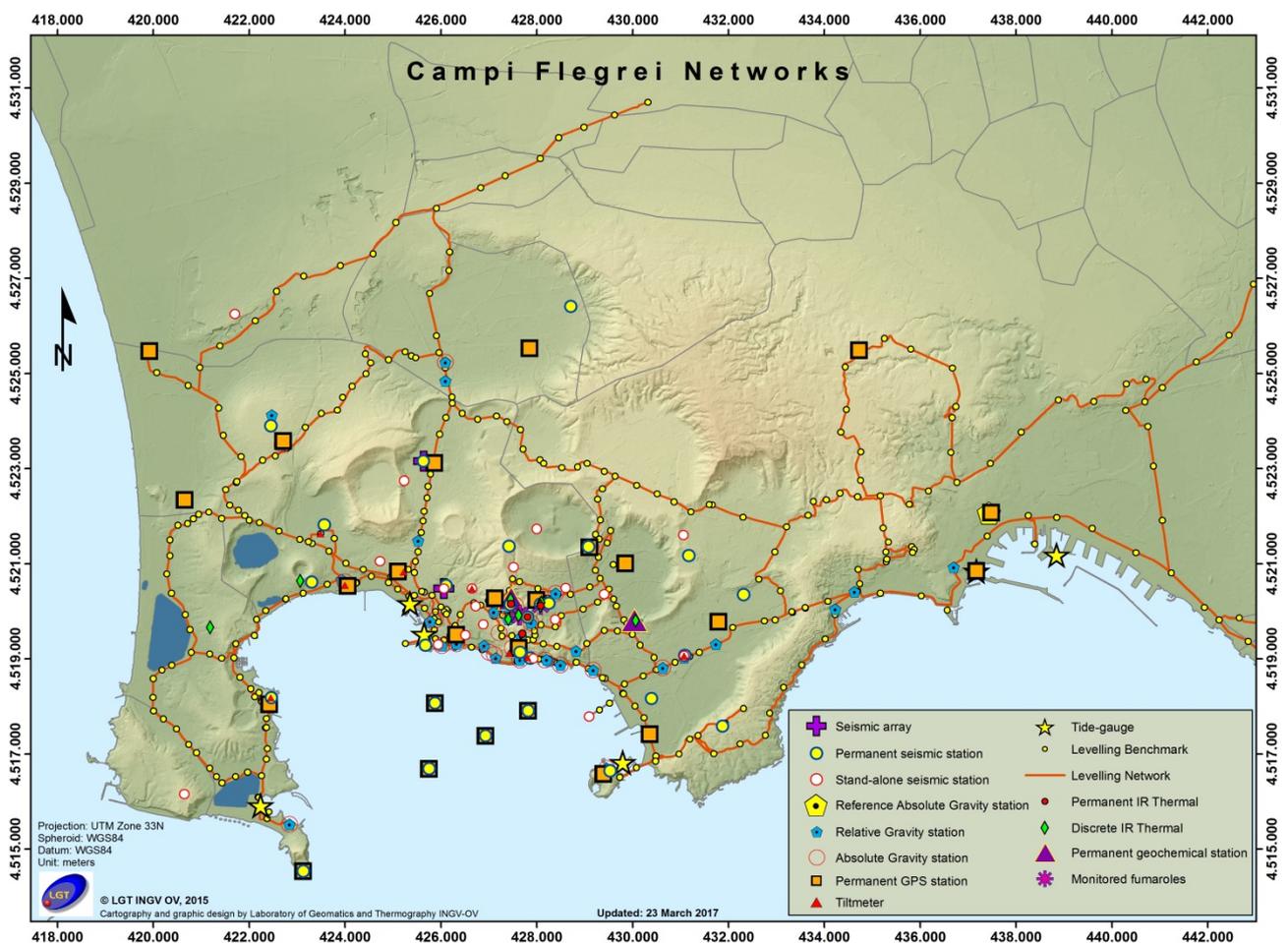




Bollettino di Sorveglianza

CAMPI FLEGREI

MARZO 2019



1. SISMOLOGIA

La Rete Sismica Permanente dei Campi Flegrei è mostrata in Figura 1.1.

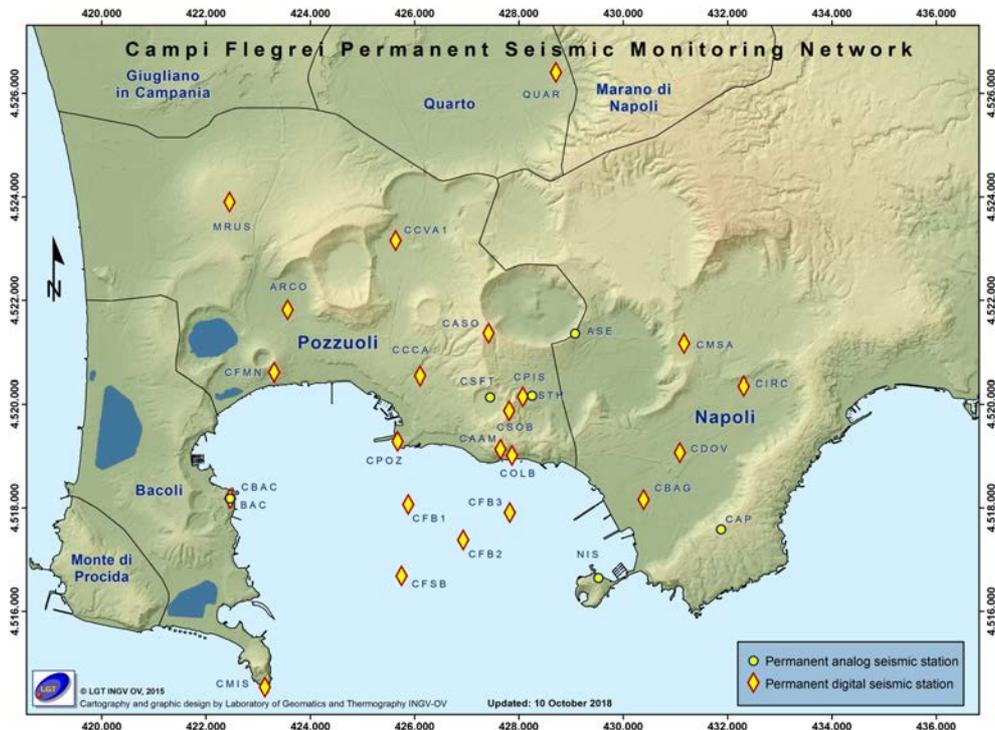


Figura 1.1 - Mappa della Rete Sismica Permanente dei Campi Flegrei.

Nel corso del mese di marzo 2019, ai Campi Flegrei sono stati registrati 112 terremoti ($M_{dmax}=2.5$; evento del 15/03 alle 04:26 UTC) (Fig. 1.2).

73 eventi sono stati registrati nel corso di 2 sciami sismici:

- il primo, registrato tra le 02:32 e le 06:09 UTC del 15/03, consistito in una sequenza di 66 terremoti con $-1.1 \leq M_d \leq 2.5$, localizzati nell'area tra Via Napoli e Solfatara-Pisciarelli a profondità comprese tra 0.4 e 2.1 km;
- il secondo, registrato tra le 02:35 e le 03:11 UTC del 21/03, consistito in una sequenza di 7 terremoti con $-0.3 \leq M_d \leq 0.6$, localizzati nell'area di Agnano a profondità comprese tra 1.4 e 1.9 km.

E' stato possibile determinare i parametri ipocentrali di 78 degli eventi registrati. Si evidenzia l'accadimento di tre eventi sismici nel Golfo di Pozzuoli in aree già interessate in passato da attività sismica (10/03 23:22 UTC $M_d=0.4$; 13/03 23:30 UTC $M_d=0.7$; 24/03 15:12 UTC $M_d=0.7$).

Le localizzazioni sono mostrate in Fig. 1.3.

Non si evidenziano trend significativi negli altri parametri sismologici (Figg. 1.2-1.6).

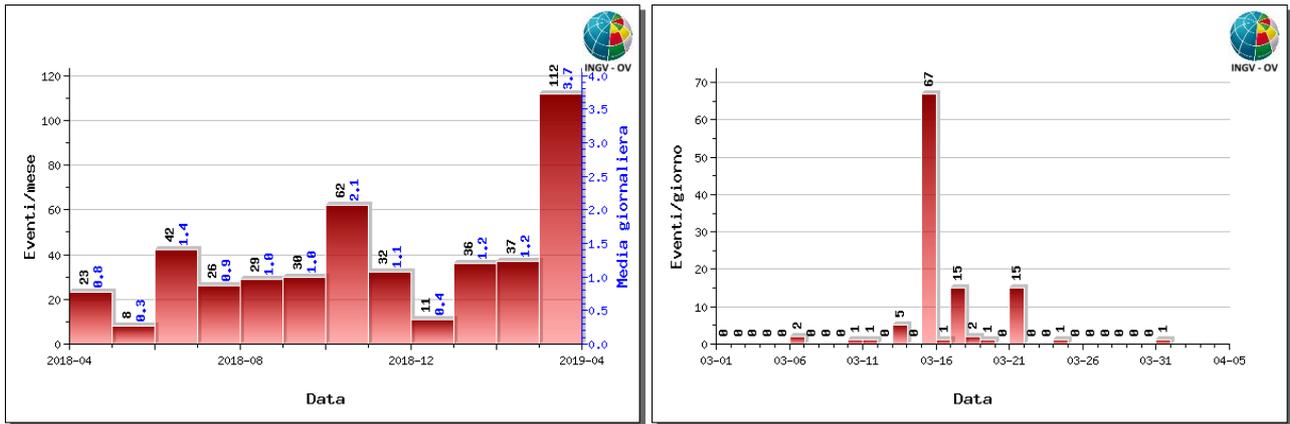


Figura 1.2 - A sinistra numero di eventi registrati ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (in totale 448), mentre a destra quelli avvenuti nell'ultimo mese (in totale 112).

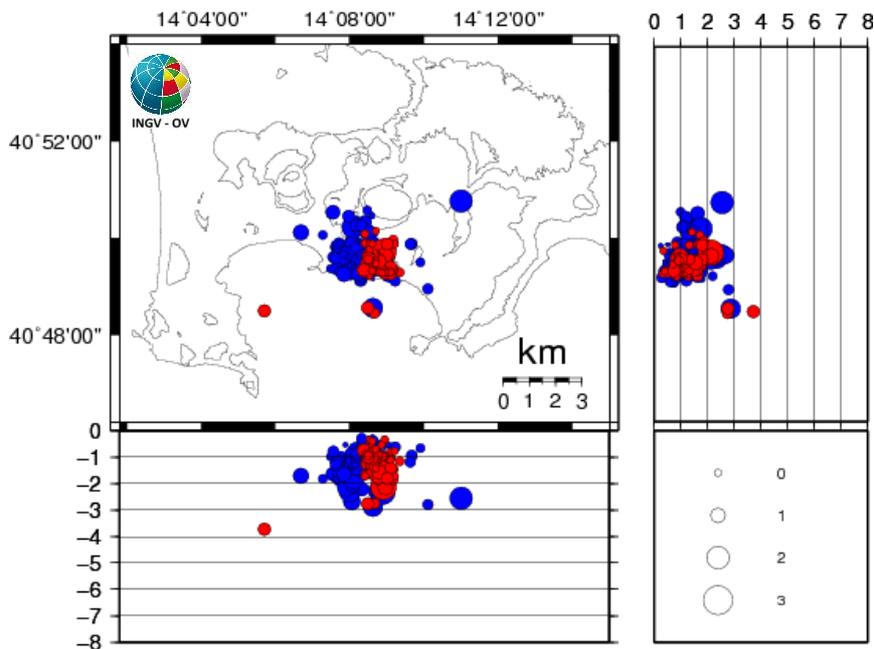


Figura 1.3 - Localizzazioni ipocentrali ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (in blu) e dell'ultimo mese (in rosso). La dimensione dei simboli è proporzionale alla magnitudo, come indicato nel riquadro in basso.

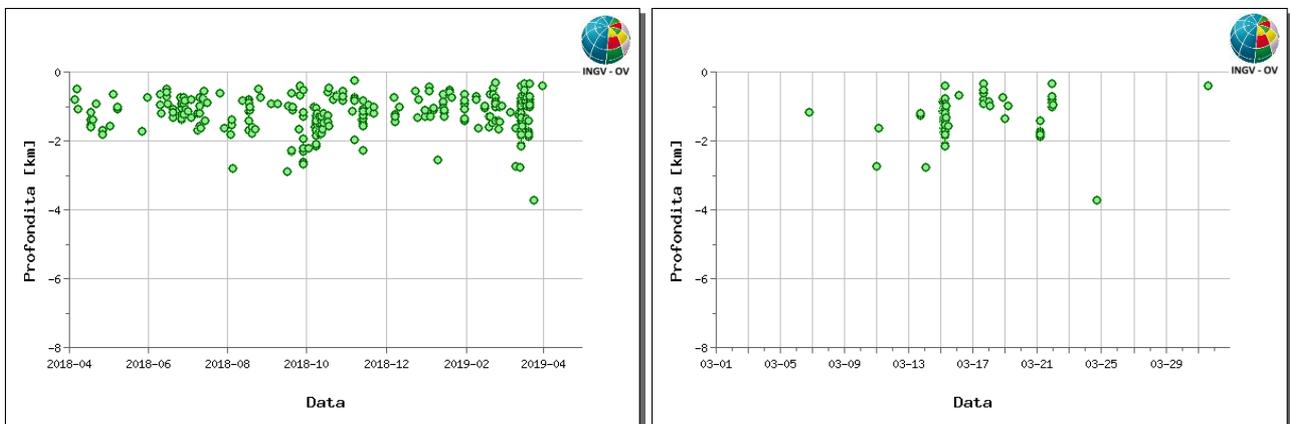


Figura 1.4 - Profondità ipocentrali degli eventi registrati ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (a sinistra) e dell'ultimo mese (a destra).

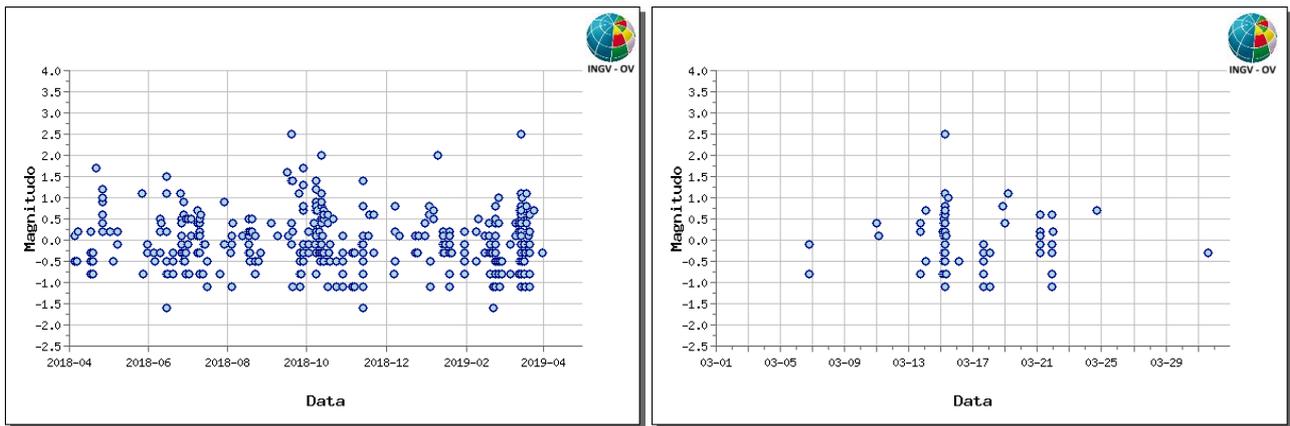


Figura 1.5 - Magnitudo degli eventi registrati ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (a sinistra) e dell'ultimo mese (a destra).

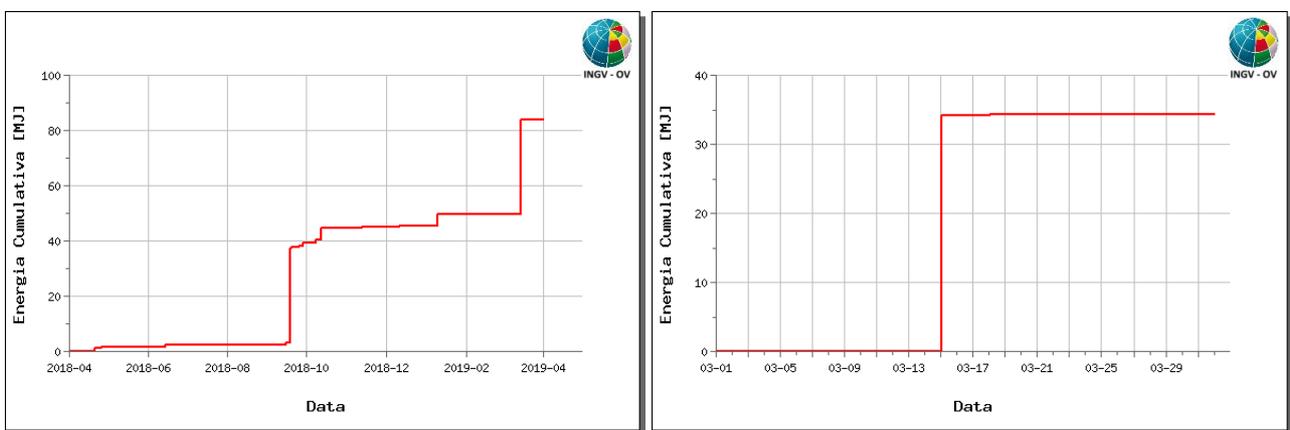


Figura 1.6 - Rilascio cumulativo di energia sismica ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (a sinistra) e dell'ultimo mese (a destra).

L'analisi del meccanismo focale dell'evento più energetico del mese di marzo 2019 (Tab.1) mostra una soluzione associabile ad un meccanismo di tipo normale con componente obliqua (Fig. 1.7).

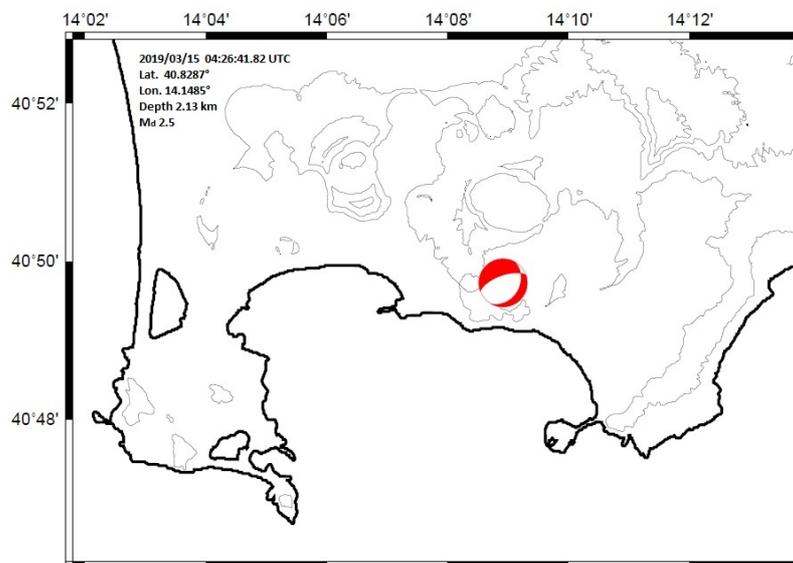


Figura 1.7 – Localizzazione e meccanismo focale dell'evento del 15/03 alle 04:26 UTC.

Tabella 1 – Parametri ipocentrali dei terremoti di magnitudo ≥ 1.5 registrati ai Campi Flegrei nel mese di marzo 2019.

Data UTC	Md	Lat. N	Lon. E	Prof. (km)
2019/03/15 04:26:41.82	2.5	40.8287	14.1485	2.13

In figura 1.8 sono rappresentati gli andamenti dei principali parametri sismologici a partire dal 2005.

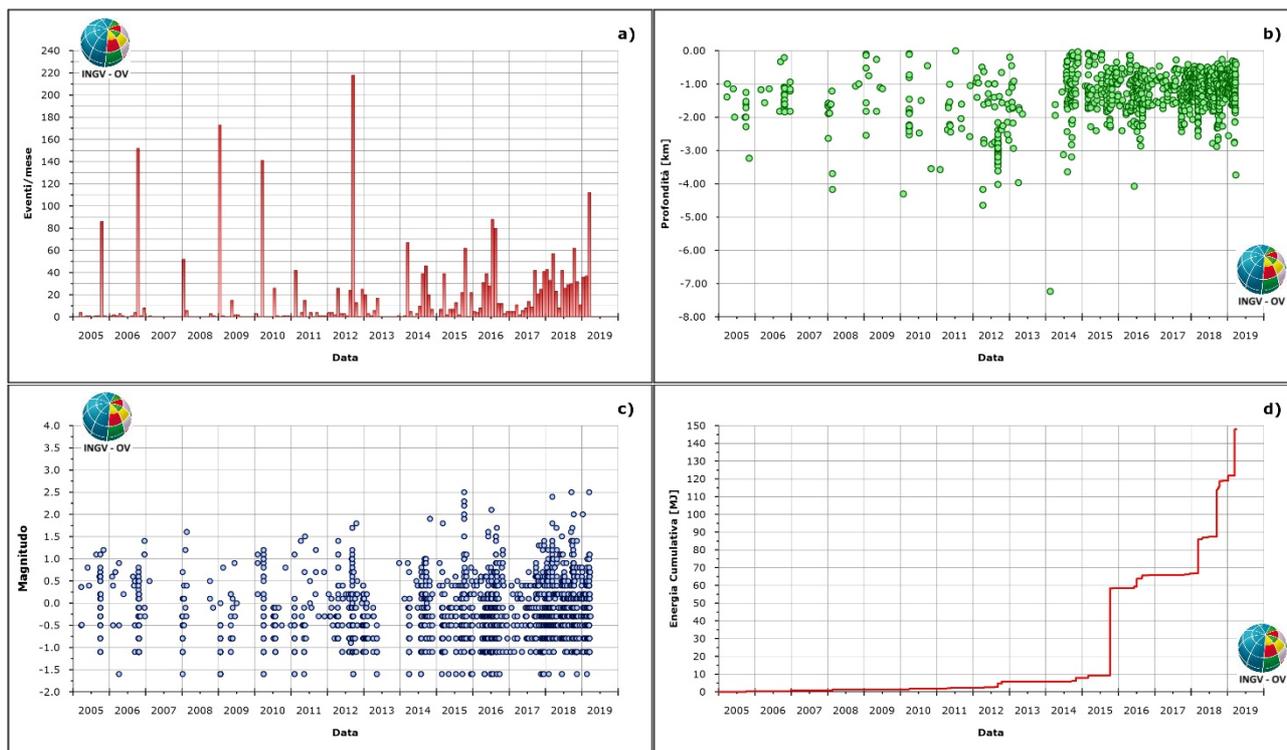


Figura 1.8 - Andamento dei principali parametri sismologici a partire dal 2005: a) frequenza di accadimento; b) profondità ipocentrali; c) magnitudo; d) energia cumulativa.

2. DEFORMAZIONI DEL SUOLO

2.1 GPS

I dati GPS confermano il valore medio di sollevamento nell'area di massima deformazione di circa 0.7 cm/mese a partire da luglio 2017.

Il sollevamento registrato alla stazione GPS di RITE (Fig. 2.1.1) è di circa 22.5 cm a partire da gennaio 2016, di cui circa 15.5 cm da gennaio 2017 (Figg. 2.1.2 e 2.1.3).



Figura 2.1.1 - Rete GPS Permanente dei Campi Flegrei.



Figura 2.1.2 - Serie temporale delle variazioni settimanali in quota della stazione di RITE (Pozzuoli – Rione Terra) dal 2000 a marzo 2019.

La figura 2.1.3 riporta le serie temporali delle variazioni in quota di alcune stazioni GPS ubicate nella zona di massima deformazione dei Campi Flegrei. I punti in nero, rosso, verde e viola rappresentano le variazioni settimanali calcolate con i prodotti finali IGS (effemeridi precise e parametri della rotazione terrestre) i quali vengono rilasciati con un ritardo di 12-18 giorni. I punti in blu rappresentano le variazioni giornaliere calcolate con prodotti rapidi IGS in attesa della rielaborazione con i prodotti finali IGS appena disponibili.

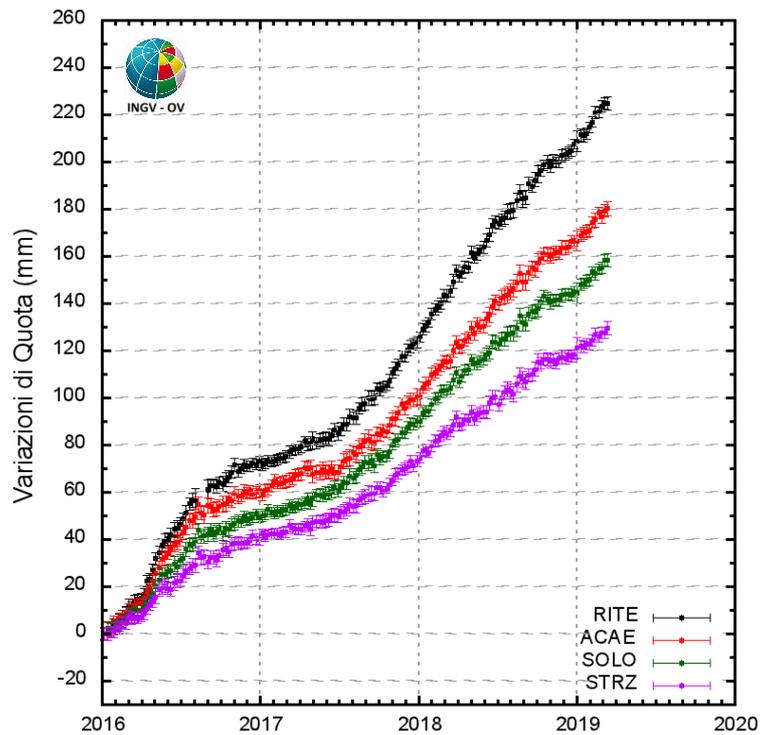


Figura 2.1.3 - Serie temporale delle variazioni in quota della stazione di RITE (Pozzuoli - Rione Terra), ACAE (Accademia Aeronautica), SOLO (Solfatara) e STRZ (Pozzuoli - Cimitero) da gennaio 2016 a marzo 2019.

In Figura 2.1.4 è riportata la mappa dei vettori degli spostamenti orizzontali registrati alle stazioni CGPS ai Campi Flegrei dal 2016.

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.

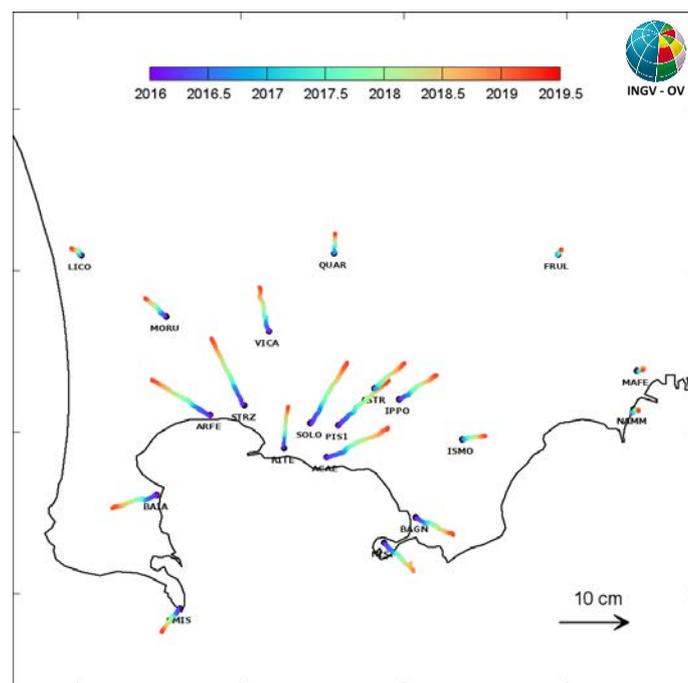


Figura 2.1.4 - Mappa degli spostamenti GPS orizzontali registrati nell'area flegrea da gennaio 2016 a marzo 2019.

2.2 Tiltmetria

La Rete di Monitoraggio delle inclinazioni del suolo dei Campi Flegrei consiste di 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. 2.2.1).

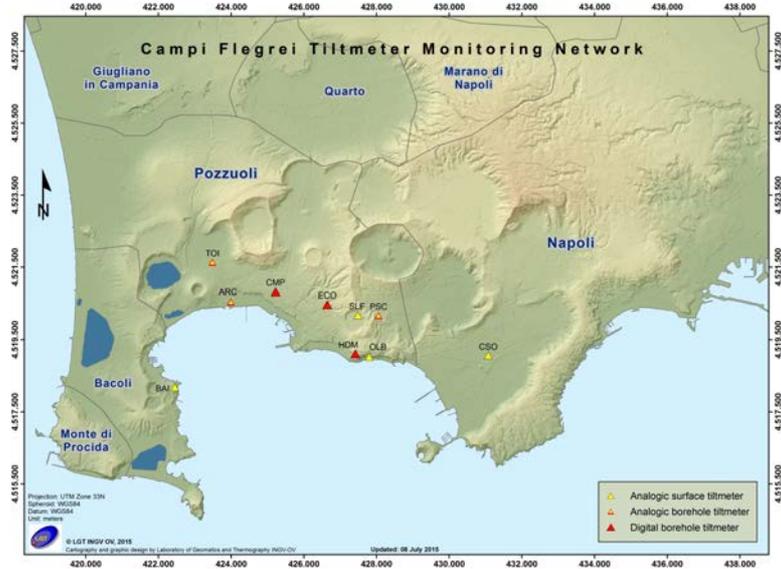


Figura 2.2.1 – Rete Tiltmetrica dei Campi Flegrei.

La variazione tiltmetrica osservata ai Campi Flegrei nel periodo gennaio-marzo 2019 continua a mostrare un pattern coerente con l'attuale sollevamento del suolo, ad eccezione della stazione ECO la cui direzione di inclinazione si discosta in modo discontinuo dalla direzione NNE che è quella conforme alla fase di uplift che interessa Pozzuoli. (Fig. 2.2.2).

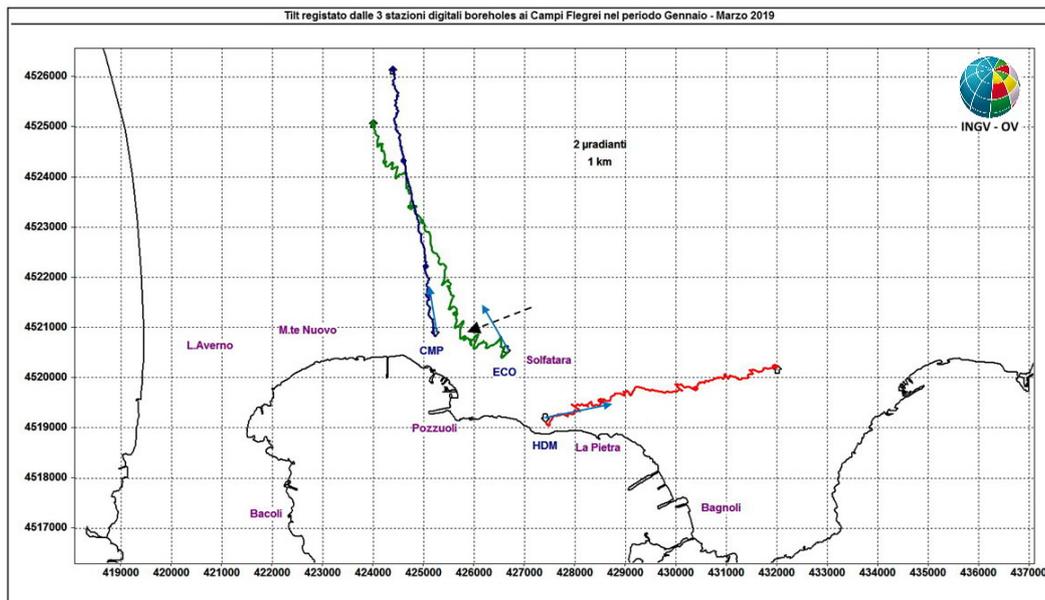


Figura 2.2.2 - Pattern tiltmetrico osservato ai Campi Flegrei. Per comodità di rappresentazione grafica e per una interpretazione più agevole, sono state selezionate in tale figura solo le 3 stazioni "borehole" con sensori ubicati a 25 m di profondità. Il lato di ogni maglia del reticolo equivale a 2 μ radianti o 1 km. Le frecce blu sovrapposte (non in scala) indicano la direzione di abbassamento del suolo. La freccetta nera tratteggiata indica il giorno (25 Gennaio) in cui la direzione di tilting inizia a ruotare in direzione oraria.

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 indica settori di crosta in abbassamento ed è univocamente definito dal suo estremo libero.

Nella Tabella seguente sono riportati, per le stazioni digitali, i valori di inclinazione del suolo, la direzione di tilting e la variazione di temperatura registrata a fondo pozzo (≈ -25 m dal p.c.) nel primo trimestre 2019.

Sito	Inclinazione e direzione	Temperatura
Stazione ECO (89 m s.l.m.)	10.7 μ radianti a NNW	0.02 °C
Stazione CMP (62 m s.l.m.)	10.9 μ radianti a NNW	0.01 °C
Stazione HDM (112 m s.l.m.)	9.5 μ radianti a ENE	-0.02 °C

In Figura 2.2.3 sono riassunti gli andamenti delle componenti tiltmetriche (filtrate dalle periodicità giornaliere) e termica registrate da ognuna delle 3 stazioni borehole. Per evidenziare la continuità dei segnali, il periodo di tempo rappresentato parte dal 1 gennaio 2018; poiché, inoltre, i segnali acquisiti rappresentano la variazione di tilt, sono stati tutti azzerati a partire da quella data.

Componenti NS del tilt: le 3 stazioni mostrano un trend di inclinazione verso N e quindi un sollevamento del suolo a S delle stesse;

Componenti EW del tilt:

HDM si inclina decisamente ad E;

CMP si inclina lentamente verso W arrestando la sua deriva prima dell'evento sismico flegreo del 15 Marzo;

ECO, continua ad inclinarsi verso W con il risultato di ruotare in senso antiorario la direzione di tilting del sito stazione.

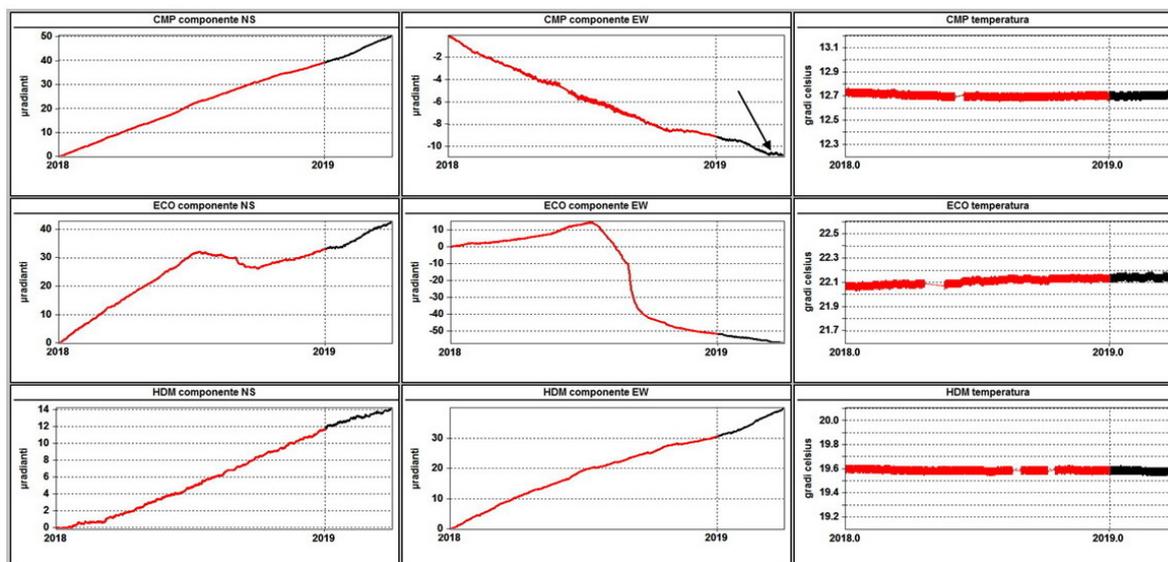


Figura 2.2.3 – Serie temporali dei segnali registrati a partire dal 2018 dalle 3 stazioni “borehole” della rete flegrea ordinate dal basso verso l’alto secondo la latitudine. Le prime 2 colonne riportano le componenti NS ed EW in μ radianti i cui valori di tilt crescenti nel tempo indicano rispettivamente la variazione di inclinazione del suolo a N e ad E, mentre la terza colonna riporta la temperatura in °C registrata da ogni sensore. In rosso sono riportati i segnali relativi al 2018 mentre in nero sono rappresentati quelli registrati nel 2019. La freccetta nera indica il terremoto del 15 Marzo sulla time-series di CMP EW.

L'evento più energetico ($M_d=2.5$) avvenuto all'interno della sequenza sismica del 15 Marzo (04:26:42 UTC) è stato rilevato da 5 stazioni tiltmetriche flegree.

In particolare, 4 tiltmetri borehole (CMP NS, ECO NS/EW, HDM NS/EW e PSC EW) hanno registrato anomalie sui segnali da 2 a 30 minuti prima dell'evento sismico del 15 Marzo 2019. Il corrispondente tilt cosismico è stato invece registrato a TOI NS, CMP NS/EW, ECO EW e HDM NS/EW (Fig. 2.2.4). Tali osservabili sono compatibili con un' oscillazione del suolo che ha interessato un'area comprendente la Solfatara e Pisciarelli.

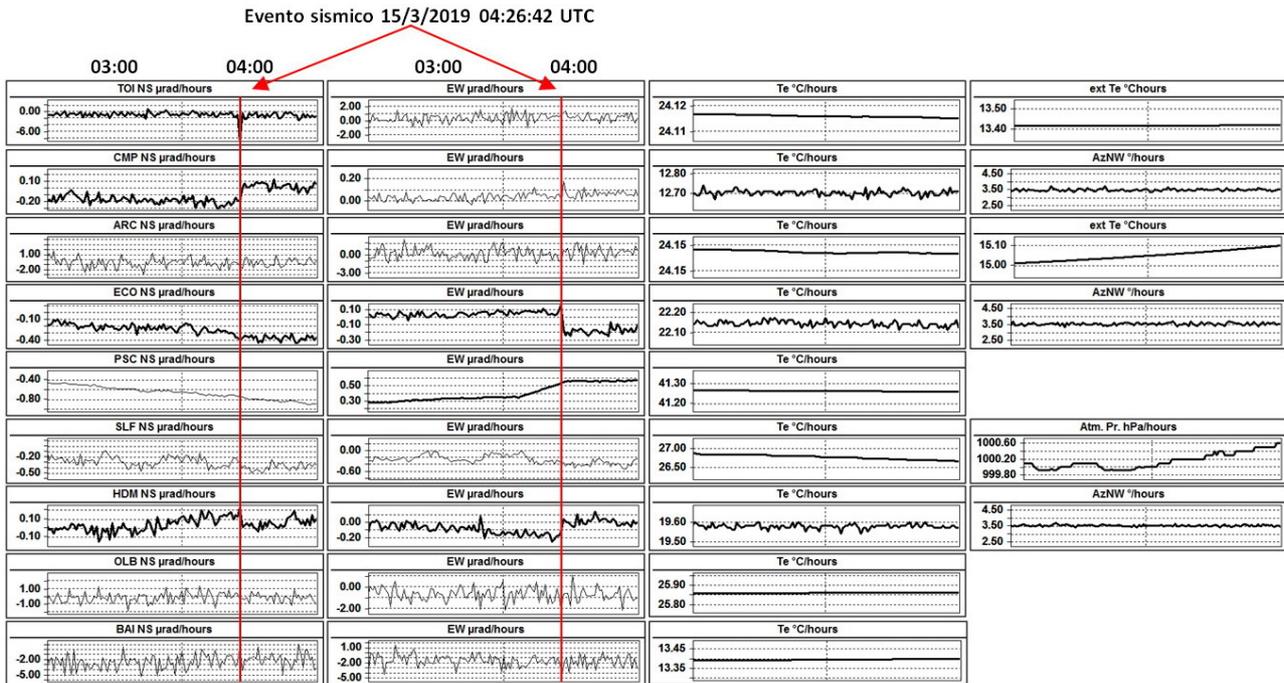


Figura 2.2.4 - Segnali registrati il 15 marzo 2019 dalle 03:00 alle 04:59 UTC da 9 dei 10 sensori della rete flegrea; le stazioni tiltmetriche sono ordinate dal basso verso l'alto secondo la latitudine e ad ognuna di esse è riservata una riga, mentre ogni colonna è invece relativa ad una componente acquisita. Le prime 2 colonne riportano le componenti NS ed EW in μ radianti i cui valori di tilt crescenti nel tempo indicano rispettivamente la variazione di inclinazione del suolo a N e ad E. La terza colonna riporta le temperature in $^{\circ}$ C registrate da ogni sensore ed infine l'ultima colonna è riservata ai segnali non rilevati da tutte le stazioni, come la temperatura misurata a bocca pozzo ad ARC e TOI, la pressione atmosferica in hPa acquisita a SLF e la variazione di declinazione magnetica in gradi registrata dai sensori Lily. Per questi ultimi, la dicitura AzNW significa azimuth antiorario misurato dalla bussola a fondo pozzo. La linea rossa sovrapposta sulle componenti NS ed EW corrisponde alle ore 04:27.

2.3 Mareometria

La Rete Mareografica è riportata in Figura 2.3.1.

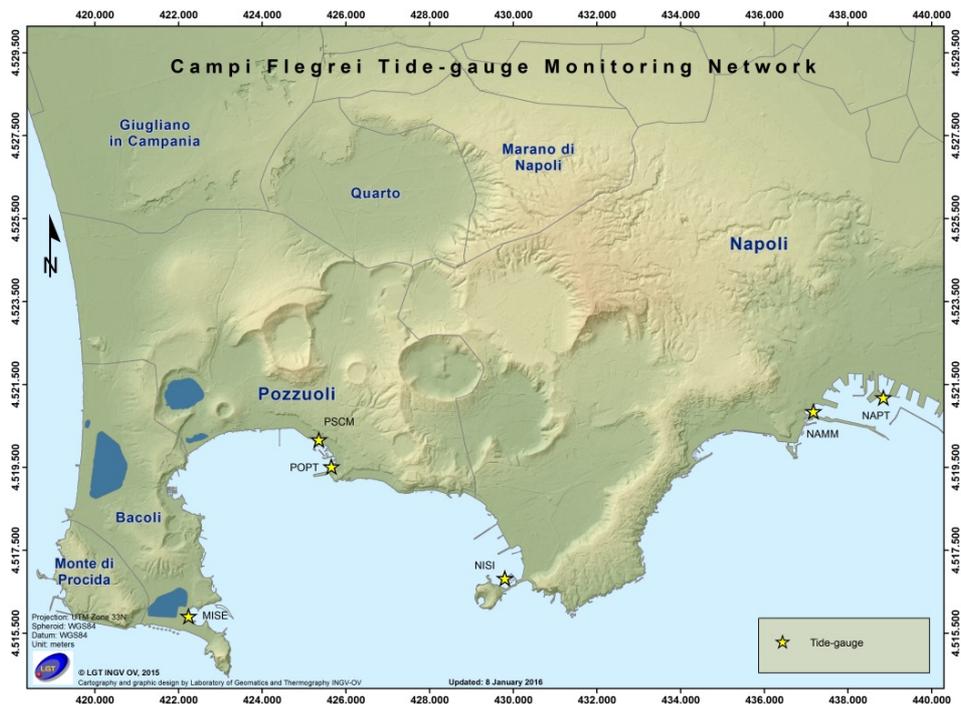


Figura 2.3.1 - Rete Mareografica di Campi Flegrei.

I dati mareografici relativi alla stazione di Pozzuoli Porto nel periodo gennaio 2014 – marzo 2019 mostrano l'andamento di Figura 2.3.2a, dal quale si evince un sollevamento prossimo ai 33 cm. Da gennaio 2016 a marzo 2019 si ha un contributo di quasi 22 cm di sollevamento (Figura 2.3.2b). Il picco visibile verso la fine del mese di luglio 2016 è stato determinato dal malfunzionamento temporaneo del sensore della stazione di riferimento NAMI, mentre quello visibile a fine settembre 2018 è determinato da particolari condizioni meteorologiche.

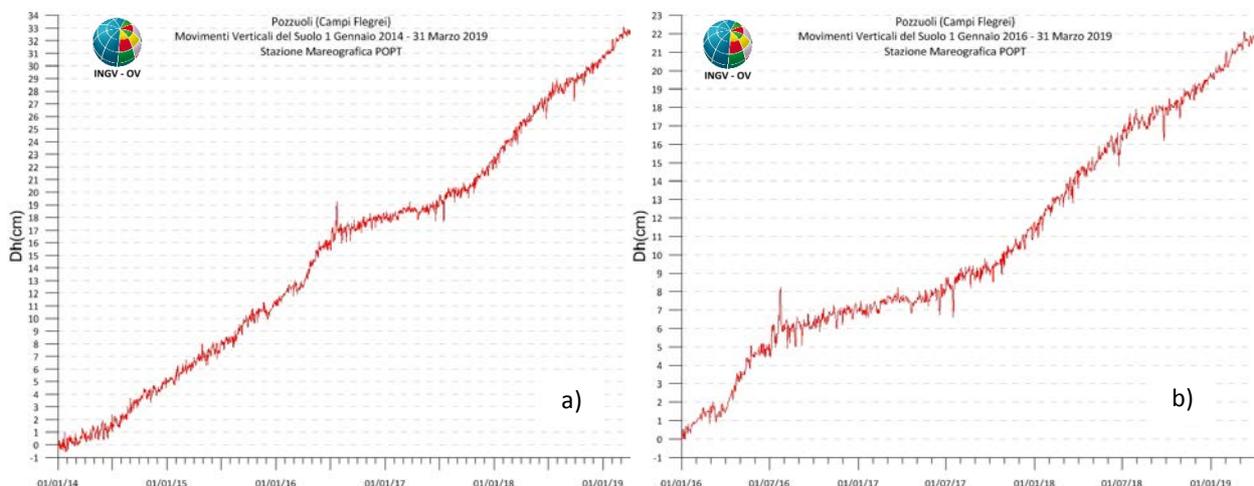


Figura 2.3.2 - Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2014 – marzo 2019 (a) e gennaio 2016 – marzo 2019 (b), ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti dal sensore digitale alla stazione mareografica di Pozzuoli Porto (POPT) (area centrale della caldera flegrea). Le variazioni riportate rappresentano le medie giornaliere e sono riferite alla stazione di Napoli molo S.Vincenzo (NAMI).

I dati nella serie temporale dal 2006 ad oggi (Figura 2.3.3), sono stati raccordati con i dati riferiti alla ex stazione NAPT (dismissa a febbraio 2016), potendoli considerare omogenei all'interno degli errori di misura. Dal 2006 ad oggi si registra un sollevamento di circa 51 cm alla stazione di Pozzuoli Porto.

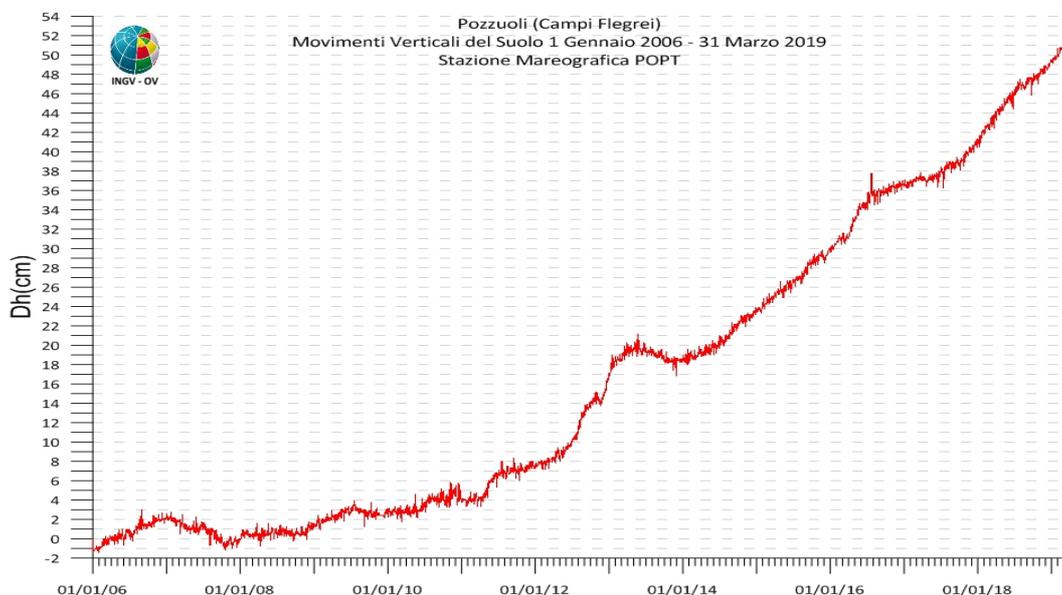


Figura 2.3.3 - Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2006 – marzo 2019, ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti dal sensore digitale alla stazione mareografica di Pozzuoli Porto (POPT) (area centrale della caldera flegrea). Le variazioni riportate rappresentano le medie giornaliere e sono riferite alla stazione di Napoli molo S.Vincenzo (NAMM).

2.4 Gravimetria

Dal 19 febbraio agli inizi di marzo 2019 è stata effettuata una campagna gravimetrica di misure relative nel corso della quale sono state istituite cinque nuove stazioni di misura (indicate in figura 2.4.1 con quadrati pieni rossi), due delle quali (Baia e Quarto) allo scopo di sostituire quelle già esistenti e risultate non idonee per le misure assolute.

Dopo l'elaborazione dei dati di campagna, le differenze di gravità di ciascuna stazione, calcolate rispetto a quella di riferimento in Napoli (Università), sono state confrontate con quelle della precedente campagna condotta nel mese di marzo 2018.

I risultati evidenziano che nell'intervallo di tempo considerato (marzo 2018- febbraio/marzo 2019), l'area flegrea non è stata globalmente interessata da variazioni di gravità di rilevante entità; risulta comunque una diminuzione di gravità nella zona centrale della caldera (compresa tra -21 e -32 μGal in corrispondenza delle stazioni Accademia Aeronautica, Belvedere S. Gennaro, Ingresso Solfataro e sul vertice in Via Campana Nord), e un aumento di gravità di 19 μGal in corrispondenza di un vertice sul lungomare di Pozzuoli.

In figura 2.4.1 è illustrato il campo variometrico tracciato con equidistanza di 15 μGal .

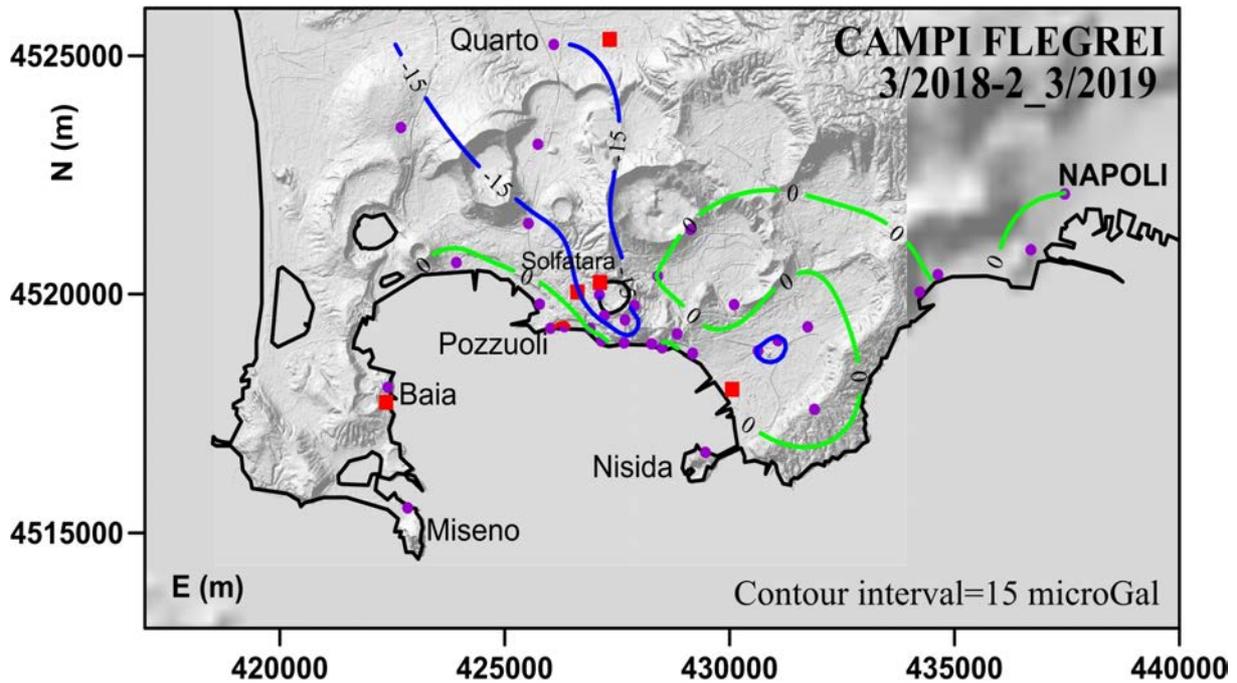


Figura 2.4.1 - Campo delle variazioni di gravità sull'intervallo di tempo marzo 2018 – febbraio/marzo 2019. Le variazioni positive, negative e la linea di zero sono rispettivamente rappresentate con le curve in colore rosso, blu e verde. I cerchi pieni viola rappresentano le stazioni gravimetriche, quelle istituite nel corso dell'ultima campagna sono rappresentate con quadrati rossi.

3. MONITORAGGIO TERMICO AD IMMAGINE

3.1 Rete Permanente Monitoraggio Termico ad Immagine

La stazione SF2 della Rete Permanente di Monitoraggio Termico (TIRNet) dei Campi Flegrei acquisisce immagini all'infrarosso termico del settore settentrionale del versante interno del cratere della Solfatara, mentre la stazione PS1 acquisisce immagini all'infrarosso termico della parte alta del versante ad ovest della fumarola principale in località Pisciarelli (Fig. 3.1.1; Silvestri et al., 2017; Vilardo et al., 2015).

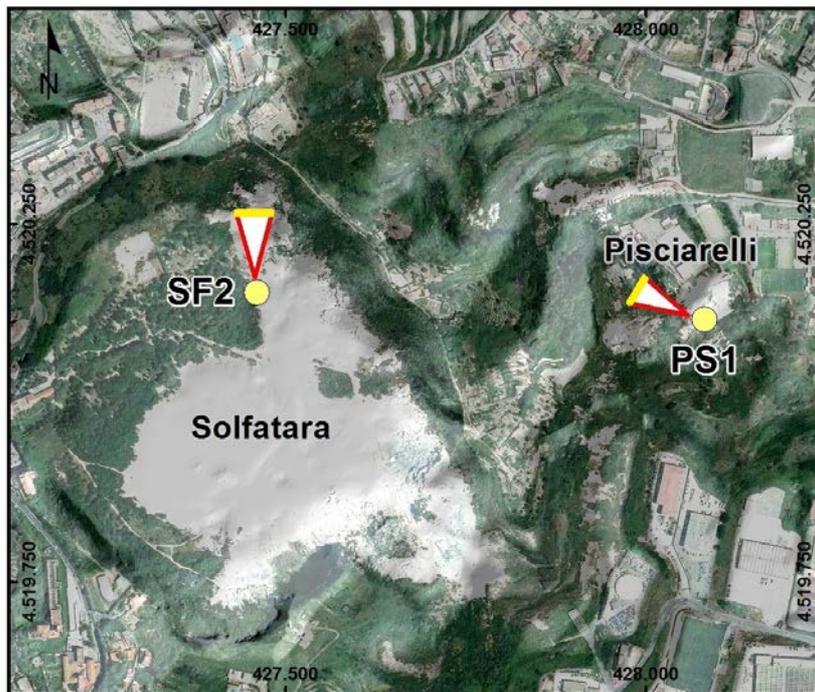


Figura 3.1.1 - Stazione SF2 e PS1. Punto giallo: posizione della stazione; base del triangolo: area campionata.

Le figure 3.1.2 e 3.1.3 mostrano l'elaborazione delle rispettive serie temporali dei valori di temperatura massima delle immagini IR processati mediante l'algoritmo di destagionalizzazione analitica STL (Seasonal Trend Decomposition).

L'andamento delle temperature massime rilevate dalla stazione SF2 mostra, dall'inizio del 2015, un trend in lieve e costante diminuzione seppur in presenza di ampie oscillazioni a corto periodo (Fig. 3.1.2). Dopo aver raggiunto nel mese di febbraio 2018 il valore minimo degli ultimi 5 anni, le temperature massime hanno mostrato un trend in sensibile aumento nei mesi di marzo e di aprile 2018. Da luglio 2018 a tutto marzo 2019 si osserva un andamento dei valori di temperatura stazionario, seppure in presenza di oscillazioni di varia ampiezza e periodo.

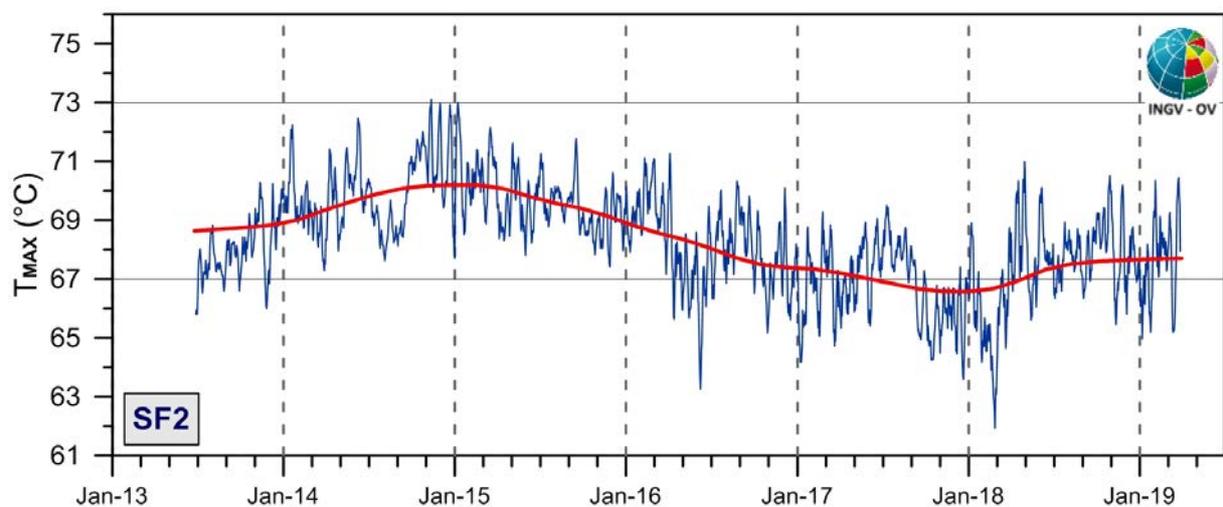


Figura 3.1.2 - Stazione SF2. Serie temporali delle medie settimanali (blu) e del trend a lungo termine (rosso) dei valori di temperatura massima rilevati nell'immagine IR destagionalizzata mediante applicazione dell'algoritmo STL.

L'andamento delle temperature massime rilevate dalla stazione PS1 (Fig. 3.1.3), dopo una costante diminuzione registrata nel 2017 fino al raggiungimento dei valori tra i più bassi degli ultimi 5 anni, ha presentato un significativo aumento nei mesi da gennaio ad aprile 2018. Dall'inizio del mese di luglio 2018 a tutto marzo 2019 si osserva un andamento dei valori di temperatura sostanzialmente stabile, se paragonato a quanto osservato nei mesi immediatamente precedenti.

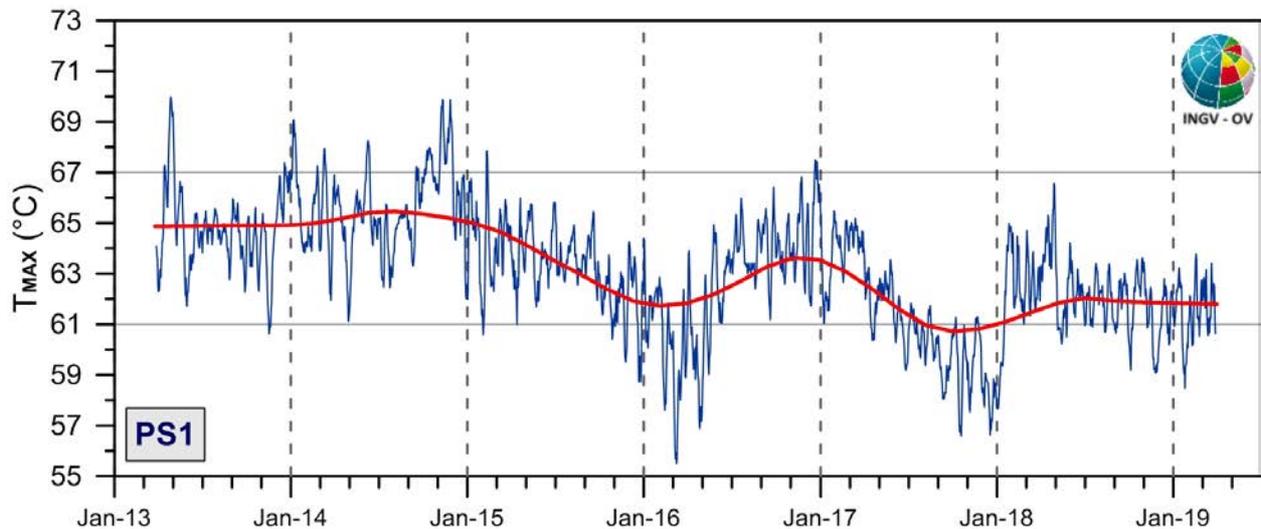


Figura 3.1.3 - Stazione PS1. Serie temporali delle medie settimanali (blu) e del trend a lungo termine (rosso) dei valori di temperatura massima rilevati nell'immagine IR destagionalizzata mediante applicazione dell' algoritmo STL.

In Figura 3.1.4 è mostrato il trend a lungo termine (ottobre 2007 - marzo 2019) delle variazioni delle temperature massime superficiali rilevate dalla stazione PS1 ottenuto mediante applicazione dell'algoritmo STL.

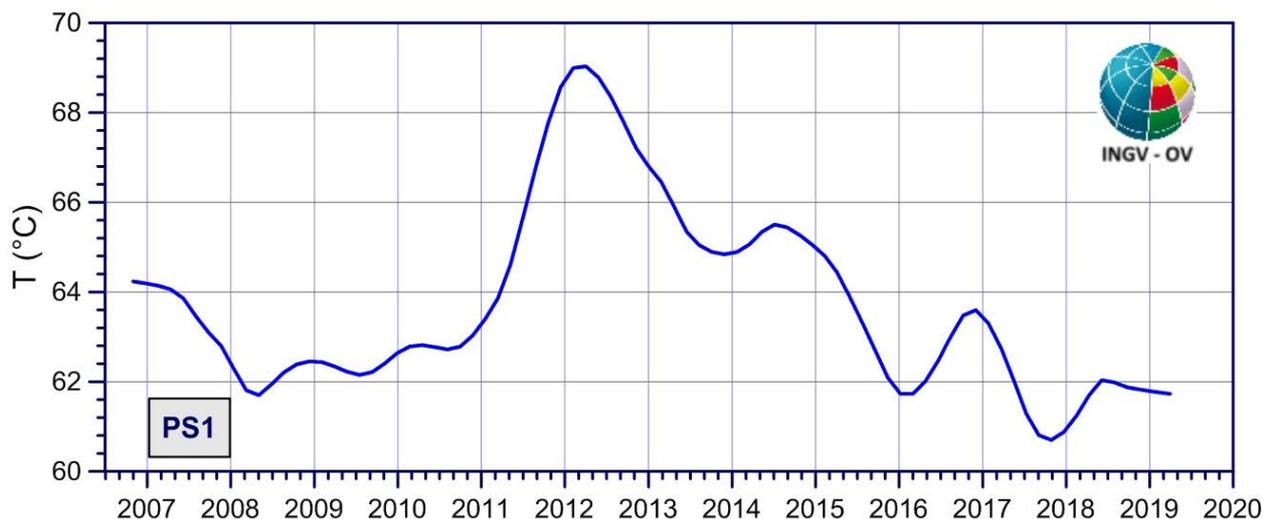


Figura 3.1.4 - Stazione PS1: Stazione Pisciarelli. Trend a lungo termine dei valori di temperatura massima rilevati nell'immagine IR ottenuto mediante applicazione dell' algoritmo STL.

La Figura 3.1.4 evidenzia, dopo il raggiungimento del picco massimo dei valori nella prima metà del 2012, il verificarsi di un trend in costante diminuzione, seppure in presenza di ampie oscillazioni a lungo periodo. I valori minimi si sono osservati nella seconda metà del 2017. A partire dagli ultimi mesi del 2017, l'andamento della temperatura superficiale dell'area target mostra un lieve incremento.

Dal mese di luglio 2018 a tutt'oggi, l'andamento del trend a lungo termine della temperatura superficiale dell'area target mostra un andamento stazionario.

3.2 Monitoraggio Termico con Termocamera Mobile e Termocoppia

La sorveglianza vulcanologica tramite Telecamere Termiche Mobili (TTM) e termocoppie rigide ha come principale obiettivo l'individuazione di eventuali variazioni nel tempo dei valori di temperatura misurati al suolo in punti discreti e/o di aree a temperatura maggiore in modo da evidenziare eventuali modifiche nella distribuzione areale del campo fumarolico.

I rilievi sono eseguiti mensilmente in condizioni di non irraggiamento solare (essenzialmente di notte), utilizzando una termocamera portatile FLIR SC640 ad alta risoluzione (640 x 480 pixel) e sensibilità ($<0.06^{\circ}\text{C} + 30^{\circ}\text{C}$). La termocoppia utilizzata è di tipo K, con errore strumentale di circa 0.1°C nell'intervallo $-200 \div 1260^{\circ}\text{C}$. Le misure ottenute con la termocamera sono confrontate, quando possibile, con quelle eseguite con termocoppia rigida.

Ubicazione dei punti di misura ai Campi Flegrei

Le aree e i punti in cui vengono effettuate le misure termiche nella caldera dei Campi Flegrei sono distribuite in varie zone del fondo della caldera (Fig. 3.2.1).

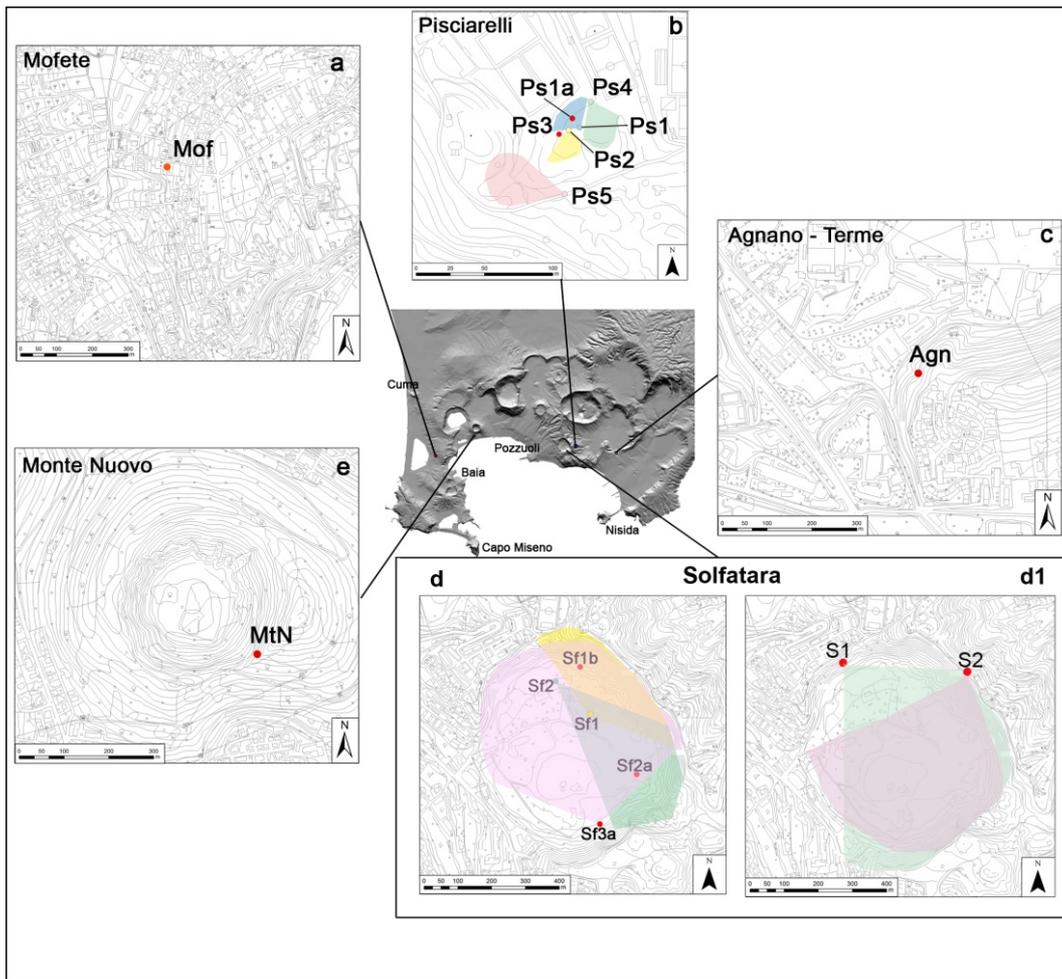


Figura 3.2.1 – Ubicazione dei punti di misura e dei settori indagati ai Campi Flegrei. I pallini rossi indicano i punti stazione dove sono stati effettuati rilievi con termocoppia rigida e telecamera termica. Nel riquadro b, le aree colorate celeste, verde e rosa indicano i versanti rilevati con termocamera rispettivamente dalle stazioni Ps1, Ps4 e Ps5. Nel riquadro d, le aree in giallo, verde e rosa indicano i versanti rilevati con termocamera rispettivamente dalle stazioni Sf1, Sf2 e Sf3; Sf2a e Sf1b sono misure puntuali effettuate con termo camere e termocoppia, Nel riquadro d1, le aree rosa e verde indicano i versanti rilevati con termocamera rispettivamente dalle stazioni S1 e S2.

In generale, non ci sono significative variazioni di temperatura massima e modifiche nella distribuzione areale del campo fumarolico nei diversi punti di misura.

Di seguito, vengono mostrati i risultati relativi a tre siti di misura selezionati.

Pisciarelli

I valori di temperatura rilevati a marzo 2019 con telecamera termica e termocoppia rigida al punto stazione Ps1a (Fig.3.2.1b) confermano la stabilità nell'ultimo anno come nei precedenti, a meno di variazioni stagionali (Fig. 3.2.2c).

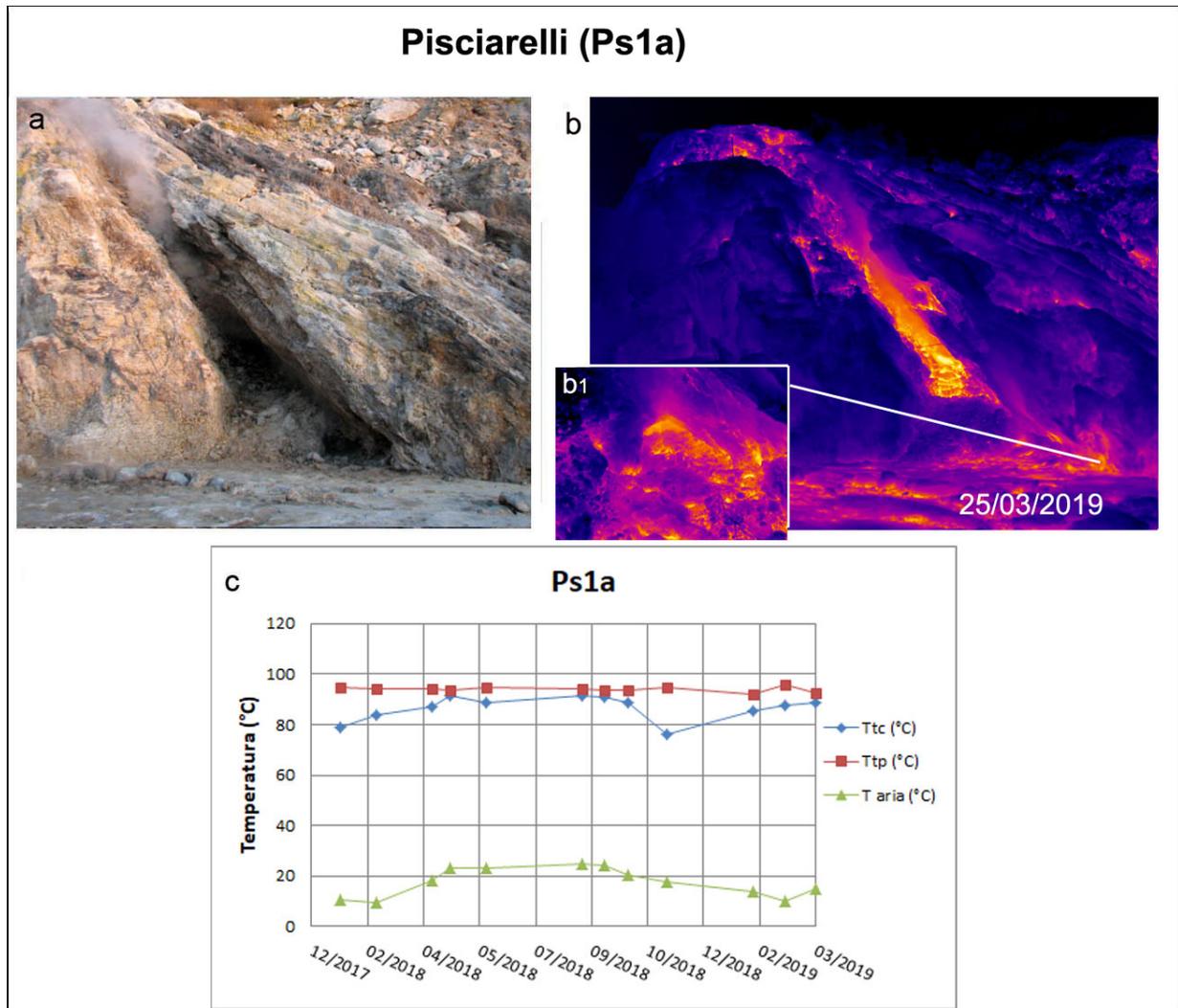


Figura 3.2.2 – Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione Ps1 di figura 3.2.1b, di un versante con frattura contenente fumarole in località Pisciarelli. Immagine termica (b1) riprese dal punto stazione Ps1a di figura 3.2.1b presente alla base della frattura. Valori massimi di temperatura con termocamera (Ttc) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell'aria misurata nel momento del rilievo termico dell'ultimo anno, da gennaio 2018 a marzo 2019 (c).

Monte Nuovo

I valori di temperatura rilevati a marzo 2019 con telecamera termica e termocoppia rigida lungo il versante meridionale dell'edificio di Monte Nuovo (MtN, figura 3.2.1e), confermano la stabilità nell'ultimo anno come nei precedenti a meno di variazioni stagionali (Fig. 3.2.3c).

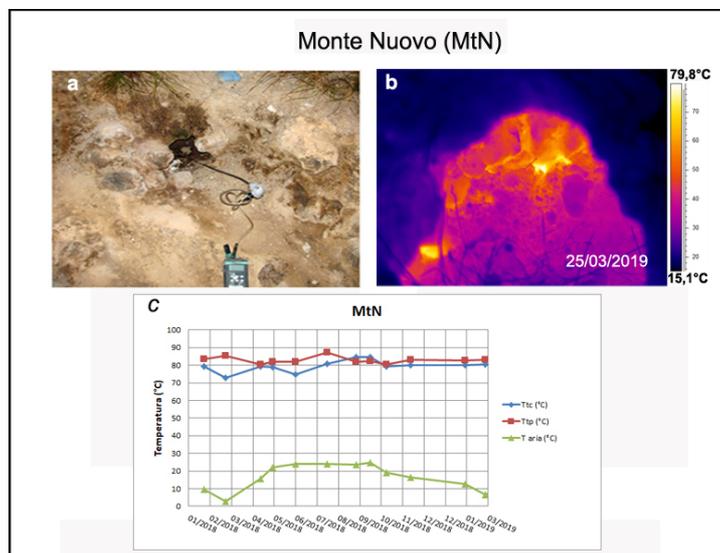


Figura 3.2.3 – Fumarola lungo il versante meridionale di Monte Nuovo. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto MtN di figura 3.2.1e. Valori massimi di temperatura con termocamera (Ttc) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell'aria misurata nel momento del rilievo termico, da gennaio 2018 a marzo 2019 (c).

Agnano Terme

I valori di temperatura rilevati a marzo 2019 con telecamera termica e termocoppia rigida in corrispondenza di una fumarola non captata presso le "Terme di Agnano" (Agn, figura 3.2.1c), confermano la stabilità nell'ultimo anno come nei precedenti a meno di variazioni stagionali (Fig. 3.2.4c).

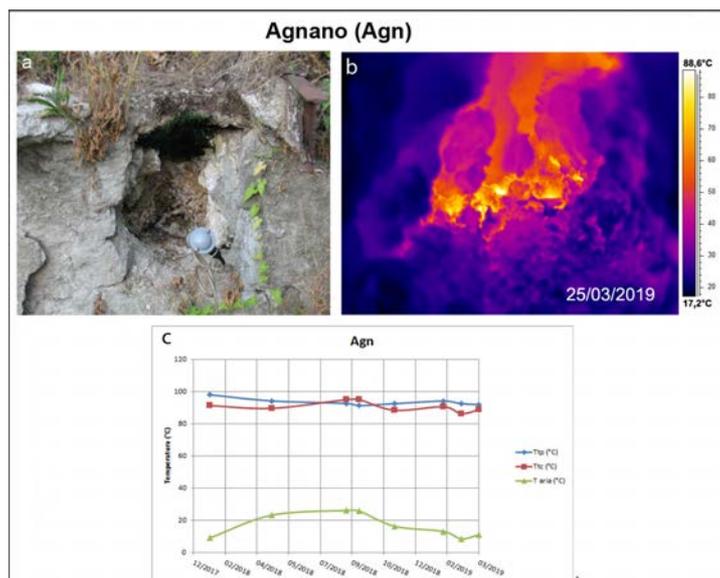


Figura 3.2.4 – Fumarola all'interno dello stabilimento termale delle "Terme di Agnano". Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione Agn di figura 3.2.1c. Valori massimi di temperatura con termocamera (Ttc) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell'aria misurata nel momento del rilievo termico, da gennaio 2018 a marzo 2019 (c).

4. GEOCHIMICA DEI FLUIDI

L'attività di monitoraggio svolta nel mese di marzo 2019 ai Campi Flegrei (Fig. 4.1) ha riguardato:

- l'acquisizione in continuo del flusso di CO₂ dal suolo (stazioni FLXOV5 e FLXOV1), della temperatura della fumarola BG e del gradiente termico nel cratere della Solfatara;
- l'acquisizione in continuo di dati di flusso di CO₂ dal suolo e della temperatura della fumarola tramite una nuova stazione automatica FLXOV8 installata a Pisciarelli;
- il campionamento delle fumarole principali Bocca Grande e Bocca Nuova nel cratere della Solfatara e della fumarola principale a Pisciarelli;
- misure di flusso di CO₂ dal suolo e temperatura del suolo su punti fissi selezionati nell'area della Solfatara e di Pisciarelli.

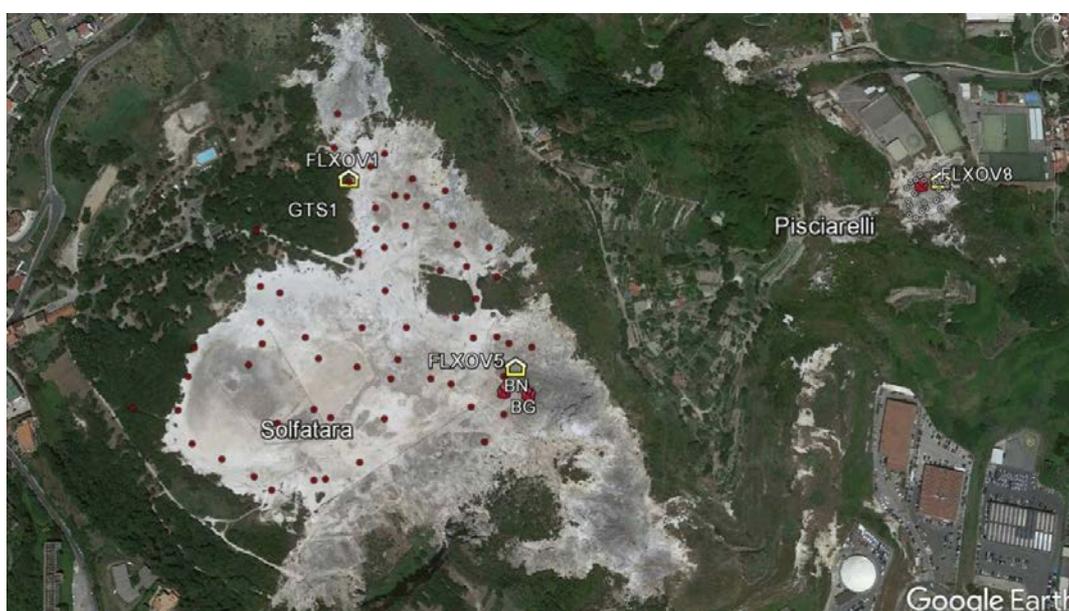


Figura 4.1 - Ubicazione delle stazioni della rete geochimica ai Campi Flegrei e dei siti dove sono eseguite le attività di monitoraggio geochimico. In particolare sono riportate le quattro stazioni geochimiche ubicate in area Solfatara-Pisciarelli, le principali fumarole della Solfatara (BG e BN) e di Pisciarelli, sono inoltre riportati i punti fissi per la misura del flusso di CO₂ dal suolo e della temperatura del suolo in area Solfatara (simboli rossi) e in area Pisciarelli (simboli bianchi).

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 Bollettini di Sorveglianza precedenti; Figg. 4.2 - 4.5).

Il rapporto CO₂/H₂O delle fumarole (Fig. 4.2) nei campioni di marzo 2019 è rimasto su valori elevati (~0.37 per la fumarola BG e ~0.35 per la fumarola BN) 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 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ misurato alle fumarole (Chiodini et al., 2015a; 2016). Inoltre è possibile che una frazione della CO_2 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 geoindicatori di Temperatura e Pressione, basati sulle composizioni delle fumarole BG e BN, indica il progressivo riscaldamento delle parti più superficiali del sistema idrotermale della Solfatara. In particolare, le concentrazioni di monossido di carbonio (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, tuttora in corso (fumarola BG, Fig. 4.3). Tale crescita è 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 Panichi (1980), che in generale ben descrive la $f\text{O}_2$ 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) a oggi (T circa 240 °C, Fig. 4.4). 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. 4.5) mostra picchi positivi, interpretati 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 marzo 2019, il rapporto CO_2/CH_4 è rimasto pressoché costante rispetto al periodo precedente suggerendo la fine di un picco che ha raggiunto i valori massimi nei periodi precedenti. I vari picchi corrisponderebbero, quindi, ad eventi di degassamento magmatico, occorsi in precedenza, e con conseguente immissione di fluidi magmatici nel sistema idrotermale che alimenta le fumarole della Solfatara. Per maggiori dettagli su tale processo si rimanda a specifici lavori scientifici (Chiodini et al., 2012; 2016). Inoltre, in Figura 4.5 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 del sistema idrotermale è supportato dalle misure periodiche, su punti fissi nel cratere della Solfatara, del flusso di CO_2 dal suolo e della temperatura del suolo (Fig. 4.1) che mostrano trend di aumento pluriennali. In particolare, i valori di flusso di CO_2 dal suolo relativi alle campagne mensili di misura mostrano un andamento caratterizzato da una periodicità annuale, rientrando in un trend di aumento dei valori a partire dal 2006 (Fig. 4.6). Analogamente, la media delle temperature del suolo, misurate a 10 cm di profondità, mostra un chiaro andamento stagionale sovrapposto a un trend d'aumento della temperatura (Fig. 4.7), con un incremento del valore medio delle temperature misurate di oltre 6 °C nel periodo 2002-2019. Nella mappa di Figura 4.8a è riportato l'incremento di temperatura espresso in °C/anno calcolato per ogni punto di misura a partire dal 2002. L'incremento di temperatura interessa diffusamente tutta l'area craterica con un massimo nella zona centrale; naturalmente, l'incremento di temperatura non interessa le aree delle fumarole e del bordo del cratere a NE dove le temperature sono vicine al limite fisico di condensazione per i fluidi emessi dalla Solfatara (~95°C, Fig. 4.8b).

La stazione multiparametrica FLXOV5, installata nel cratere della Solfatara a pochi metri dalla fumarola BG ha misurato un significativo aumento del flusso di CO_2 dal suolo a partire dal febbraio

2016 (Fig. 4.9). Tale aumento del flusso di CO₂ è da mettere in relazione all'evidente processo di fumarizzazione che interessa l'intera area.

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 4.10) 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 (Fig 4.11) e nell'aumento dei flussi misurati in continuo dalla stazione geochimica (Fig 4.12). Nel periodo di interesse la temperatura della fumarola, acquisita dalla nuova stazione multiparametrica del tipo "GEMMA" (FLXOV8), ha mostrato un valore medio di circa 115 °C (Fig. 4.13).

Poiché la fumarola è un sistema naturale in continua evoluzione, con variazioni macroscopiche del sito di emissione, la temperatura registrata potrebbe non sempre coincidere con la temperatura massima.

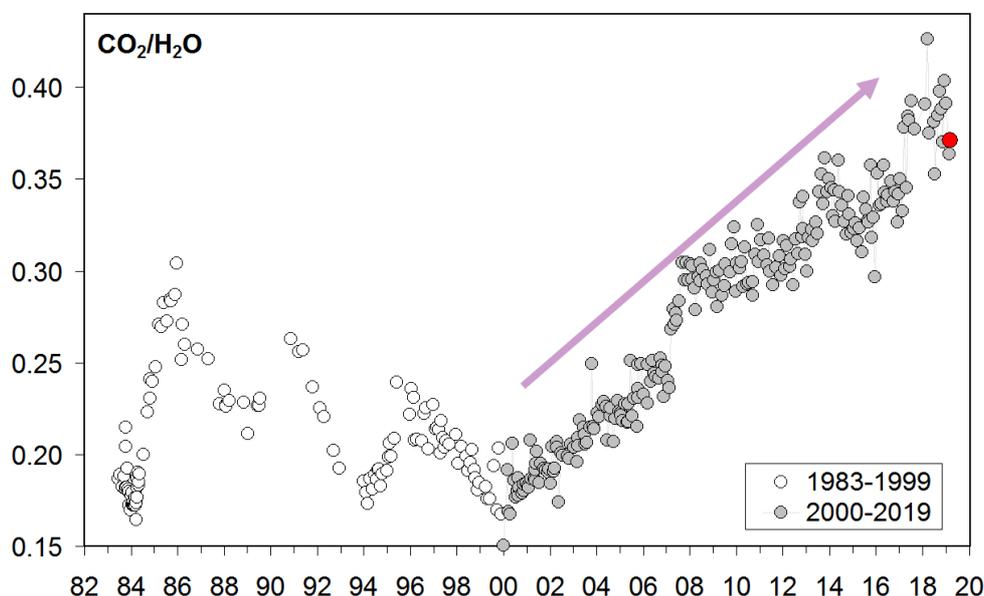


Figura 4.2 - Cronogramma del rapporto CO₂/H₂O per la fumarola BG. In grigio sono riportati i dati a partire dal 2000, quando è iniziato un trend d'aumento del rapporto CO₂/H₂O, in generale, indicativo di una crescente frazione della componente magmatica nei fluidi fumarolici. Con il simbolo rosso è evidenziato il campione di marzo 2019.

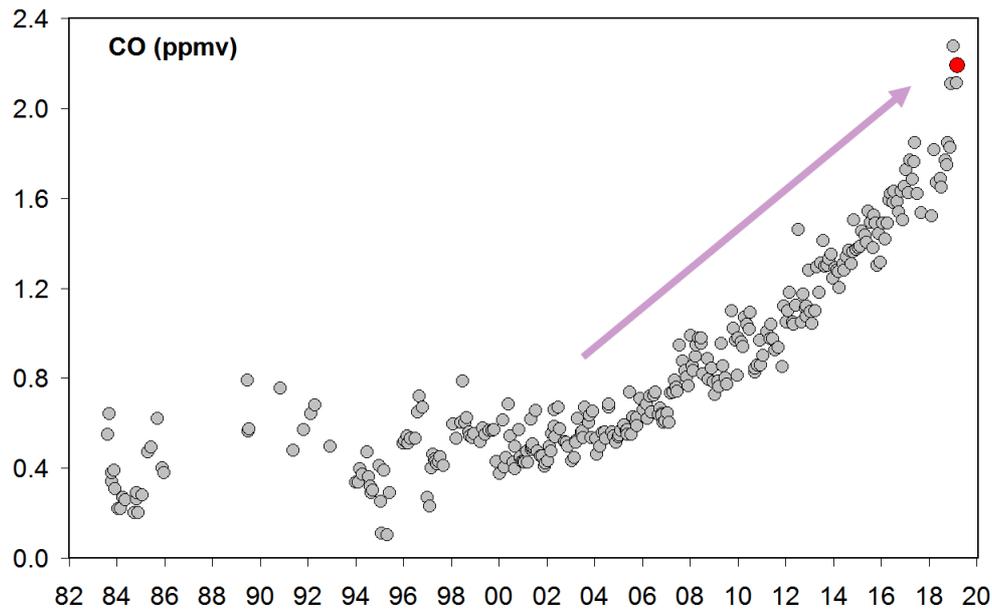


Figura 4.3 – Variazioni della concentrazione di monossido di carbonio (CO) misurato alla fumarola BG a partire dal 1983. Con il simbolo rosso è evidenziato il campione di marzo 2019. In generale alti contenuti di CO caratterizzano sistemi vulcanici ad elevata temperatura mentre fumarole alimentate da 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.

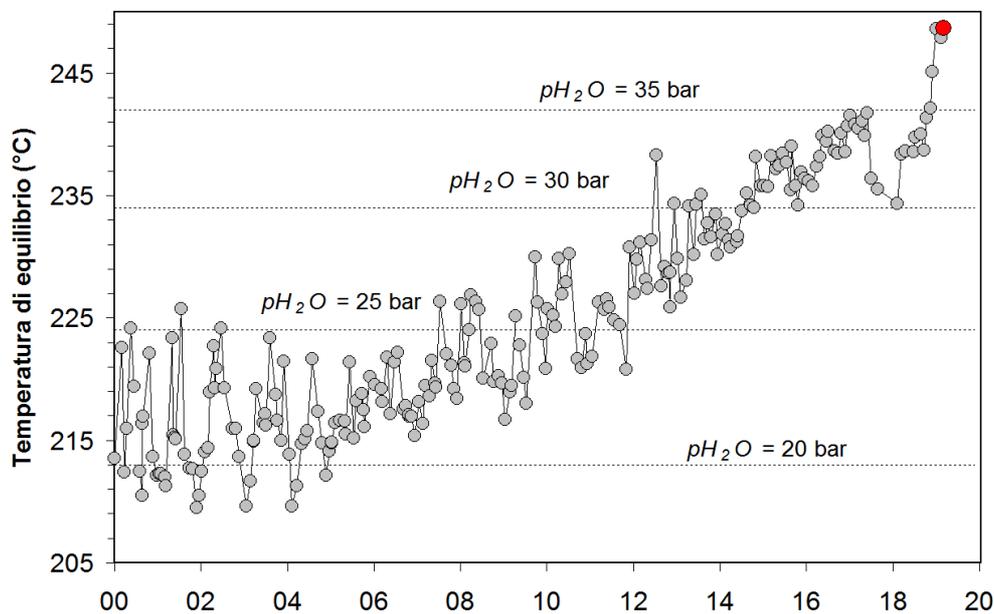


Figura 4.4 – Cronogramma delle temperature di equilibrio per il sistema CO-CO₂, stimate assumendo condizioni redox fissate dalla relazione di D'Amore and Panichi (1980). Tali temperature, rappresentative della parte più superficiale del sistema idrotermale (Caliro et al., 2007), mostrano un trend d'aumento a partire dai primi anni del 2000. Con il simbolo rosso è evidenziato il campione di marzo 2019 relativo alla fumarola BG.

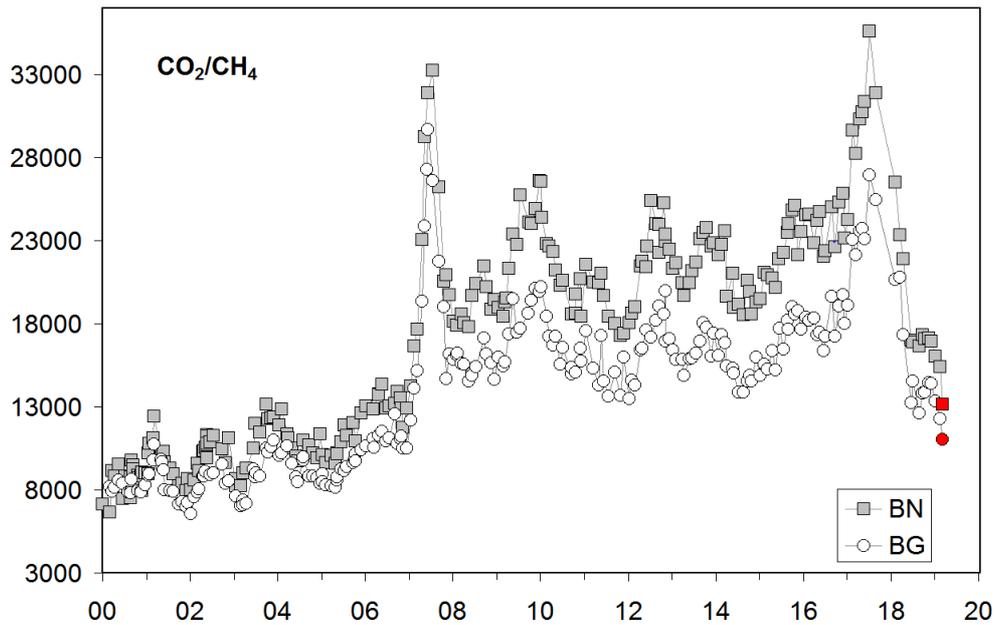


Figura 4.5 – Variazioni del rapporto CO_2/CH_4 per le fumarole BG e BN a partire dal 2000. I picchi nel rapporto, registrati in superficie con circa un anno di ritardo, evidenziano episodi di degassamento magmatico occorsi ai Campi Flegrei (Chiodini et al., 2012). Con i simboli rossi sono evidenziati i campioni di marzo 2019.

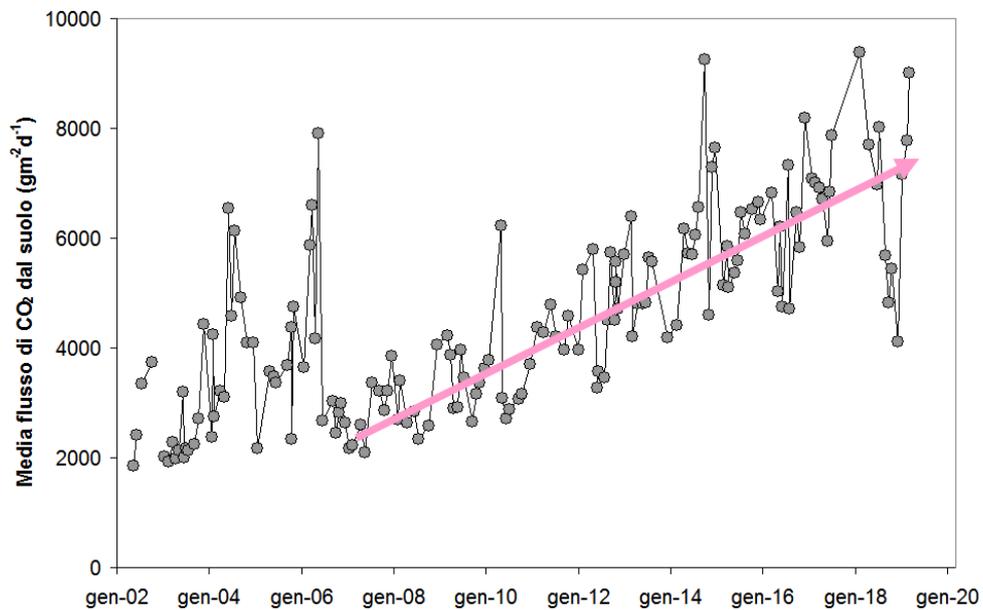


Figura 4.6 – Cronogramma della media dei flussi di CO_2 dal suolo misurati mensilmente su 61 punti fissi nell'area craterica della Solfatara

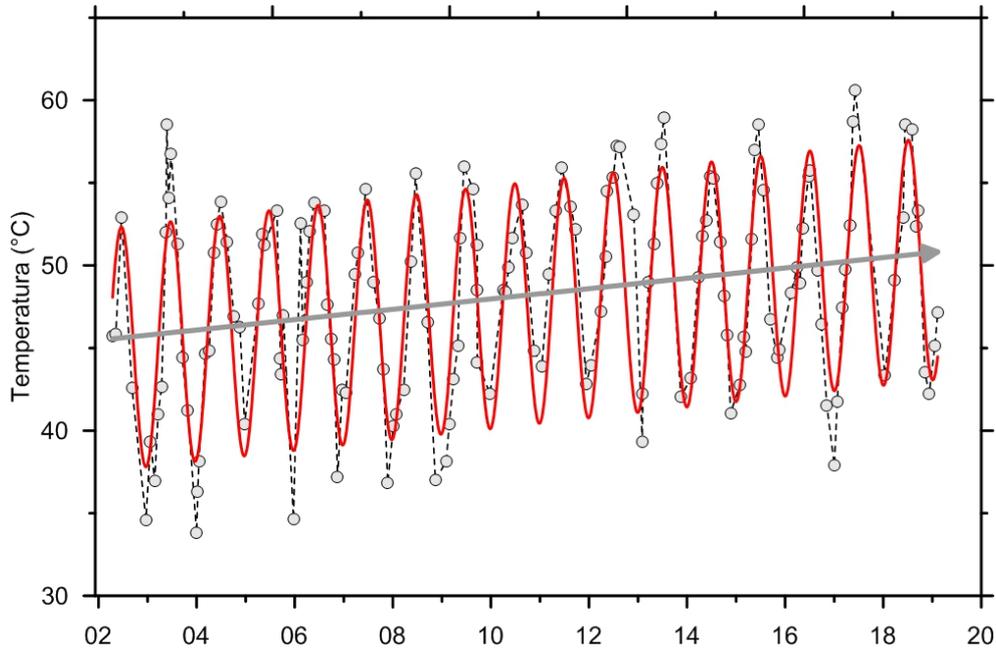


Figura 4.7 - Cronogramma della media delle temperature del suolo (a 10 cm di profondità) misurate su 61 punti fissi nell'area craterica della Solfatara. Va evidenziato l'incremento del valore medio nel periodo 2002-2019 di oltre 5 °C.

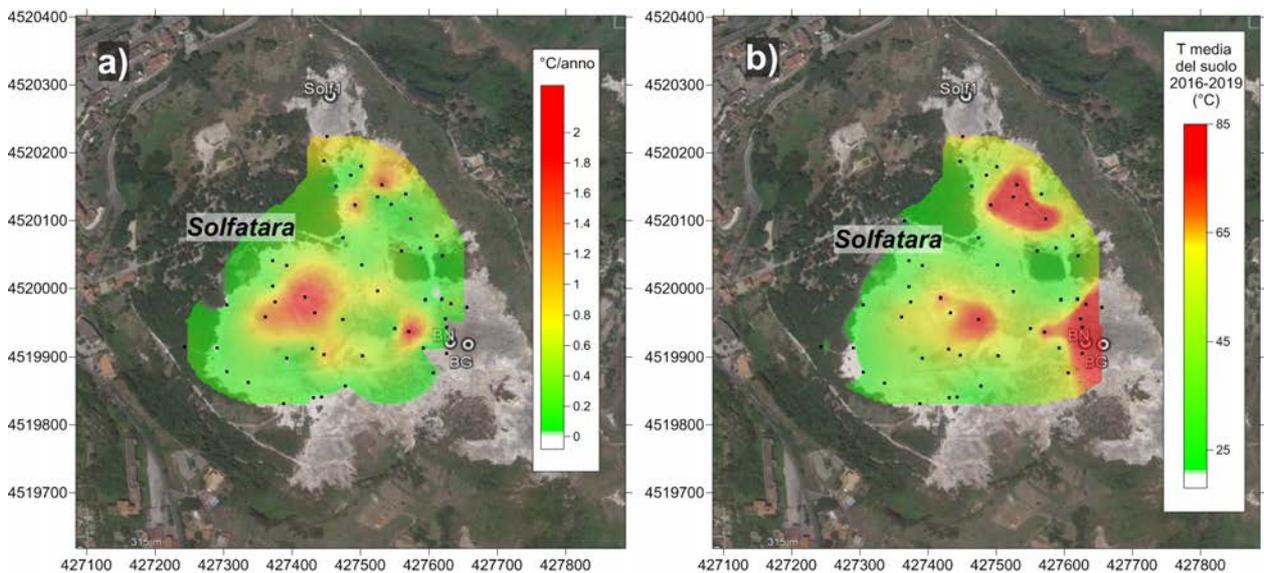


Figura 4.8 – a) Mappa dell'incremento di temperatura in °C/anno calcolato per ogni punto misurato a partire dal 2002. L'incremento di temperatura interessa diffusamente tutta l'area craterica con un massimo nella zona centrale. L'incremento di temperatura non interessa le aree delle fumarole e del bordo del cratere a NE dove le temperature sono vicine al limite fisico di condensazione per i fluidi emessi dalla Solfatara (~95°C). b) Mappa delle temperature dei punti misurati (media dal 2014 al 2019).

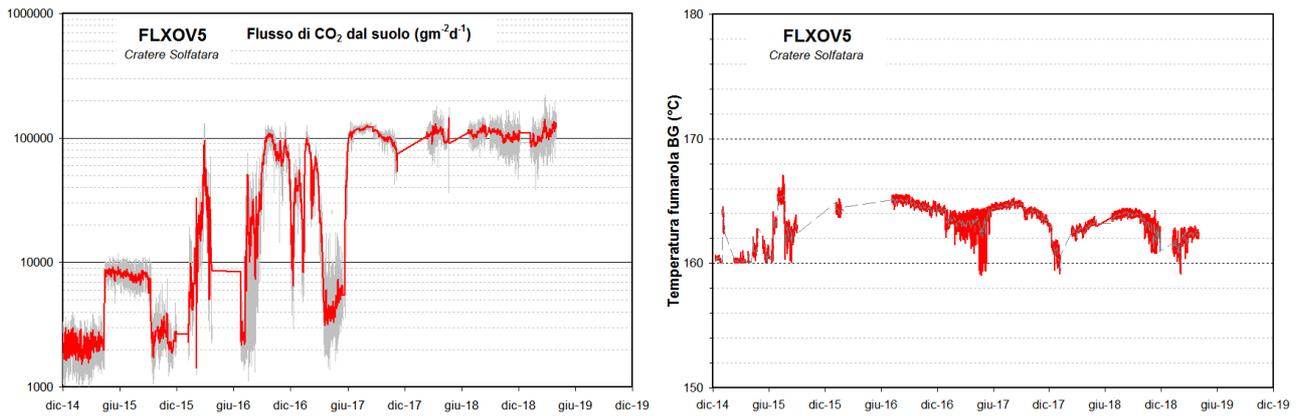


Figura 4.9 - Valori del flusso di CO₂ dal suolo e della temperatura della fumarola BG misurati dalla stazione FLXOV5 installata nel cratere della Solfatara a pochi metri dalla fumarola principale BG. I valori di flusso di CO₂ dal suolo mostrano, in generale, un significativo incremento a partire dal 2015 (la linea rossa si riferisce alle medie giornaliere).



Figura 4.10 - Variazioni macroscopiche dell'area di emissione di Pisciarelli dal 2005.

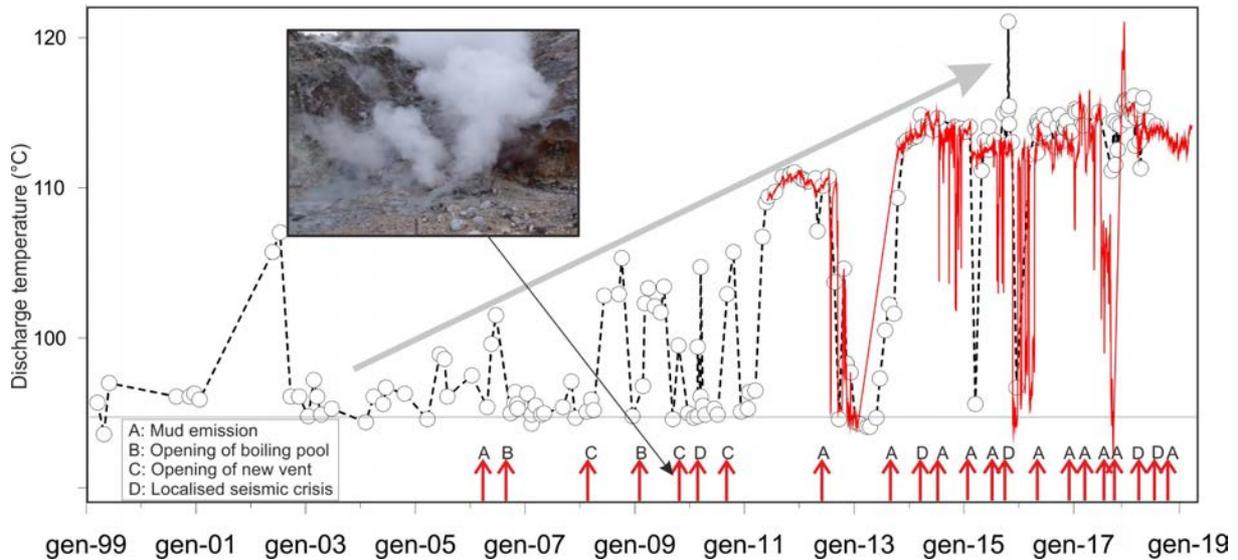


Figura 4.11 - Cronogramma delle temperature (°C) della fumarola di Pisciarelli e dei maggiori eventi occorsi legati all'aumento dell'attività idrotermale (i cerchi si riferiscono a misure discrete riferite al punto di maggior flusso dei gas, la linea rossa si riferisce alle medie giornaliere delle misure in continuo). La temperatura di ~95°C rappresenta la temperatura di ebollizione per i fluidi fumarolici di Pisciarelli. Nella foto è riportata la nuova vigorosa fumarola sorta il 20 dicembre 2009.

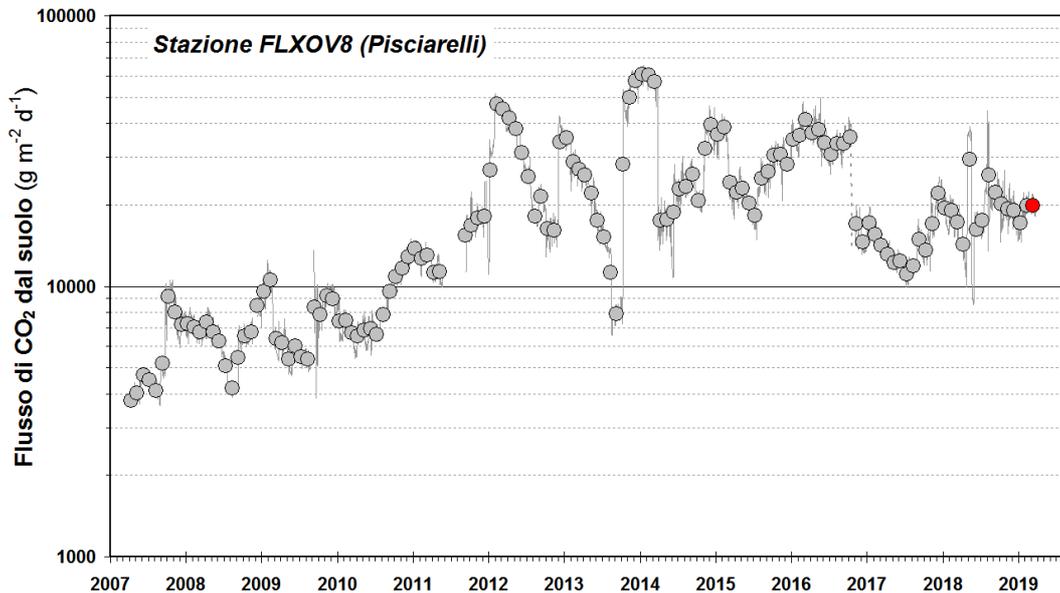


Figura 4.12 - Medie giornaliere (linea) e medie mensili (cerchi) dei flussi di CO₂ misurati a Pisciarelli (recentemente sostituita con una nuova stazione denominata FLXOV8). E' da evidenziare il continuo trend d'aumento nel tempo a partire dal 2007 del flusso CO₂. La media dei flussi relativa al mese di marzo 2019 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 comportato una modifica permanente del sito con valori misurati di flusso di CO₂ più bassi.

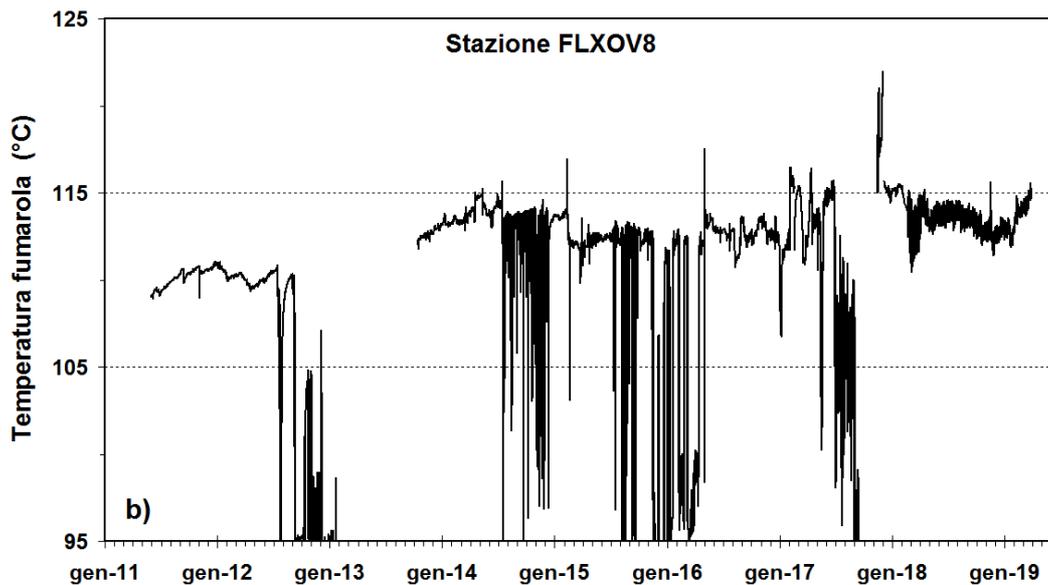


Figura 4.13 - Cronogramma delle temperature della fumarola principale di Pisciarelli registrate in continuo dal 2011.

5. QUADRO DI SINTESI DELLO STATO DEL VULCANO NEL MESE DI MARZO 2019 E VALUTAZIONI

- 1) **SISMOLOGIA:** Nel corso del mese di marzo 2019 sono stati registrati 112 terremoti ($M_{dmax}=2.5$).
- 2) **DEFORMAZIONI:** L'analisi dei trend delle serie temporali GPS da luglio 2017 ha evidenziato che l'area flegrea è interessata da un sollevamento medio di circa 0.7 cm/mese. Il sollevamento registrato alla stazione GPS di RITE è di circa 22.5 cm a partire da gennaio 2016. L'orientazione dei vettori tilt continua a mostrare un pattern coerente con la fase di sollevamento del suolo radiale centrato nell'area della città di Pozzuoli. La sola stazione ECO mostra inclinazioni prevalentemente verso WNW. La campagna gravimetrica di misure relative non evidenzia variazioni di gravità significative.
- 3) **TERMOGRAFIA:** L'analisi delle serie temporali delle aree campionate della Solfatara e Pisciarelli, seppur in presenza di ampie oscillazioni a breve periodo, mostra nel mese di marzo 2019 un andamento sostanzialmente stabile. Anche le misure con termocamere mobili effettuate in diversi punti nell'area dei Campi Flegrei mostrano andamenti stabili.
- 4) **GEOCHIMICA:** La composizione delle fumarole e i parametri monitorati indicano il perdurare dei trend pluriennali di riscaldamento e pressurizzazione del sistema idrotermale. Nel periodo di interesse la temperatura della fumarola FLXOV3 di Pisciarelli ha mostrato un valore medio di circa 115 °C.

Nella Figura 5.1 sono rappresentati i parametri di monitoraggio più indicativi in un confronto temporale a breve e medio termine.

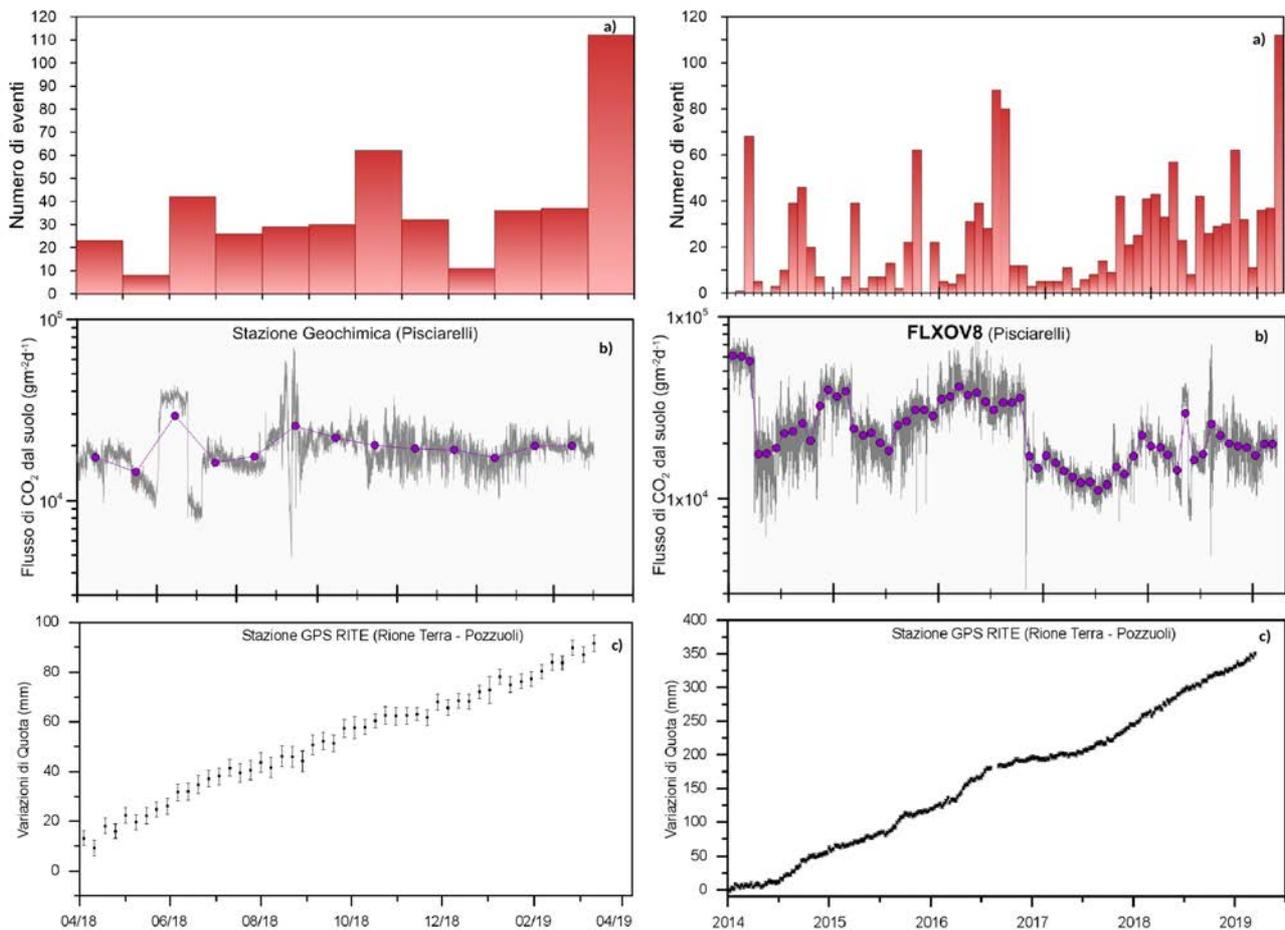


Figura 5.1 – Frequenza di accadimento degli eventi sismici (a), variazioni del flusso di CO₂ alla stazione FLXOV3 di Pisciarelli (b) e andamento delle deformazioni del suolo alla stazione GPS di RITE (c) negli ultimi dodici mesi (a sinistra) e dal 2014 (a destra).

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

N.B. Eventuali variazioni dei parametri monitorati possono comportare una diversa evoluzione degli scenari di pericolosità sopra descritti.

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.
- Silvestri M., Diaz J.A., Marotta E., Dalla Via G., Bellucci Sessa E., Caputo T., Buongiorno M.F., Sansivero F., Musacchio M., Belviso P., Carandente A., Peluso R., Nave R., Vilardo G., Doumaz F. and E. Corrales (2017). The 2016 field campaign of la Solfatara volcano: monitoring methods and instruments for volcanic surveillance. *Rapporti Tecnici INGV*, ISSN 2039-7941, Anno 2017, Numero 380.

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.