strain presenta un andamento decrescente di lungo termine che è dovuto a un lento raffreddamento presente nel foro profondo, come evidenziato dall'andamento decrescente speculare del segnale in alto DT2.
Figure 22 Signals recorded at DEGLI from January 1, 2012 to November 18, 2014. Top: signal recorded by the sensor coupled to the second valve (DT2), that is sensitive only to temperature changes. Bottom: strain signal. The signal was cleaned from all the offsets that occur during the opening of the instrumental valves for the balance of the strain excess. The strain signal shows a decreasing long term trend term that is due to a slow cooling in the deep hole, as highlighted by the mirror decreasing trend of the upper DT2 signal.

mabile dall'andamento del segnale DT2, che è sensibile alle sole variazioni termiche. Invece a DEGI si osserva che il segnale presenta un andamento decrescente di lungo termine che è sicuramente dovuto a un lento raffreddamento presente nel foro profondo, come testimoniato dall'andamento decrescente speculare del segnale DT2 (Fig. 22a, b).

In generale, l'accoppiamento con il mezzo circostante è molto buono soprattutto nella stazione DRUV, come confermato dal perfetto rilevamento delle componenti mareali, e possiamo considerare questa stazione come quella di riferimento e maggiormente rappresentativa. DRUV mostra un andamento esponenziale che si sta lentamente attenuando. È inoltre interessante evidenziare che nonostante la deriva i

segnali hanno evidenziato nel breve termine la chiara risposta (variazione negativa dello strain) durante le fontane di lava, che testimonia la potenzialità strumentale a registrare nel breve termine variazioni estremamente piccole anche in presenza di una deriva di medio-lungo termine (Fig. 23). Diversamente dai casi di sorgenti che producono variazioni veloci di strain (esempio fontane di lava e/o intrusioni), la deriva può mascherare, o quanto meno renderne di difficile valutazione, eventuali variazioni modeste di origine vulcanica che avvengono nel medio-lungo termine (mesi-anni). Per evidenziare le possibili variazioni di medio termine, il segnale dal 21 Ottobre al 17 Novembre è stato filtrato sottraendo al segnale registrato il segnale di best fit polinomiale di 3°

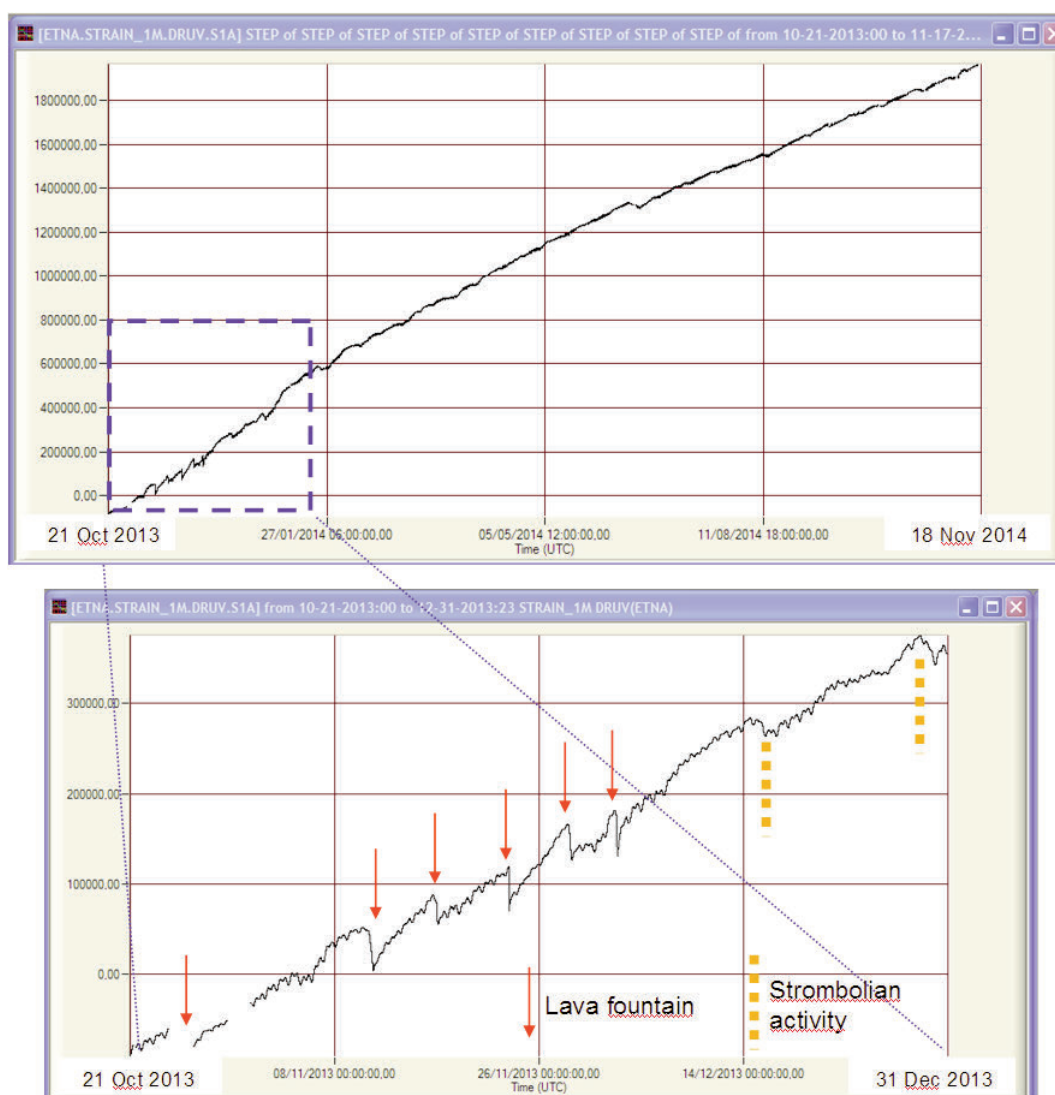


Figura 23 In alto. Segnale di strain a DRUV dal 21 Ottobre 2013 al 18 Novembre 2014 (unità scala 200×10^3 counts). In basso: segnale di strain alla stazione DRUV dal 21 Ottobre 2013 al 10 Novembre 2014 (unità scala 100×10^3 counts). Come atteso da questa tipologia strumentale, il segnale (dati bruti con campionamento al minuto) è affetto da deriva strumentale a lungo termine (anni), che mostra un andamento esponenziale che si sta lentamente attenuando. Le frecce indicano gli episodi di fontana di lava, mentre i tratti verticali indicano le due fasi di attività stromboliana intensa del 15-17 Dicembre e 29-31 Dicembre.

Figure 23 Top: strain Signal at DRUV from October 21, 2013 to November 18, 2014 (unit scale 200×10^3 counts). Bottom: strain signal at DRUV from October 21, 2013 to November 10th 2014 (unit scale 100×10^3 counts). As expected from this type of instrument, the signal (raw data with sampling per minute) is affected by instrumental drift in the long term (years), which shows an exponential trend that is slowly attenuating. The arrows indicate the episodes of lava fountain, the vertical lines indicate the two phases of intense Strombolian of 15 to 17 and 29 to 31 December 2013.

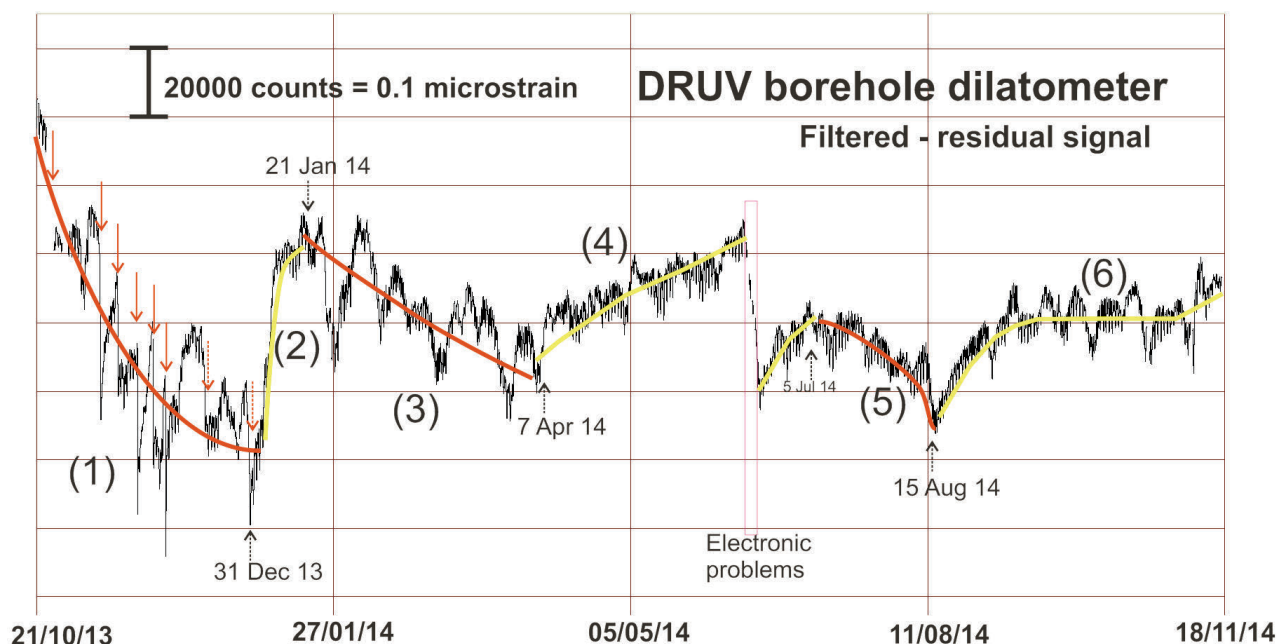


Figura 24 Segnale filtrato di strain a DRUV dal 21 Ottobre 2013 al 18 Novembre 2014 (unità scala 20×10^3 counts = 0.1 micro-strain). Il segnale proviene da quello registrato (Fig. 23) a cui è sottratto il segnale di best fit polinomiale di 3° ordine al fine di rimuovere la deriva di lungo termine. Il segnale residuo marca bene le varie fasi di attività: (1) fase con 6 fontane di lava e 2 eventi di forte attività stromboliana prolungata; (2) fase di ricarica; (3) flusso lavico da NSEC, periodo 21 Gen – 7 Apr 2014; (4) fase di ricarica; (5) flusso lavico dal vent ubicato tra SEC e NEC, periodo 10 – 15 Ago 2014; (6) fase di ricarica.

Figure 24 Filtered strain signal of DRUV from October 21, 2013 to November 18, 2014 (20 units scale counts $\times 10^3$ = 0.1 micro-strain). The signal comes from that recorded (Fig. 23) to which it is subtracted the signal of the best fit polynomial of 3rd order in order to remove the long term drift. The residual signal fit the various phases of activity: (1) phase with 6 lava fountains and 2 events of prolonged strong Strombolian activity; (2) recharging phase; (3) lava flow from NSEC, period January 21 to April 7, 2014; (4) recharging phase; (5) lava flow from the vent located between SEC and NEC, period 10 to 15 August 2014.

ordine. Il segnale residuo ottenuto è mostrato in figura 24. È ben evidente come il segnale filtrato evidenzia le differenti fasi del vulcano quali l'attività con fuoriuscita di lava (episodi parossistici e/o effusioni sommitali) avvenuti nel periodo ottobre 2013 – Novembre 2014 e i relativi periodi di ricarica che le hanno precedute.

Ringraziamenti

Si ringrazia O. Campisi che in modo fattivo ha contribuito alla progettazione e realizzazione delle infrastrutture per l'alloggiamento dell'elettronica e dei sistemi energetici. Si ringrazia A. Pistorio che nella fase iniziale è stato di supporto al controllo e gestione strumentale. Una menzione di riconoscimento e gratitudine va ai colleghi americani A. Linde, S. Sacks, M. Acierno, B. Schleigh e M. Crawford del Carnegie Institution di Washington - Department Terrestrial Magnetism del (CIW-DTMW) che hanno coordinato le fasi delle installazioni conclusive, e con cui continuano proficui scambi collaborativi. Il codice Fortran per il calcolo dello strain sintetico atteso da forti terremoti è una versione predisposta da O. Kamigaichi (Japan Meteorological Agency),

fornitaci da A. Linde nell'ambito della collaborazione scientifica dell'INGV con il CIW-DTM. La realizzazione delle perforazioni e l'assistenza logistica durante le installazioni sono state fornite con grande professionalità dalla ditta Iraci Cappuccinello, Nissoria (EN). Un ringraziamento particolare è dovuto a tutta l'Unità Funzionale Gravimetria e Magnetismo (2010-2013) dell'INGV-CT per il continuo scambio di idee e informazioni che ha favorito un proficuo *feed-back* tra attività di ricerca e monitoraggio.

Bibliografia

- Agnew D.C., (1996). *SPOTL: Some Programs for Ocean-Tide Loading*. SIO Reference Series, 96-8, Scripps Institution of Oceanography.
- Behncke B., Branca S., Corsaro R.A., De Beni E., Miraglia L. and Proietti C., (2014). *The 2011-2012 summit activity of Mount Etna: Birth, growth and products of the new SE crater*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 270, 10-21.
- Bonaccorso A. and Davis P., (1999). *Models of ground deformation from vertical volcanic conduits with application to*

- eruptions of Mount. St. Helens and Mount Etna, *J. Geophys. Res.*, 104, 10531-10542.
- Bonaccorso A., Falzone G., and Gambino S., (1999). *An investigation into shallow borehole tiltmeters*. *Geophys. Res. Lett.* 26, 11, 1637-1640.
- Bonaccorso A. and Davis P.M., (2004). *Modeling of ground deformation associated with recent lateral eruptions: Mechanics of magma ascent and intermediate storage at Mt. Etna*. Monograph of American Geophysical Union "Etna: Volcano Laboratory", n.143, 293-306.
- Bonaccorso A., Cianetti S., Giunchi C., Trasatti E., Bonafede M., and Boschi E. (2005). *Analytical and 3D numerical modeling of Mt. Etna (Italy) volcano inflation*. *Geophys. J. Int.*, 163, 852-862.
- Bonaccorso A., Calvari S., Currenti G., Del Negro C., Ganci G., Linde A., Napoli R., Sacks S. and Sicali A., (2013a). *From Source to Surface: Dynamics of Etna's Lava Fountains Investigated by Continuous Strain, Magnetic, Ground and Satellite Thermal Data*. *Bulletin of Volcanology*, 75:690. doi: 10.1007/500445-013-0690-.
- Bonaccorso A., Currenti G., Linde A. and Sacks S., (2013b). *New data from borehole strainmeters to infer lava fountain sources (Etna 2011-2012)*. *Geophys. Res. Lett.*, 40-14, 3579-3584, 2013. doi: 10.1002/grl.50692.
- Bonaccorso A. and Calvari S., (2013). *Major effusive eruptions and recent lava fountains: balance between expected and erupted magma volumes at Etna volcano*. *Geophys. Res. Letters*, 40, 1-5. doi: 1002/2013GL058291.
- Bonaccorso A., Calvari S., Linde A. and Sacks S., (2014). *Eruptive processes leading to the most explosive lava fountain at Etna volcano: The 23 November 2013 episode*, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 2014. doi:10.1002/2014GL060623.
- Dziewonski A.M. and Anderson D.L., (1981). *Preliminary reference Earth model, Physics of the Earth and Planetary Interiors*, V. 25, I.4, 297-356. doi:10.1016/0031-9201(81)90046-7.
- Ganci G., Harris A.J.L., Del Negro C., Guéhenneux Y., Cappello A., Labazuy P., Calvari S. and Gouhier M., (2012), *A year of lava fountaining at Etna: volumes from SEVIRI*. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L06305. doi:10.1029/2012GL051026.
- Gilbert F. and Dziewonski A.M., (1975). *An application of normal mode theory to the retrieval of structural parameters and source mechanisms from seismic spectra*. *Philos. Trans. R. Soc. London*, 278 (1975), pp. 187-269 Ser. A.
- Goldstein P., Dodge D., Firpo M. and Minner L., (2003). *SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers*. Invited contribution to "The IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology", Edited by WHK Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, and C. Kisslinger, Academic Press, London.
- Meertens C.M. and Wahr J.M., (1986). *Topographic effect on tilt, strain, and displacement measurements*. *J. Geophys. Res.*, 91, (B14), 14057-14062.
- Roeloffs E.A. and Linde A.T., (2007). *Borehole observations and continuous strain and fluid pressure*. In: "Volcano Deformation". Springer-Verlag, pp. 305-322.
- Sacks I.S. and Evertson D., (1972). *Two-Stage Strain-sensing device*. United States Patent number 3, 635, 076.
- Sacks I.S., Suyehiro S., Evertson D.W. and Yamagishi Y., (1971). *Sacks-Evertson strainmeter, its installation in Japan and some preliminary results concerning strain steps*. *Papers in Meteorol. Geophys.*, 22:195-208
- Sicali A. and Bonaccorso A., (2013). *Gestione dei dilatometri installati in pozzi profondi all'Etna*, *Rapporti Tecnici INGV*, (ISSN 2039-7941), n. 258, 25 pp.
- Tamura, Y., Sato T., Ooe M. and Ishiguro M., (1991). *A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion*. *Geophys. J. Int.* 104 (3): 507-516. doi: 10.1111/j.1365-246X.1991.tb05697.x

Indice

Introduzione	4
1. Dilatometri in pozzo: caratteristiche generali	6
2. Installazioni e siti della rete dilatometrica in pozzo	7
2.1 Metodologia d'installazione	7
2.2 Installazioni all'Etna	8
3. Gestione strumentale	10
3.1 Elettronica e logica di comando	10
3.2 Sistema energetico e ottimizzazioni per le stazioni remote	12
3.3 Trasmissione e formato dati	13
4. Calibrazione segnali: metodi e risultati	15
4.1 Calibrazioni assolute attraverso l'analisi delle maree terrestri	15
4.2 Calibrazioni relative attraverso il confronto con segnali registrati da telesismi	17
4.3 Calibrazione assoluta attraverso comparazione tra telesismi registrati e sintetici	17
5. Risultati scientifici ottenuti dalle prime installazioni (2011-2013)	18
5.1 Primi vincoli sulla sorgente delle fontane di lava all'Etna	18
5.2 Variazioni registrate durante le fontane di lava, modellazione della sorgente e considerazioni sui volumi eruttati	20
6. Esempio recente dei segnali a tutte le stazioni durante la fontana del 28 Dic. 2014	23
7. Segnali di strain nel medio-lungo termine	24
Ringraziamenti	27
Bibliografia	27

Quaderni di Geofisica

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/>

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Rapporti tecnici INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/>

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Miscellanea INGV

ISSN 2039-6651

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/miscellanea-ingv/>

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli ecc..

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV Roma

© 2015 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia