



INGV
terremoti
vulcani
ambiente

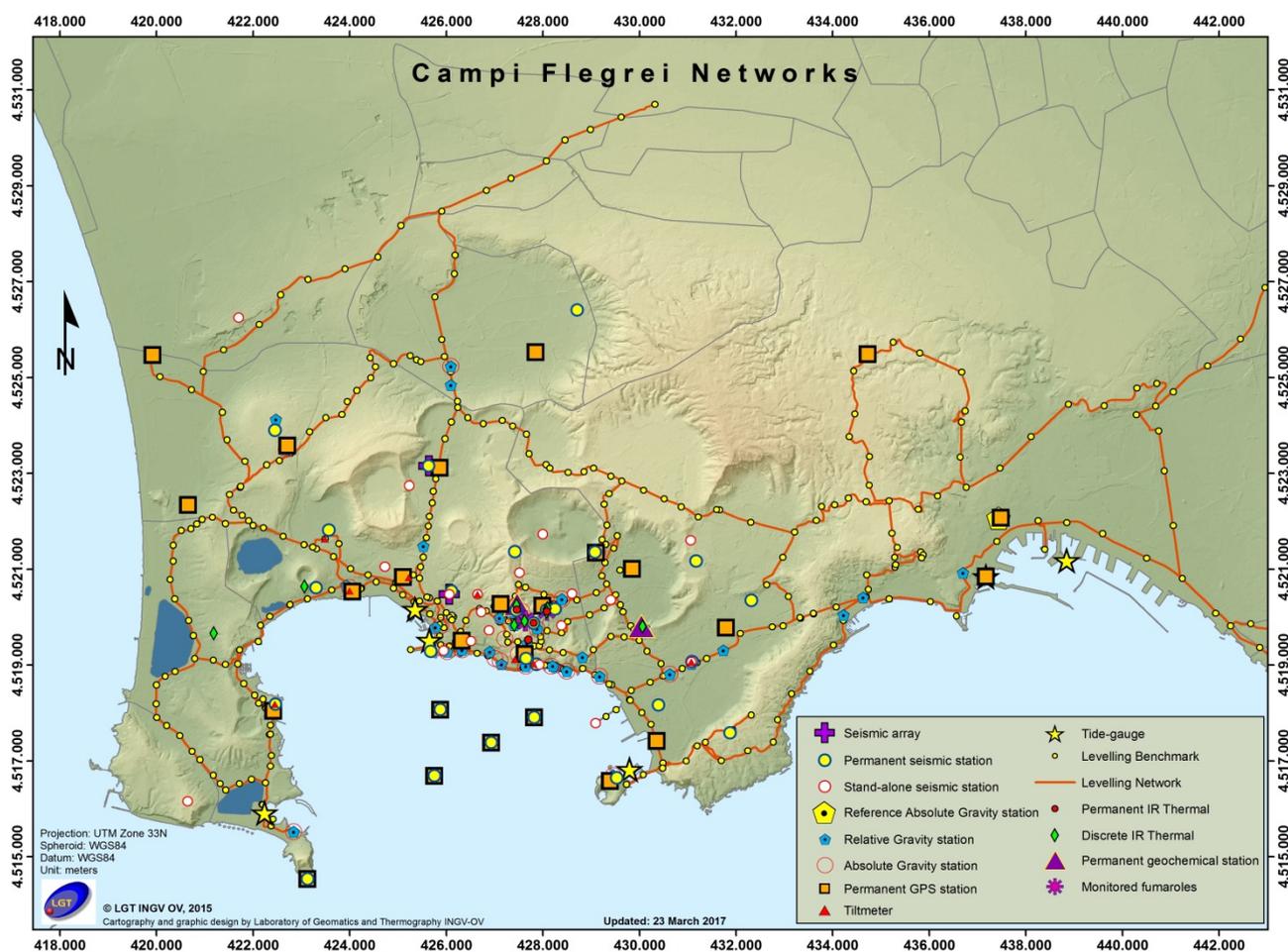
ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Bollettino di Sorveglianza

CAMPI FLEGREI

LUGLIO 2017

Sezione di Napoli
OSSERVATORIO VESUVIANO



Via Diocleziano, 328
80124 NAPOLI | Italia
Tel.: +39 0816108483
Fax: +39 0816102304
aoo.napoli@pec.ingv.it
www.ov.ingv.it

CAMPI FLEGREI

1 - Sismicità

Nel corso del mese di luglio 2017 ai Campi Flegrei sono stati registrati 14 terremoti di bassa magnitudo ($M_{max}=0.7$; evento del 17/07 alle 17:14 UTC) (Fig. 1.1).

E' stato possibile determinare l'ipocentro di 11 degli eventi registrati. Le localizzazioni sono mostrate in Fig. 1.2.

Non si evidenziano trend significativi nei parametri sismologici (Fig. 1.3, 1.4, 1.5).

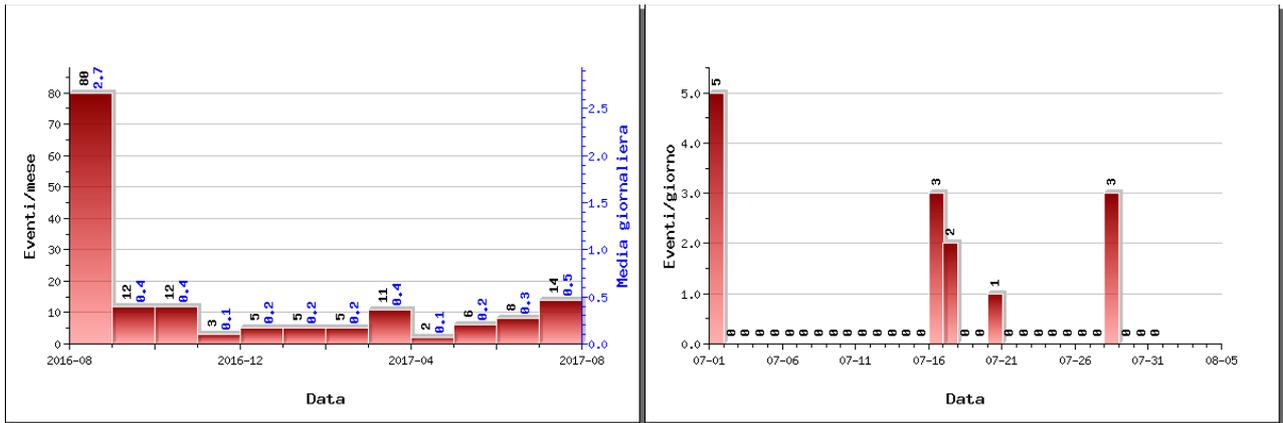


Figura 1.1 - A sinistra numero di eventi registrati ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (in totale 163), mentre a destra quelli avvenuti nell'ultimo mese (in totale 14).

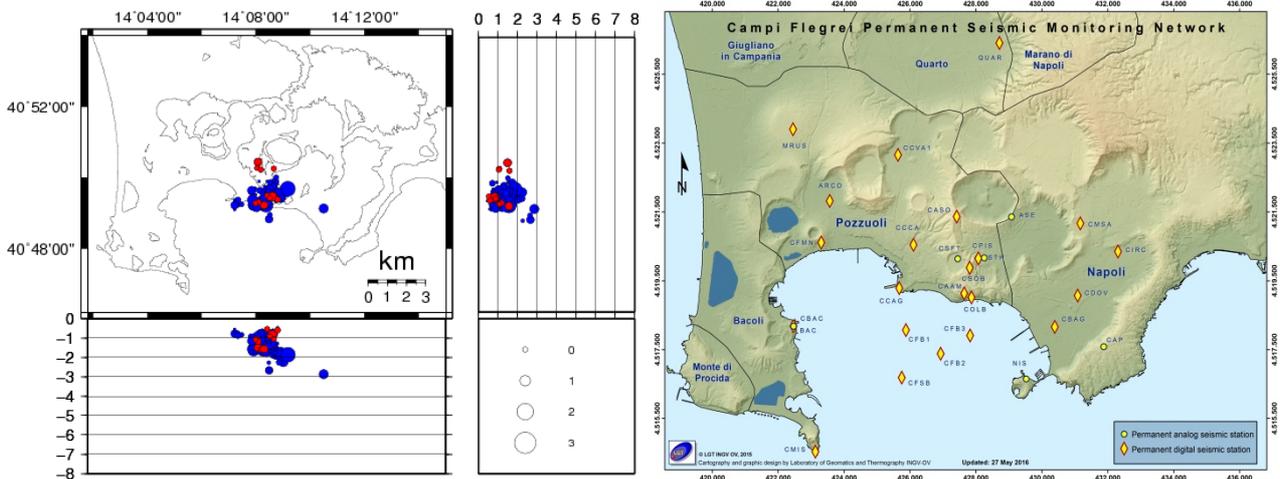


Figura 1.2 - Localizzazioni ipocentrali ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (in blu) e dell'ultimo mese (in rosso). La dimensione dei simboli è proporzionale alla magnitudo, come indicato nel riquadro in basso. A destra è mostrata la mappa con la Rete Sismica Permanente dei Campi Flegrei.

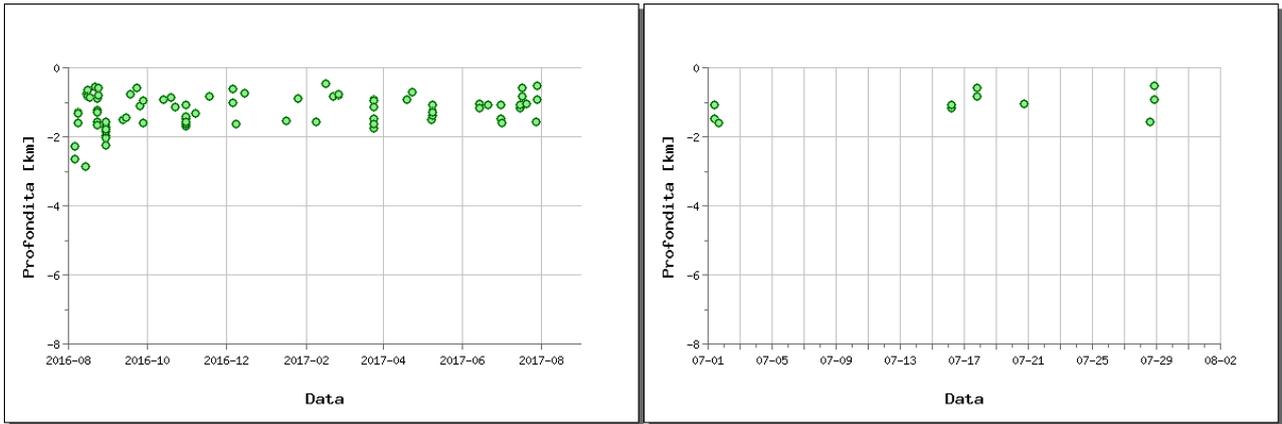


Figura 1.3 - Profondità ipocentrali degli eventi registrati ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (a sinistra) e dell'ultimo mese (a destra).

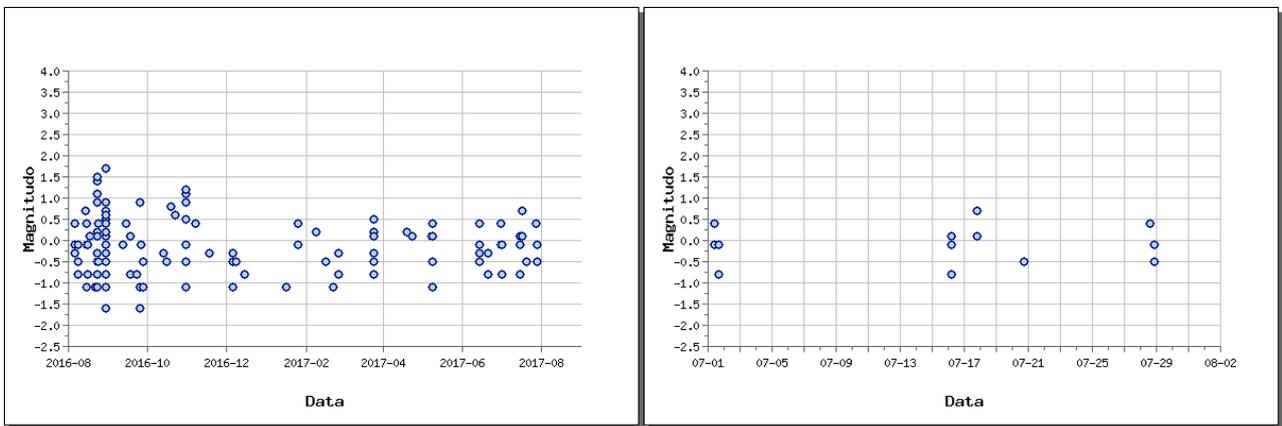


Figura 1.4 - Magnitudo degli eventi registrati ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (a sinistra) e dell'ultimo mese (a destra).

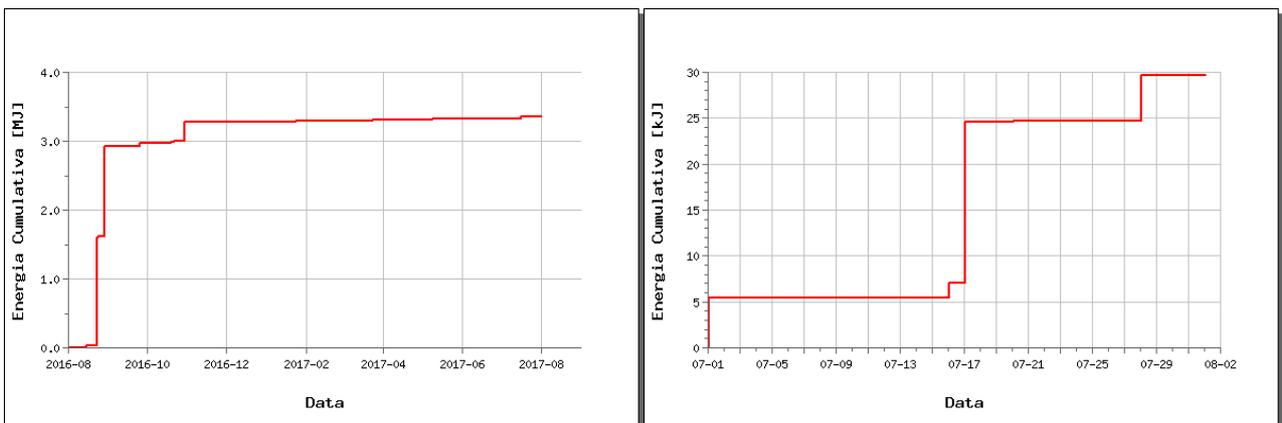


Figura 1.5 - Rilascio cumulativo di energia sismica ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (a sinistra) e dell'ultimo mese (a destra).

2 - Deformazioni del Suolo

GPS

Il valore medio del sollevamento di circa 1 cm/anno degli ultimi mesi sembra avere un leggero incremento nelle ultime settimane. L'intervallo di tempo è ancora troppo breve per una stima affidabile dell'incremento della velocità di sollevamento che sarà valutata nelle prossime settimane. Il sollevamento registrato alla stazione GPS di RITE è di circa 20 cm a partire da gennaio 2014, di cui circa 8 cm da gennaio 2016 (Fig. 2.2 e Fig. 2.3).

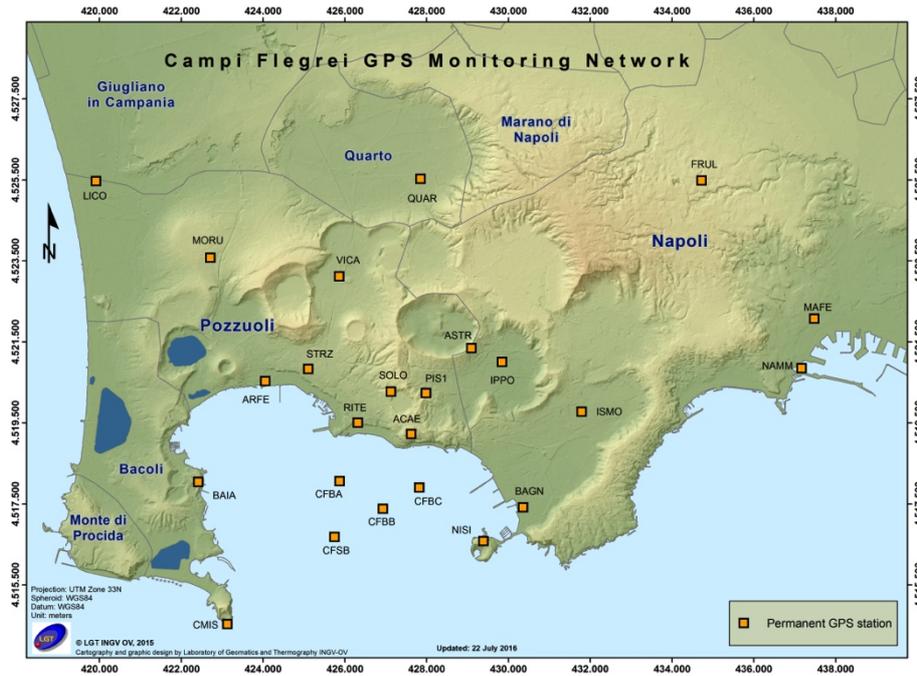


Figura 2.1 - Rete GPS Permanente dei Campi Flegrei.



Figura 2.2 - Serie temporale delle variazioni settimanali in quota della stazione di RITE (Pozzuoli – Rione Terra) dal 2000 a luglio 2017.

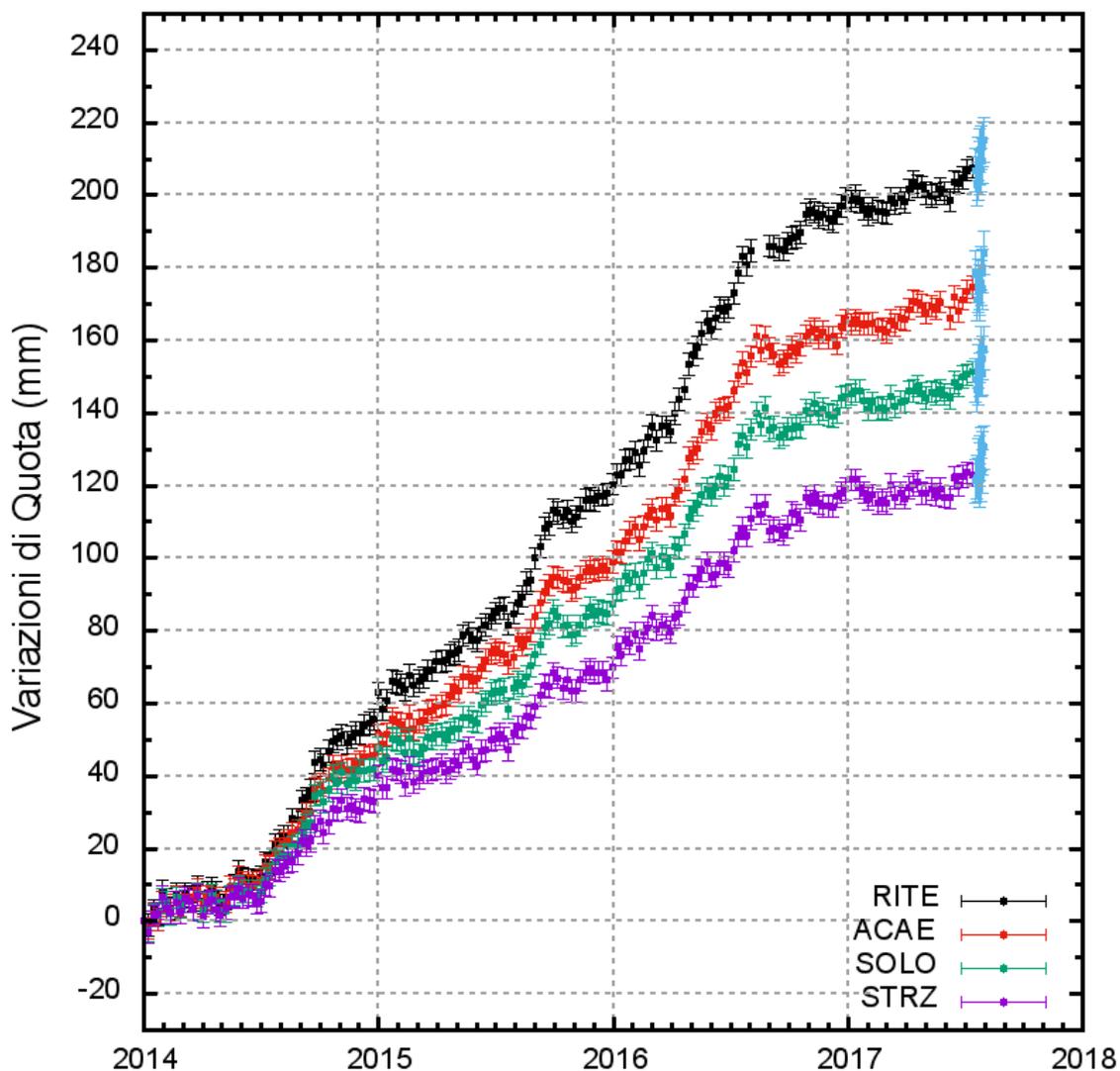


Figura 2.3 - Serie temporale delle variazioni in quota della stazione di RITE (Pozzuoli - Rione Terra), ACAE (Accademia Aeronautica), SOLO (Solfatara) e STRZ (Pozzuoli - Cimitero) dal 01 gennaio 2014 al 31 luglio 2017.

In Figura 2.4 è riportata la mappa dei vettori degli spostamenti orizzontali registrati alle stazioni CGPS ai Campi Flegrei dal 2014.

La forma del campo di deformazione è simile a quelle già individuate nelle precedenti fasi del sollevamento e suggerisce una stabilità della sorgente di deformazione, localizzata nel Golfo di Pozzuoli a qualche centinaio di metri a sud della stazione di RITE.

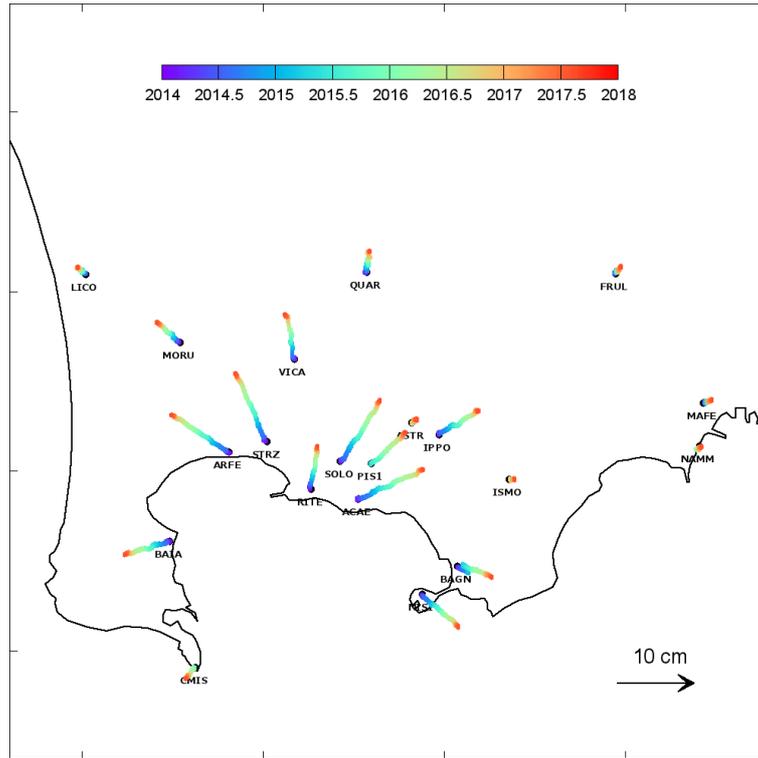


Figura 2.4 - Mappa degli spostamenti GPS orizzontali registrati nell'area flegrea dal 01 gennaio 2014 al 31 luglio 2017.

Mareometria

La Rete Mareografica è riportata in Figura 2.5.

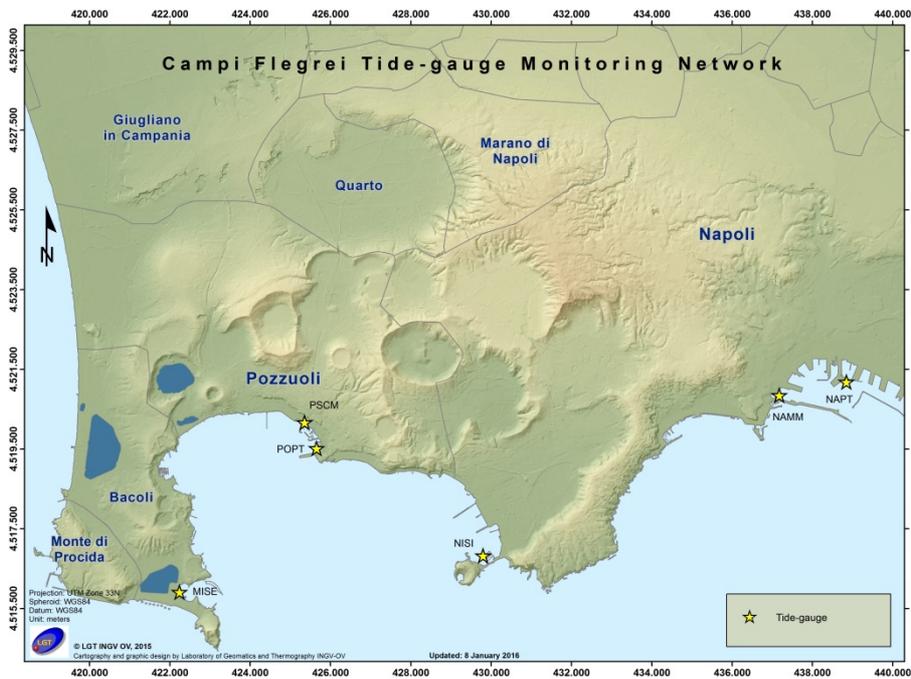


Figura 2.5 - Rete Mareografica di Campi Flegrei.

I dati mareografici relativi alla stazione di Pozzuoli Porto nel periodo gennaio 2014 – luglio 2017 mostrano l'andamento di Figura 2.6a, dal quale si evince un sollevamento di poco superiore ai 19 cm. Da gennaio 2016 a luglio 2017 si ha un contributo intorno agli 8 cm di sollevamento (Figura 2.6b).

Nell'ultimo mese si mantiene il leggero trend in sollevamento del 2017.

Il picco visibile verso la fine del mese di luglio 2016 è stato determinato dal malfunzionamento temporaneo del sensore della stazione di riferimento NAMM.

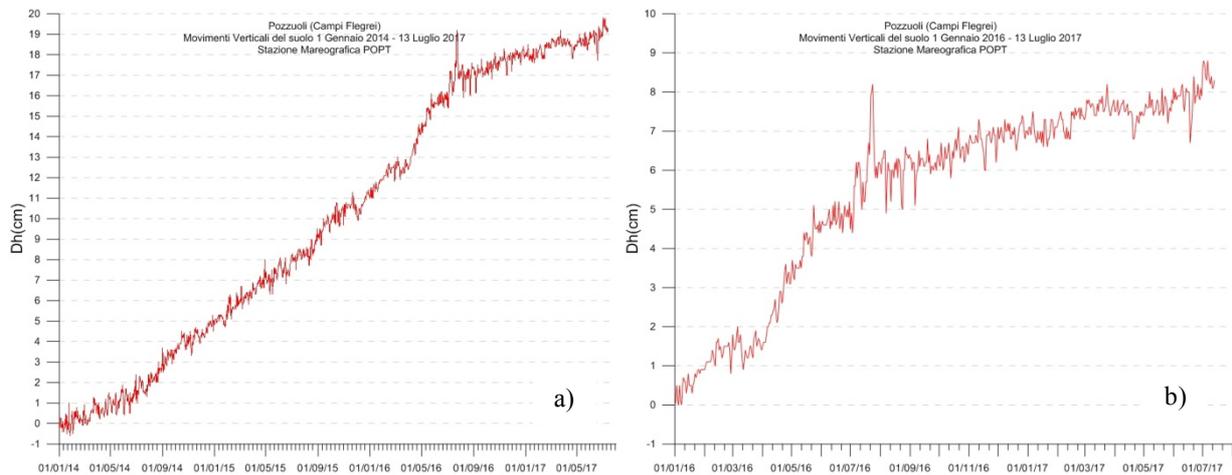


Figura 2.6 - Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2014 - luglio 2017 (a) e gennaio 2016 - luglio 2017 (b), ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti dal sensore digitale alla stazione mareografica di Pozzuoli Porto (POPT) (area centrale della caldera flegrea). Le variazioni riportate rappresentano le medie giornaliere e sono riferite alla stazione di Napoli molo S.Vincenzo (NAMM).

Tiltmetria

La Rete di Monitoraggio delle inclinazioni del suolo dei Campi Flegrei consiste in 10 stazioni di cui 4 equipaggiate con sensori analogici di superficie (BAI, SLF, TOI, CSO), 3 con tiltmetri analogici da pozzo (PSC, ARC, TOI installati da 1 a 7 m di profondità) e 3 con sensori digitali da pozzo (CMP, ECO, HDM installati a 25 m di profondità) (Fig. 2.7).

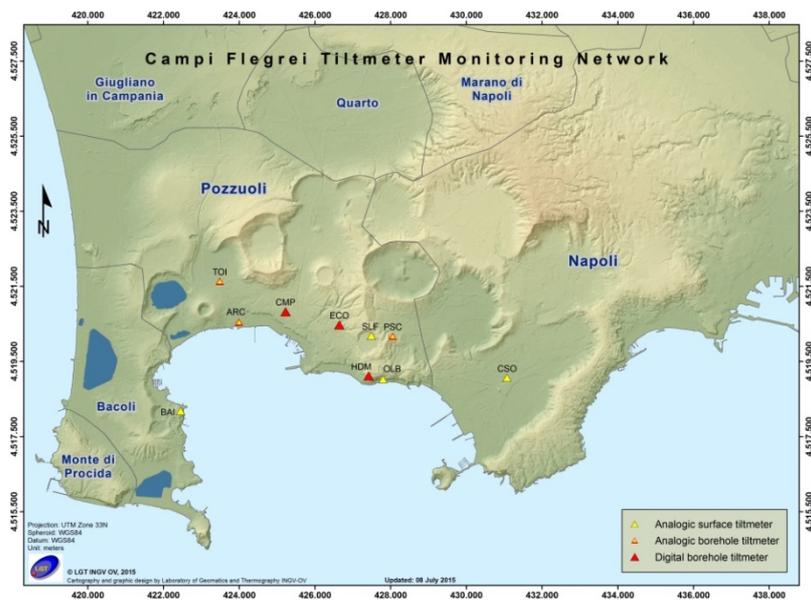


Figura 2.7 – Rete Tiltmetrica dei Campi Flegrei.

Il pattern di inclinazione calcolato ai Campi Flegrei nel periodo gennaio-luglio 2017 è quasi coerente in modulo con un uplift quasi radiale ed è visibile in Figura 2.8.

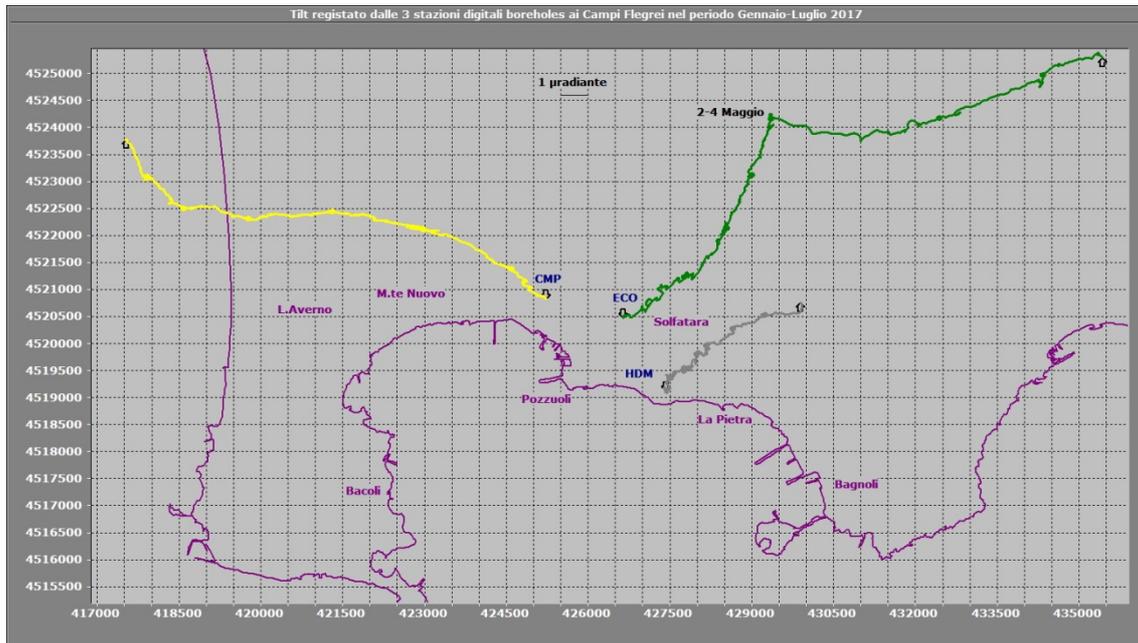


Figura 2.8 - Odografo del tilting registrato a 3 stazioni dei Campi Flegrei nel periodo gennaio-luglio 2017. Per chiarezza di rappresentazione grafica sono state selezionate solo le stazioni borehole con sensori ubicati a 25 m di profondità.

La deformazione relativa ad ogni sito-stazione è rappresentata con segmenti orientati di colore diverso; l'origine di ogni vettore tilt è siglata con il nome del sito stesso ed evidenziata con una freccia puntata verso il basso mentre l'estremo libero è indicato con una freccia puntata verso l'alto. Il verso di ogni vettore (che indica settori di crosta in abbassamento) è univocamente definito dal suo estremo libero.

Nella Tabella seguente sono riportati, per ogni stazione, i valori di inclinazione del suolo, la direzione di tilting e la variazione di temperatura registrata a fondo pozzo (≈ -25 m dal p.c.) acquisiti nei primi sette mesi del 2017.

Sito	Inclinazione e direzione	Temperatura
Stazione ECO (89 m s.l.m.)	20.0 μ radianti a ENE	0.08 °C
Stazione CMP (62 m s.l.m.)	16.5 μ radianti a WNW	- 0.01 °C
Stazione HDM (112 m s.l.m.)	4.9 μ radianti a NE	- 0.02 °C

Dal calcolo della risultante vettoriale dei singoli segnali registrati in 7 mesi dalle 3 stazioni, si ottiene una direzione media di tilting orientata a NNE; considerando invece solo gli ultimi 3 mesi e quindi la conseguente variazione tiltmetrica da quando, tra il 2 ed il 4 maggio, è stata osservata alla stazione ECO una vistosa anomalia in azimuth, tale direzione ruota ad ENE (circa 45° in senso orario). Quest'ultima si allinea dunque alla direzione di tilt della stazione HDM che, come è stato già segnalato, risulta praticamente invariata dal mese di agosto 2016.

Dai dati di tilt risultano quindi due centroidi di deformazione distanti meno di un km, il primo dei quali è coerente con i dati di ECO e CMP, mentre il secondo sembrerebbe condizionare il tilting mostrato da HDM.

Entrambi, però, possono rappresentare due parti di una singola sorgente geometricamente complessa.

Nel mese di luglio non sono state notate sul segnale del tiltmetro di Pisciarelli (PSC) altre oscillazioni armoniche simili a quelle verificatesi il 17 e 24 maggio ed il 4 e 10÷11 giugno, connesse all'apertura di vent fumarolici e/o delle emissioni di fango nelle polle di Pisciarelli, situate a SE del sito-stazione.

Va segnalato infine il perdurare di un leggero aumento di temperatura alla stazione ECO.

3 – Geochimica dei Fluidi

L'attività di monitoraggio svolta nel mese di luglio 2017 ha riguardato:

- l'acquisizione in continuo di dati di flusso di CO₂ dal suolo e della temperatura della fumarola principale a Pisciarelli;
- l'acquisizione in continuo di dati di flusso di CO₂ dal suolo e del gradiente termico nel cratere della Solfatara;
- misure di flusso di CO₂ dal suolo e temperatura del suolo su punti fissi selezionati nelle aree della Solfatara e di Pisciarelli;
- il campionamento e le analisi delle principali fumarole della Solfatara (BG e BN).

Di seguito vengono riportate le osservazioni più rilevanti sui nuovi dati acquisiti.

Una dettagliata descrizione del modello geochimico interpretativo del sistema idrotermale della Solfatara, delle variazioni composizionali registrate e delle possibili interpretazioni sono riportate nei seguenti lavori scientifici: Caliro et al., (2007; 2014); Chiodini (2009); Chiodini et al., (2010; 2011; 2012; 2015a,b; 2016), ai quali si rimanda per approfondimento.

Le analisi di laboratorio dei campioni prelevati evidenziano il perdurare dei trend già identificati in precedenza (vedi Rapporti di Sorveglianza precedenti; Figg. 3.1-3.4).

Il rapporto CO₂/H₂O delle fumarole (Fig. 3.1) nei campioni di luglio 2017 ha mostrato valori elevati (~0.39 per la fumarola BG; ~0.38 per la fumarola BN), confermando quelli misurati nel periodo precedente, valori che in generale testimoniano una elevata frazione di gas magmatici presente nei fluidi fumarolici (Caliro et al., 2007; Chiodini et al., 2010).

In particolare, l'interpretazione di queste variazioni risulta più complessa alla luce dei recenti studi che mettono in evidenza come possibili processi di condensazione del vapore nel sistema idrotermale, in risposta ad un aumento del flusso dei fluidi magmatici (e della pressione) e allo stato termico del sistema, possano influenzare il rapporto CO₂/H₂O misurato alle fumarole (Chiodini et al., 2015a, 2016). Inoltre è possibile che una frazione della CO₂ emessa dalle fumarole sia prodotta, in seguito all'aumento di temperatura del sistema, da reazioni che coinvolgono la calcite di origine idrotermale presente nel sistema (Chiodini et al., 2015b).

L'analisi di geindicatori di Temperatura e Pressione, basati sulle composizioni delle fumarole BG e BN, indicano il progressivo riscaldamento delle parti più superficiali del sistema idrotermale della Solfatara. In particolare, le concentrazioni di CO, disponibili alla Solfatara di Pozzuoli fin dalla crisi del 1983-84, a partire dagli inizi degli anni 2000 mostrano un evidente trend di crescita, che è particolarmente marcato negli ultimi mesi (fumarola BG, Fig. 3.2). Tale crescita è a nostro parere rilevante poiché il CO è fra le specie fumaroliche analizzate quella più sensibile alla temperatura. Assumendo come

buffer delle condizioni redox del sistema idrotermale la funzione di D'Amore and Panchi (1980), che in generale ben descrive la fO_2 in molti dei sistemi idrotermali del mondo, il trend del CO corrisponderebbe ad un aumento di temperatura di 20-25 °C fra gli inizi degli anni 2000 (T circa 215 °C) e il 2014-2017 (T circa 240°C, Fig. 3.3). Tale processo di riscaldamento del sistema flegreo e le possibili cause sono trattate in modo approfondito nei lavori scientifici Chiodini et al. (2015a, 2016) a cui si rimanda per approfondimento.

Il cronogramma del rapporto CO_2/CH_4 (Fig. 3.4) mostra picchi positivi, interpretabili come dovuti all'arrivo di fluidi magmatici ossidanti, e a basso contenuto in CH_4 , nel sistema idrotermale (Chiodini 2009; Chiodini et al., 2010; 2011; 2012). Nei campioni di luglio il rapporto CO_2/CH_4 ha mostrato un ulteriore incremento rispetto ai mesi precedenti. I vari picchi corrisponderebbero, quindi, ad eventi di degassamento magmatico e conseguente immissione di fluidi magmatici nel sistema idrotermale che alimenta le fumarole della Solfatara. Per maggiori dettagli su tale processo si rimanda ad uno specifico lavoro scientifico (Chiodini et al., 2012). Inoltre, in Figura 3.4, è possibile riconoscere un trend d'aumento del rapporto a partire dal 2000.

Sia l'aumento della temperatura di equilibrio della parte più profonda del sistema idrotermale che variazioni delle sue condizioni redox (verso condizioni più ossidanti, magmatiche) possono essere la causa dell'aumento del rapporto CO_2/CH_4 (i.e. diminuzione relativa delle concentrazioni di CH_4) (Chiodini et al., 2015a).

Il processo di riscaldamento e pressurizzazione della parte più superficiale del sistema idrotermale, iniziato a partire dal 2007 (Chiodini et al., 2011) e tuttora in corso, causa a nostro avviso le variazioni macroscopiche osservate a Pisciarelli (Fig. 3.5) e che negli ultimi anni sono consistite nell'apertura di nuovi vent fumarolici e di polle bollenti, nell'emissione di fango, in attività sismica localizzata, nell'aumento della temperatura della fumarola principale (Figg. 3.6, 3.7), nell'aumento dei flussi misurati in continuo dalla stazione FLXOV3 (Fig. 3.8). Nel mese di riferimento, la temperatura della fumarola principale di Pisciarelli ha mostrato una diminuzione dei valori registrati, caratterizzati da ampie oscillazioni e con una media di ~ 105 °C (Fig 3.9). Tali variazioni, analogamente a quanto già rivelato in periodi precedenti (luglio 2014, febbraio 2015, maggio 2016 e febbraio-aprile 2017), sono collegate verosimilmente ad emissioni di una fase liquida (fango) dal vent.

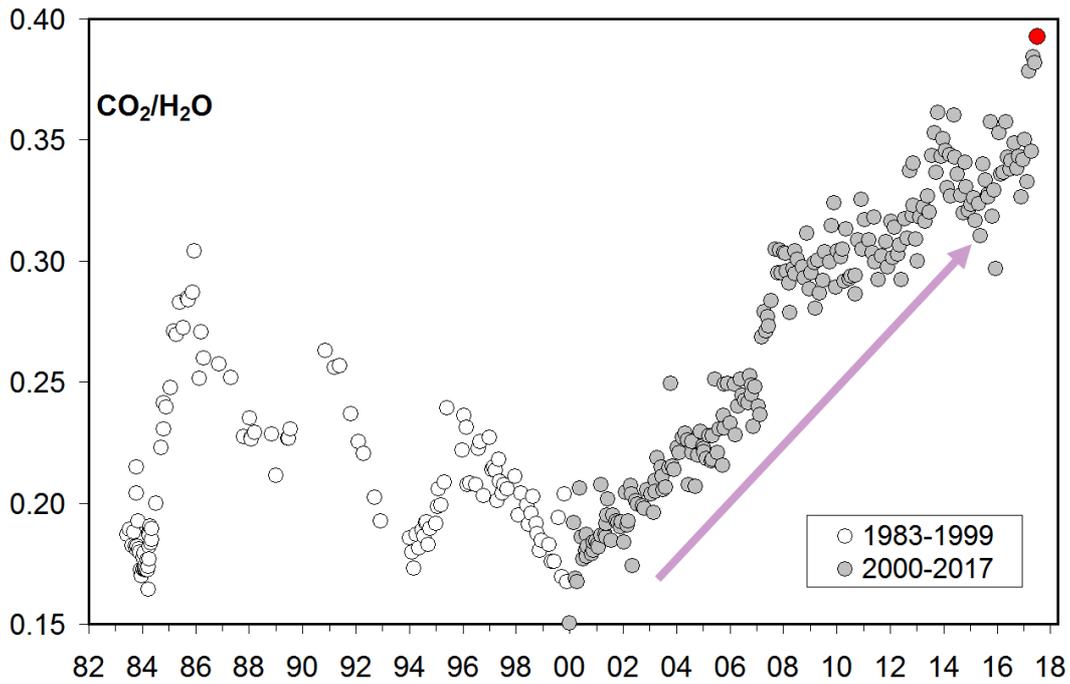


Figura 3.1 - Cronogramma del rapporto CO₂/H₂O per la fumarola BG. In grigio sono riportati i dati a partire dal 2000, quando è iniziato un trend d'aumento del rapporto CO₂/H₂O indicativo, in generale, di una crescente frazione della componente magmatica nei fluidi fumarolici. Con il simbolo rosso è evidenziato il campione di luglio 2017.

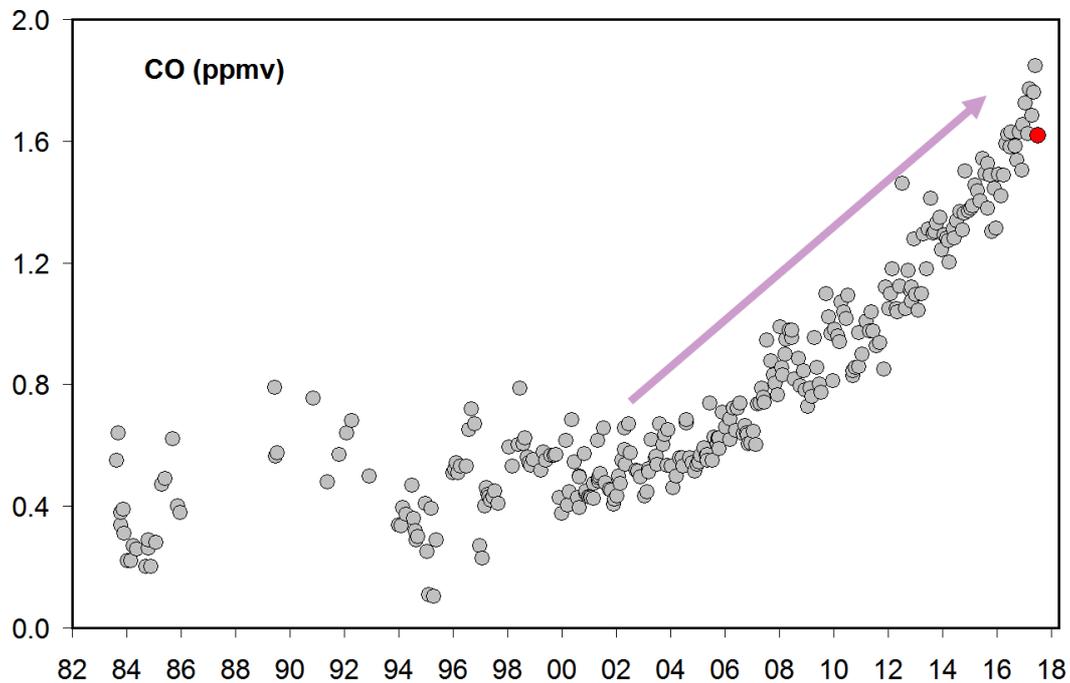


Figura 3.2 - Variazioni della concentrazione di monossido di carbonio (CO) misurato alla fumarola BG a partire dal 1983. Con il simbolo rosso è evidenziato il campione di luglio 2017. In generale alti contenuti di CO caratterizzano sistemi vulcanici ad elevata temperatura mentre fumarole alimentate da sistemi idrotermali mostrano concentrazioni più basse, in tali sistemi un aumento delle concentrazioni di CO può riflettere un incremento delle condizioni di pressione e temperatura.

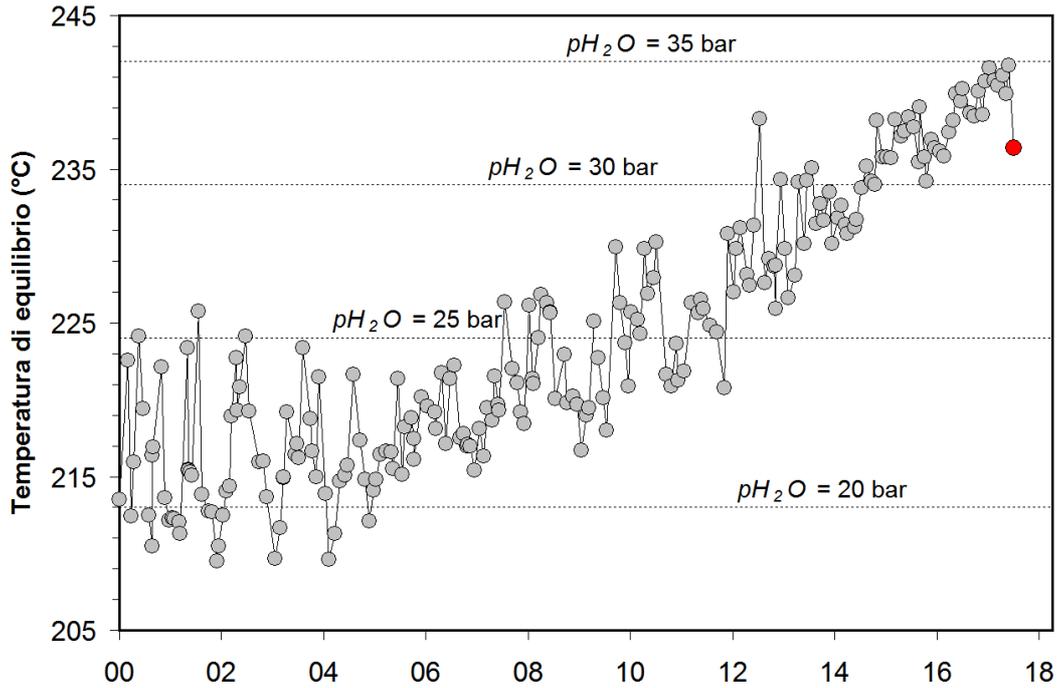


Figura 3.3 - Cronogramma delle temperature di equilibrio per il sistema CO-CO₂, stimato assumendo condizioni redox fissate dalla relazione di D'Amore and Panichi (1980). Tali temperature, rappresentative della parte più superficiale del sistema idrotermale (Caliro et al., 2007), mostrano un trend d'aumento a partire dai primi anni del 2000. Con il simbolo rosso è evidenziato il campione di luglio 2017 relativo alla fumarola BG.

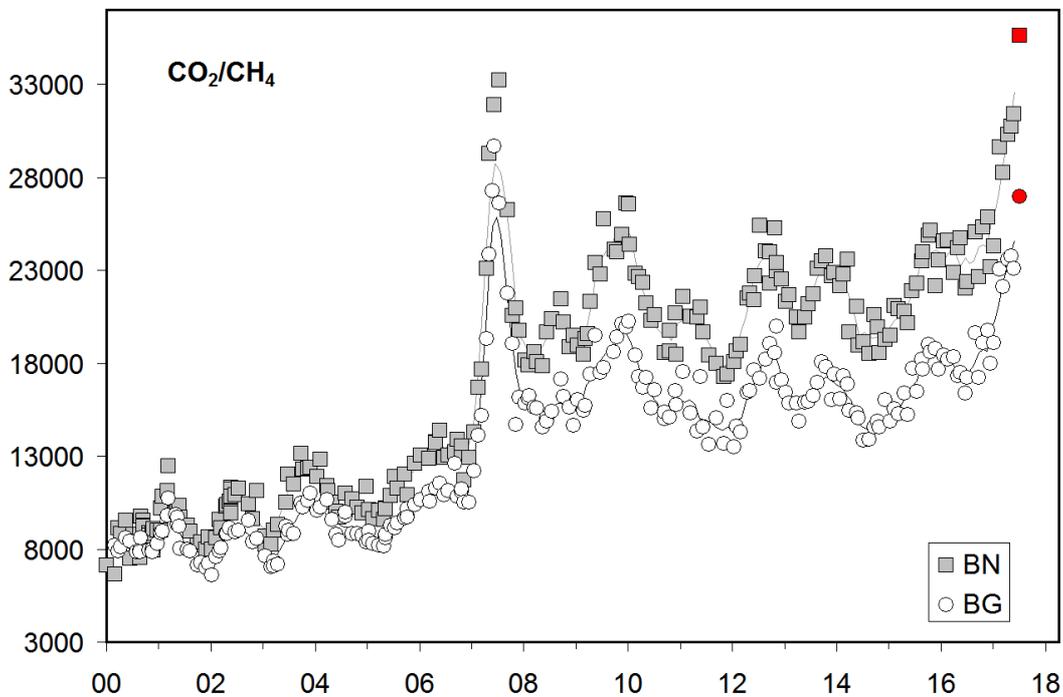


Figura 3.4 - Variazioni del rapporto CO₂/CH₄ per le fumarole BG e BN a partire dal 2000. I picchi nel rapporto, registrati in superficie con circa un anno di ritardo, evidenziano episodi di degassamento magmatico occorsi ai Campi Flegrei (Chiodini et al., 2012). Con i simboli rossi sono evidenziati i campioni di luglio 2017.



Figura 3.5 - Variazioni macroscopiche dell'area di emissione di Pisciarelli dal 2005.

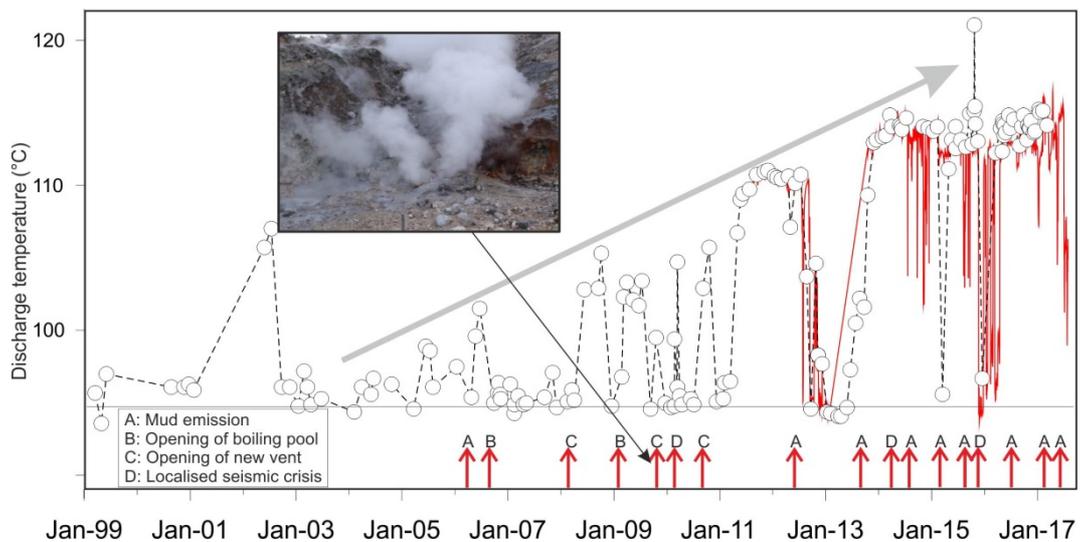


Figura 3.6 - Cronogramma delle temperature (°C) della fumarola di Pisciarelli e dei maggiori eventi occorsi legati all'aumento dell'attività idrotermale (i cerchi si riferiscono a misure discrete riferite al punto di prelievo dei gas, la linea rossa si riferisce alle medie giornaliere delle misure in continuo). La temperatura di ~95°C rappresenta la temperatura di ebollizione per i fluidi fumarolici di Pisciarelli. Nella foto è riportata la vigorosa fumarola sorta il 20 dicembre 2009.

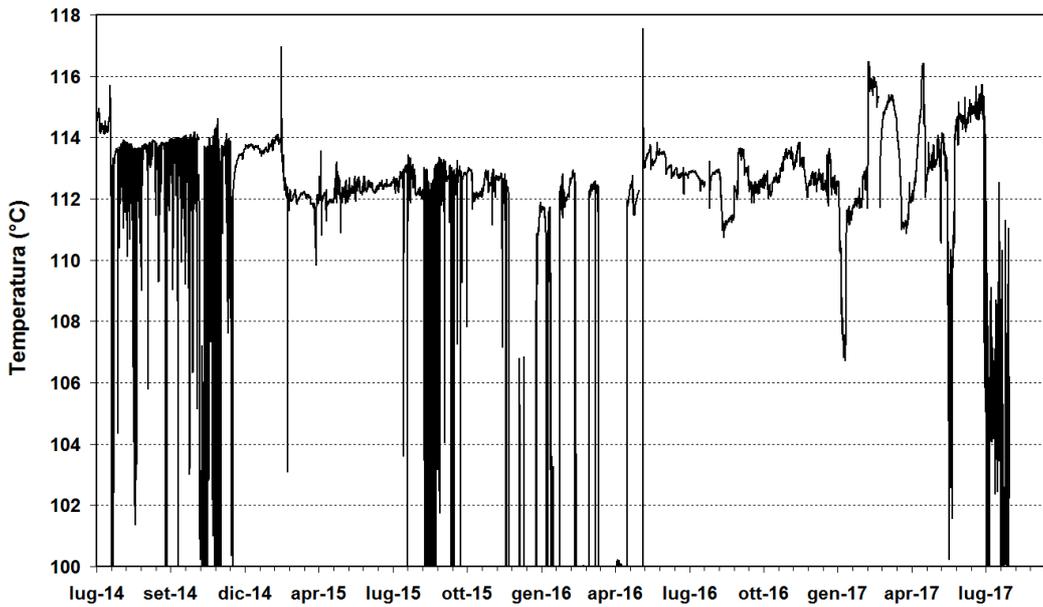


Figura 3.7 - Temperature registrate in continuo della fumarola di Pisciarelli. Da notare le variazioni degli ultimi periodi (da Febbraio u.s.), possibilmente legate a processi di pressurizzazione locale del sistema.

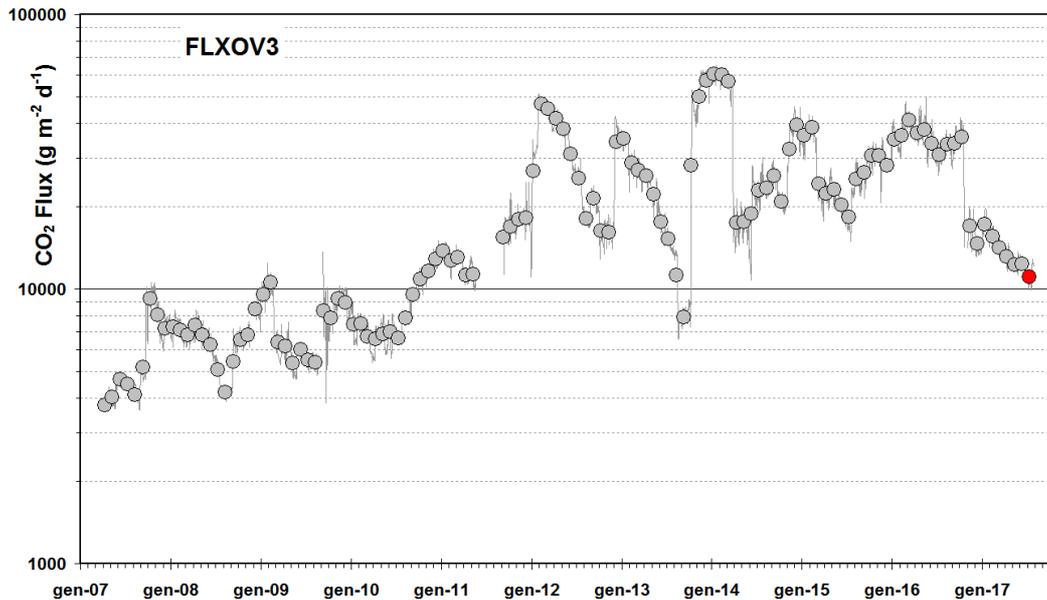


Figura 3.8 - Medie giornaliere (linea) e medie mensili (cerchi) dei flussi di CO₂ misurati a Pisciarelli (FLXOV3). E' da evidenziare il continuo trend d'aumento nel tempo del flusso CO₂. La media dei flussi relativa al mese di luglio 2017 è riportata con il simbolo rosso. L'intervento di riparazione della stazione, effettuato nel mese di novembre 2016, resosi necessario per ripristinare il sistema per la misura del flusso di CO₂ dal suolo, ha inevitabilmente comportato una modifica del sito con valori misurati di flusso di CO₂ più bassi.

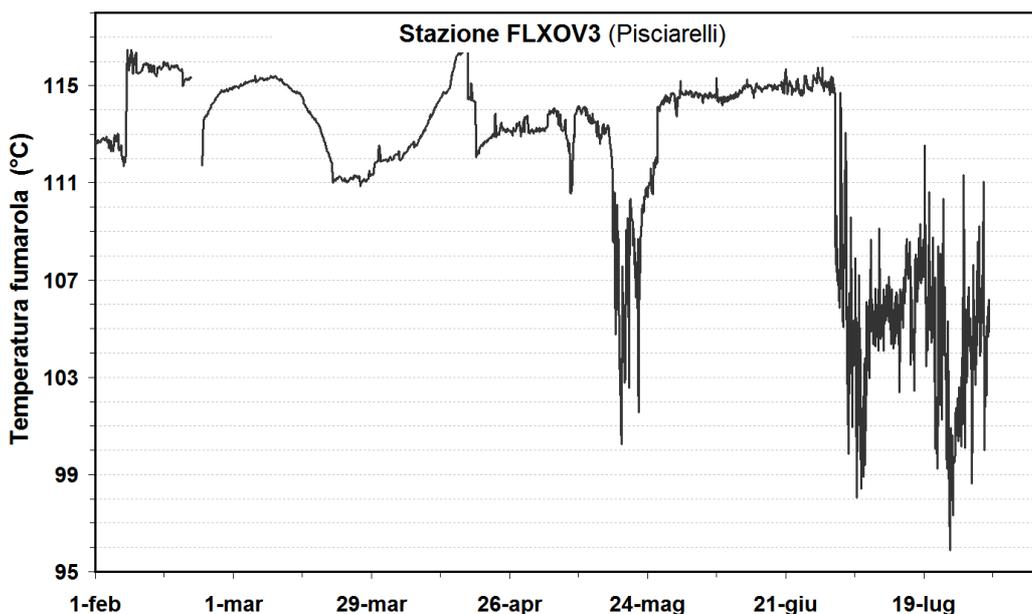


Figura 3.9 - Dettaglio della temperatura della fumarola principale nel sito di Pisciarelli registrata in continuo dalla stazione FLXOV3.

4 - QUADRO DI SINTESI DELLO STATO DEL VULCANO NEL MESE DI LUGLIO 2017 E VALUTAZIONI

Nel corso del mese di luglio 2017 sono stati registrati 14 terremoti di bassa magnitudo ($M_{max}=0.7$).

Nello stesso periodo si osserva un leggero incremento del valore medio del sollevamento del suolo. L'intervallo di tempo associato alla misura è ancora troppo breve per una stima affidabile dell'incremento della velocità di sollevamento che sarà valutata nelle prossime settimane.

I parametri geochimici rientrano nei trend già identificati in precedenza. La temperatura della fumarola principale di Pisciarelli ha mostrato una diminuzione dei valori registrati, caratterizzati da ampie oscillazioni e con una media di ~ 105 °C.

Nella Figura 4.1 sono rappresentati i parametri di monitoraggio più indicativi in un confronto temporale a breve e medio termine.

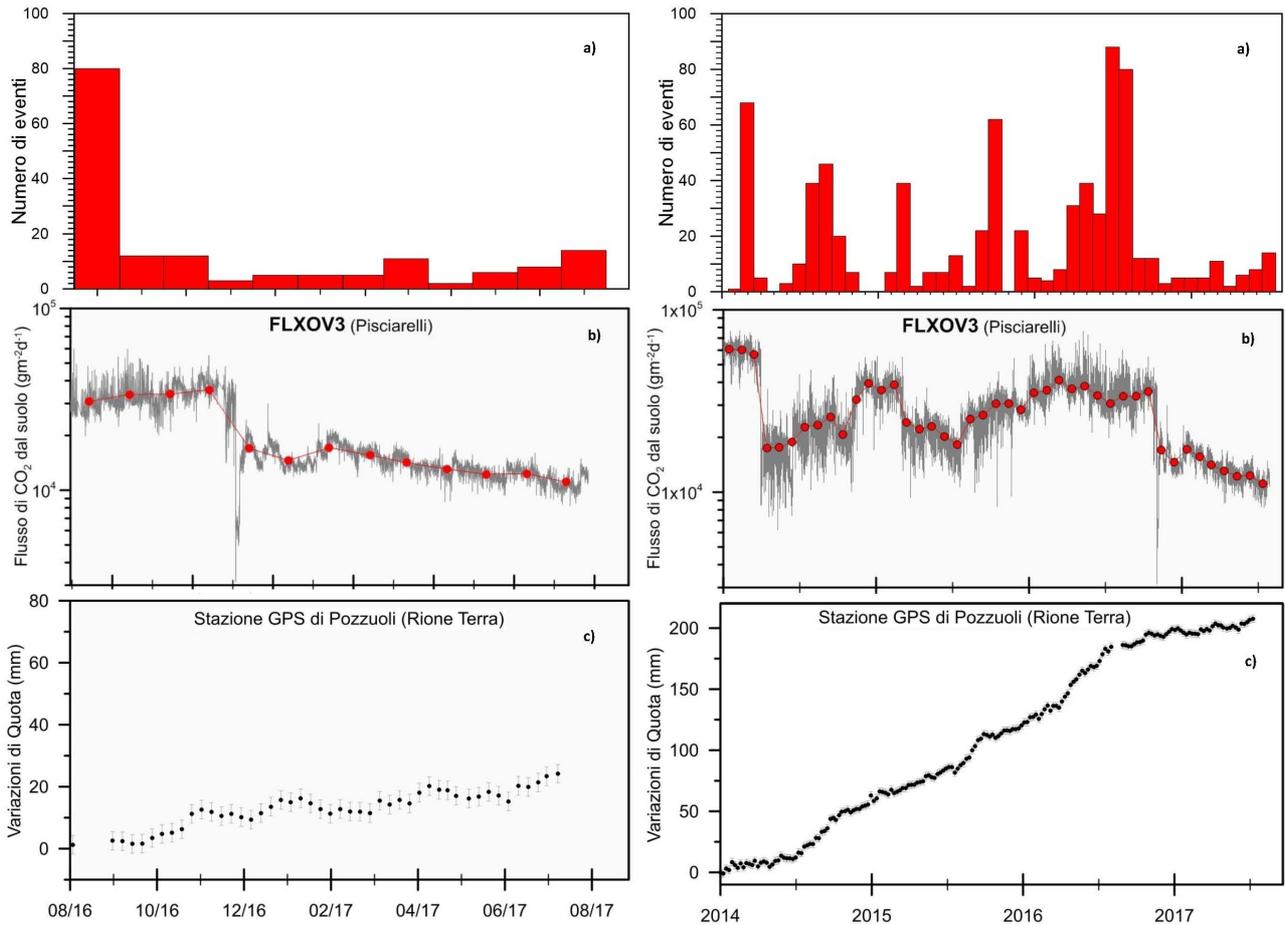


Figura 4.1 – Frequenza di accadimento degli eventi sismici (a), variazioni del flusso di CO₂ alla stazione FLXOV3 (b) e andamento delle deformazioni del suolo alla stazione GPS di RITE negli ultimi dodici mesi (a sinistra) e dal 2014 (a destra).

Sulla base dell'attuale quadro dell'attività vulcanica sopra delineato, non si evidenziano elementi tali da suggerire significative evoluzioni a breve termine.

Il monitoraggio dell'area flegrea permane al livello di "Attenzione".

Bibliografia

- Caliro S., Chiodini G., Moretti R., Avino R., Granieri D., Russo M., and Fiebig J. (2007) The origin of the fumaroles of La Solfatara (Campi Flegrei, South Italy). *Geochimica et Cosmochimica Acta* **71**, 3040-3055. doi:10.1016/j.gca.2007.04.007.
- Caliro S., Chiodini G., and Paonita A. (2014) Geochemical evidences of magma dynamics at Campi Flegrei (Italy). *Geochim. Cosmochim. Acta* **132**, 1-15. doi:10.1016/j.gca.2014.01.021.
- Chiodini, G. (2009), CO₂/CH₄ ratio in fumaroles a powerful tool to detect magma degassing episodes at quiescent volcanoes., *Geophys. Res. Lett.*, doi: [10.1029/2008GL036347](https://doi.org/10.1029/2008GL036347)
- Chiodini, G., S. Caliro, C. Cardellini, D. Granieri, R. Avino, A. Baldini, M. Donnini, and C. Minopoli (2010), Long-term variations of the Campi Flegrei, Italy, volcanic system as revealed by the monitoring of hydrothermal activity, *J. Geophys. Res.*, **115**, B03205, doi:10.1029/2008JB006258.

- Chiodini, G., R. Avino, S. Caliro, C. Minopoli (2011) Temperature and pressure gas geoindicators at the Solfatara fumaroles (Campi Flegrei). *Annals Geophysics*, 54, 2. doi: 10.4401/ag-5002
- Chiodini G., Caliro S., De Martino P., Avino R. and Gherardi F. (2012). Early signals of new volcanic unrest at Campi Flegrei caldera? Insights from geochemical data and physical simulations. *Geology*, doi:10.1130/G33251.1
- Chiodini G., Vandemeulebrouck J., Caliro S, D'Auria L., De Martino P, Mangiacapra A., Petrillo Z. (2015a) Evidence of thermal driven processes triggering the 2005-2014 unrest at Campi Flegrei caldera. *Earth Planet. Sci. Lett.* 414, 58–67. doi:10.1016/j.epsl.2015.01.012
- Chiodini G., Pappalardo L., Aiuppa A. and Caliro S. (2015b) The geological CO₂ degassing history of a long-lived caldera. *Geology*. doi:10.1130/G36905.1
- Chiodini G., Paonita A., Aiuppa A., Costa A., Caliro S., De Martino P., Acocella V. and Vandemeulebrouck J. (2016) Magmas near the critical degassing pressure drive volcanic unrest towards a critical state. *Nat. Commun.* 7, 13712. doi: 10.1038/ncomms13712
- D'Amore F. and Panichi C. (1980) Evaluation of deep temperatures of hydrothermal systems by a new gas geothermometer. *Geochim. Cosmochim. Acta* **44**, 549-556.
-

Responsabilità e proprietà dei dati

L'INGV, in ottemperanza a quanto disposto dall'Art.2 del D.L. 381/1999, svolge funzioni di sorveglianza sismica e vulcanica del territorio nazionale, provvedendo alla organizzazione della rete sismica nazionale integrata e al coordinamento delle reti sismiche regionali e locali in regime di convenzione con il Dipartimento della Protezione Civile.

L'INGV concorre, nei limiti delle proprie competenze inerenti la valutazione della Pericolosità sismica e vulcanica nel territorio nazionale e secondo le modalità concordate dall'Accordo di programma decennale stipulato tra lo stesso INGV e il DPC in data 2 febbraio 2012 (Prot. INGV 2052 del 27/2/2012), alle attività previste nell'ambito del Sistema Nazionale di Protezione Civile. In particolare, questo documento, redatto in conformità all'Allegato A del suddetto Accordo Quadro, ha la finalità di informare il Dipartimento della Protezione Civile circa le osservazioni e i dati acquisiti dalle reti di monitoraggio gestite dall'INGV su fenomeni naturali di interesse per lo stesso Dipartimento.

L'INGV fornisce informazioni scientifiche utilizzando le migliori conoscenze scientifiche disponibili; tuttavia, in conseguenza della complessità dei fenomeni naturali in oggetto, nulla può essere imputato all'INGV circa l'eventuale incompletezza ed incertezza dei dati riportati e circa accadimenti futuri che differiscano da eventuali affermazioni a carattere previsionale presenti in questo documento. Tali affermazioni, infatti, sono per loro natura affette da intrinseca incertezza.

L'INGV non è responsabile dell'utilizzo, anche parziale, dei contenuti di questo documento da parte di terzi, e/o delle decisioni assunte dal Dipartimento della Protezione Civile, dagli organi di consulenza dello stesso Dipartimento, da altri Centri di Competenza, dai membri del Sistema Nazionale di Protezione Civile o da altre autorità preposte alla tutela del territorio e della popolazione, sulla base delle informazioni contenute in questo documento. L'INGV non è altresì responsabile di eventuali danni recati a terzi derivanti dalle stesse decisioni.

La proprietà dei dati contenuti in questo documento è dell'INGV. La diffusione anche parziale dei contenuti è consentita solo per fini di protezione civile ed in conformità a quanto specificatamente previsto dall'Accordo Quadro sopra citato tra INGV e Dipartimento della Protezione Civile.