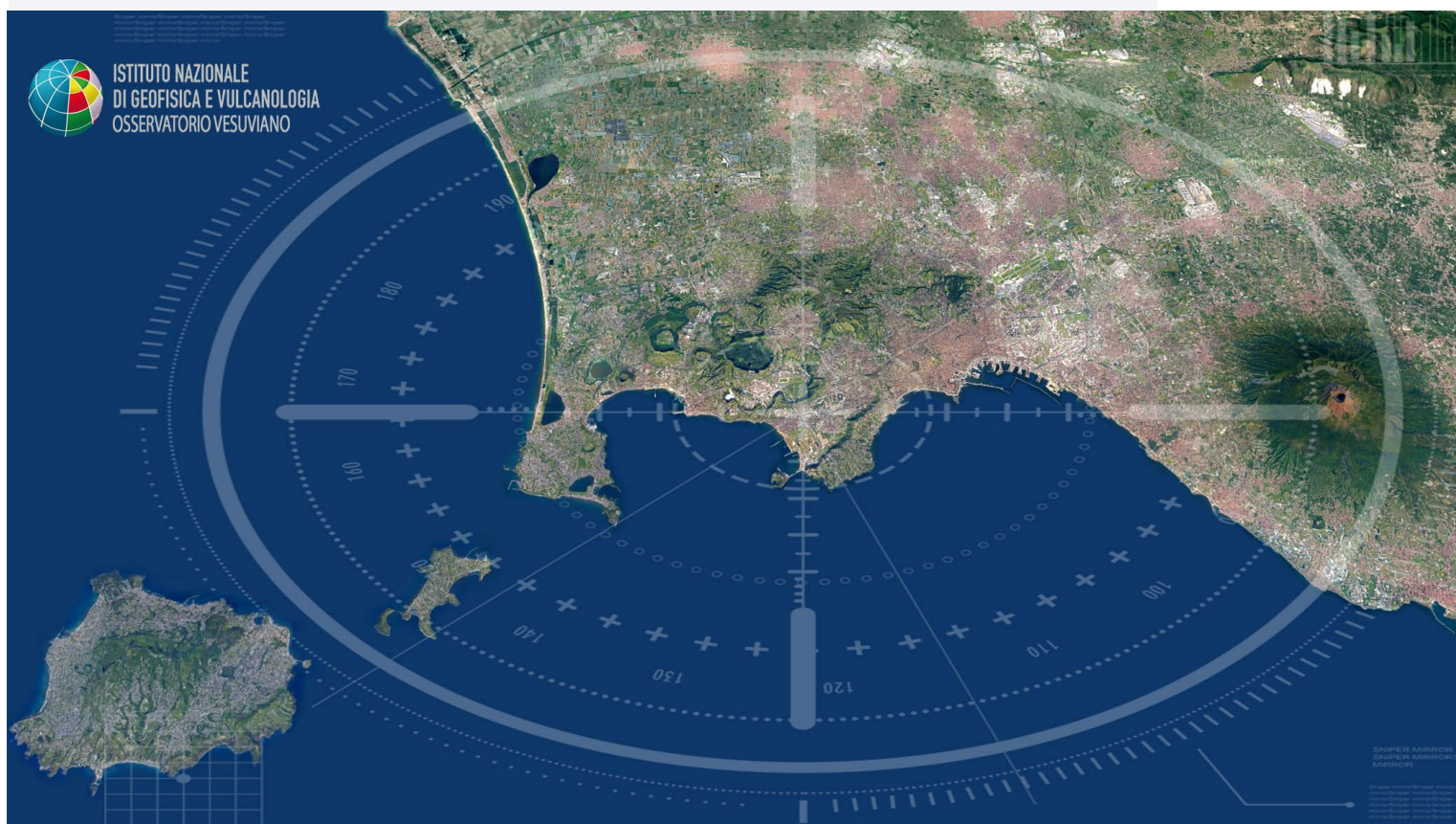




ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

IL MONITORAGGIO DEI VULCANI CAMPANI

2024



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA
SEZIONE DI NAPOLI | OSSERVATORIO VESUVIANO

Editor:

Mauro Antonio Di Vito

Fabio Sansivero

Ottobre 2025

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Sezione di Napoli | OSSERVATORIO VESUVIANO

Via Diocleziano, 328 – 80124 NAPOLI

www.ov.ingv.it

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17366444>

SOMMARIO

INTRODUZIONE.....	1
QUADRO DI SINTESI DELLO STATO DEI VULCANI CAMPANI NEL 2024.....	1
VESUVIO.....	1
CAMPI FLEGREI.....	2
ISCHIA	3
IL SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI E LA SALA DI MONITORAGGIO.....	5
1. Trasmissione e Acquisizione dei Dati della rete sismica.....	5
2 La Sala di Monitoraggio.....	7
VESUVIO	9
1 - MONITORAGGIO SISMOLOGICO	9
1.1 Rete Sismica Permanente	9
1.2 Rete Sismica Mobile.....	15
2 - MONITORAGGIO GEODETICO	17
2.1 Rete GNSS	17
2.2 Rete Tiltmetrica	21
2.3 Rete Mareografica	25
2.4 Rete Gravimetrica	29
2.5 Monitoraggio satellitare con Interferometria SAR.....	31
Sentinel-1A (S-1A) - Analisi multi-temporALE.....	31
3 - MONITORAGGIO VULCANOLOGICO	33
3.1 Rete Permanente Monitoraggio Termico ad Immagine	33
3.2 Monitoraggio Termico con Termocamera Mobile e Termocoppia.....	35
4 - MONITORAGGIO GEOCHIMICO	39
4.1 Monitoraggio Geochimico della Sezione di Napoli "Osservatorio Vesuviano"	39
4.2 Monitoraggio Geochimico della Sezione di Palermo.....	45
CAMPI FLEGREI	51
1 - MONITORAGGIO SISMOLOGICO	51
1.1 Rete Sismica Permanente	51
1.2 Rete Sismica Mobile.....	62
2 - MONITORAGGIO GEODETICO.....	67
2.1 Rete GNSS	67
2.2 Rete Tiltmetrica	75
2.3 Rete Mareografica	80
2.4 Rete Gravimetrica	86

2.5 Rete Dilatometrica.....	90
2.6 Monitoraggio satellitare con Interferometria SAR.....	93
3 - MONITORAGGIO VULCANOLOGICO	101
3.1 Rete Permanente Monitoraggio Termico ad Immagine	101
3.2 Monitoraggio Termico con Termocamera Mobile, Termocoppia e Drone	107
3.3 Comparazione della temperatura superficiale da dati satellitari e Rete TIRNet	114
4 - MONITORAGGIO GEOCHIMICO	123
4.1 Misure di flusso di CO ₂ e temperatura al suolo.....	125
4.2 Composizione chimica delle fumarole dell'area flegrea.....	129
4.3 Variazioni macroscopiche dell'area di Pisciarelli	133
4.4 Potenziamento rete geochimica	136
4.5 Caratterizzazione chimico-fisica delle acque della falda Flegrea	139
4.6 Variazioni osservate dei parametri monitorati della falda.....	142
4.7 Campagne estese di misura del flusso di CO ₂ dal suolo	145
ISCHIA.....	147
1 - MONITORAGGIO SISMOLOGICO	147
1.1 Rete Sismica Permanente	147
1.2 Rete Sismica Mobile.....	149
2 - MONITORAGGIO GEODETICO	152
2.1 Rete GNSS	152
2.2 Rete Tiltmetrica	155
2.3 Rete Gravimetrica	158
2.4 Monitoraggio Satellitare.....	160
3- MONITORAGGIO VULCANOLOGICO	162
3.1 Monitoraggio Termico con Termocamera Mobile e Termocoppia.....	162
4 - MONITORAGGIO GEOCHIMICO	170
4.1 Monitoraggio Geochimico della Sezione di Palermo.....	170
4.2 Attività dell'Osservatorio Vesuviano - Studio e monitoraggio dell'area fumarolizzata di Mt. Cito	174

IL MONITORAGGIO DEI VULCANI CAMPANI 2024

INTRODUZIONE

L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) è componente del Servizio Nazionale di Protezione Civile, ex articolo 6 della legge 24 febbraio 1992 n. 225, ed è Centro di Competenza per i fenomeni sismici, vulcanici e i maremoti per il Dipartimento della Protezione Civile Nazionale (DPC). L'Osservatorio Vesuviano, Sezione di Napoli dell'INGV, ha nei suoi compiti il monitoraggio e la sorveglianza H24/7 delle aree vulcaniche attive campane (Vesuvio, Campi Flegrei e Ischia). Tali attività sono disciplinate dall'Accordo-Quadro (AQ) sottoscritto tra il DPC e l'INGV per il periodo 2022-2025 e sono dettagliate nell'Allegato Tecnico del suddetto AQ.

Il presente Rapporto sul Monitoraggio dei Vulcani Campani rappresenta l'attività svolta dall'Osservatorio Vesuviano e dalle altre Sezioni INGV impegnate nel monitoraggio dell'area vulcanica campana nel 2024. Per una informazione rapida sui principali parametri monitorati, si riporta di seguito il Quadro di Sintesi complessivo.

QUADRO DI SINTESI DELLO STATO DEI VULCANI CAMPANI NEL 2024

VESUVIO

SISMOLOGIA Sono stati registrati 1315 terremoti vulcano-tettonici ($M_{dmax}=3.1\pm 0.3$) di cui 1222 (83%) con $M_d < 1.0$ o non determinata. I terremoti sono generalmente localizzati al di sotto dell'area craterica, con ipocentri fortemente concentrati nei primi due chilometri di profondità.

DEFORMAZIONI DEL SUOLO Le deformazioni del suolo da dati GNSS mostrano una sostanziale stabilità con deformazioni limitate all'area del Gran Cono. Tale campo deformativo è associabile a una dinamica di subsidenza locale dovuta a processi di compattazione o gravitativi, non riconducibili a movimenti di masse magmatiche.

L'analisi dei dati Mareografici evidenzia una debole, generale subsidenza dell'area.

I dati della Rete Tiltmetrica, per caratteristiche intrinseche alla sensibilità strumentale, evidenziano dinamiche locali non sempre correlabili con gli altri parametri monitorati. In particolare, si nota che l'inclinazione dell'edificio vulcanico avviene con modalità diverse in relazione alla posizione delle stazioni.

La campagna Gravimetrica evidenzia modeste variazioni al limite della significatività.

I dati satellitari confermano la generale subsidenza dell'area del Gran Cono.

TERMOGRAFIA L'analisi della serie temporale delle temperature superficiali acquisite dalla telecamera termica evidenzia un lieve aumento dei valori massimi nell'area monitorata nella prima metà del 2024 e un andamento stabile nella seconda metà, seppure interessato da sensibili oscillazioni.

I dati delle campagne di misura con Telecamere Termiche Mobili (TTM) e termocoppie rigide non mostrano significative variazioni.

GEOCHIMICA Le indicazioni fornite dalla geochimica dei fluidi sono di una sostanziale stabilità dei trend precedentemente osservati, con variazioni di lieve entità che rientrano in un andamento pluriennale di diminuzione dell'attività idrotermale nell'area craterica del Vesuvio.

I dati geochimici ottenuti dalle attività di sorveglianza dell'acquifero del Vesuvio forniscono informazioni indicative di un sistema vulcanico la cui attività non è interessata da variazioni di rilievo.

CAMPI FLEGREI

SISMOLOGIA Ai Campi Flegrei nel 2024 sono stati registrati 6744 terremoti ($M_{dmax} = 4.4 \pm 0.3$) di cui 6114 (91%) con $M_d < 1.0$ o non determinabile. È stato possibile localizzare 4896 eventi, la maggior parte dei quali ricade nell'area compresa tra Astroni, Solfatara-Pisciarelli-Agnano, Pozzuoli, il Golfo di Pozzuoli e Monte Nuovo, con profondità prevalentemente concentrate nei primi 3 km e profondità massime fino a circa 5 km. A maggio e ad agosto sono stati identificati alcuni piccoli eventi ibridi con caratteristiche simili, localizzati nella zona di Accademia a profondità superficiali. Un'analisi di dettaglio ha evidenziato che i fluidi coinvolti sono di natura idrotermale.

DEFORMAZIONI DEL SUOLO Dalla metà di aprile a luglio 2024 il valore medio della velocità di sollevamento nell'area di massima deformazione è stato di circa 20 ± 3 mm/mese. Dagli inizi di agosto il valore medio della velocità di sollevamento nell'area di massima deformazione è stata di circa 10 ± 3 mm/mese alla stazione GNSS di RITE

Il sollevamento registrato alla stazione GNSS di RITE è di circa 136.5 cm a partire da novembre 2005, di cui circa 18.5 cm nel 2024.

Tale andamento è visibile anche nel campo tiltmetrico che evidenzia una geometria quasi radiale della deformazione con un andamento prevalentemente polarizzato lungo le direzioni NNW e SE.

L'evoluzione delle deformazioni del suolo nel 2024 è anche confermata dalle analisi mareografiche e di telerilevamento satellitare che mostrano valori e pattern deformativi confrontabili con quelli GNSS.

Le campagne di misure gravimetriche relative evidenziano che il settore centrale e quello a est di Pozzuoli sono tipicamente soggetti alle variazioni più significative del campo gravimetrico.

TERMOGRAFIA L'analisi dei dati delle telecamere termiche permanenti mostra un certo dinamismo dei valori delle temperature massime superficiali, con andamenti differenti da stazione a stazione e oscillazioni di varia ampiezza e periodo, a volte molto marcate. Da segnalare un consistente aumento delle temperature massime della stazione SF1 in Solfatara nella seconda metà dell'anno, con picchi che hanno superato di circa 50°C i valori registrati nei mesi precedenti. Le temperature registrate da SF1 ritornano alla normalità nel mese di dicembre assumendo valori paragonabili a quelli osservati nella prima metà del 2024. Comportamento comune a gran parte dei siti monitorati è la diminuzione dei valori di temperatura nel mese di dicembre.

I rilievi delle telecamere mobili e dei dati satellitari mostrano un andamento sostanzialmente stabile seppur con oscillazioni a vario periodo.

GEOCHIMICA Le attività di sorveglianza geochimica continuano a evidenziare significative variazioni dell'attività vulcanica con particolare riferimento alle aree di Solfatara e Pisciarelli. Tali variazioni, osservate già a partire dai primi anni 2000 sono verosimilmente causate da notevoli input di fluidi magmatici nel sistema di alimentazione profondo, coinvolgono l'intero sistema idrotermale inducendo una modifica permanente del sistema. Ciò è testimoniato da:

- evidenze di riscaldamento e pressurizzazione delle parti più superficiali, ma anche profonde del sistema idrotermale;
- incremento della temperatura del suolo misurata in punti fissi della Solfatara e di Pisciarelli cui corrisponde un incremento del rilascio energetico dall'area;
- generale aumento dei flussi fumarolici, oltre che dall'alta percentuale di componente magmatica nei fluidi emessi.

Inoltre, nel 2024 il flusso di CO₂ dal suolo dell'intera area di degassamento è stato stimato, sulla base delle misure mensili, in circa 5000 t/d, valori paragonabili al flusso medio di CO₂ nel plume di vulcani attivi a degassamento persistente.

ISCHIA

SISMOLOGIA Nel corso del 2024 sono stati registrati 3 terremoti ($M_{dmax} = 1.8 \pm 0.3$).

DEFORMAZIONI DEL SUOLO L'analisi dei dati GNSS mostra una generale subsidenza dell'isola con valori più elevati nel settore centro-meridionale.

Le direzioni di inclinazione del suolo mostrano un pattern di inclinazione prevalente verso Nord.

Modeste variazioni gravimetriche positive (circa 30 μ Gal) si osservano nel settore sud del Monte Epomeo, probabilmente correlate alle variazioni nella circolazione del sistema idrotermale.

I dati satellitari evidenziano una subsidenza dell'area nord-occidentale a ridosso del Monte Epomeo.

TERMOGRAFIA Le attività di Monitoraggio Termico con Telecamera Mobile, Termocoppia e Drone restituiscono un quadro di sostanziale stabilità dei parametri misurati.

GEOCHIMICA I dati geochimici acquisiti non hanno mostrato variazioni rilevanti ricollegabili a modifiche dell'attività vulcanica. La stabilità nella composizione chimica dei fluidi campionati riflette la stabilità del sistema geotermico.

IL SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI E LA SALA DI MONITORAGGIO

R. Peluso¹, G. Scarpato¹, A. Benincasa¹, G. Borriello¹, P. Cantiello¹, W. De Cesare¹,
A. Di Filippo¹, A. M. Esposito¹, F. Liguoro¹, C. Martino¹, M. Papaccio¹, V. Torello¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

1. TRASMISSIONE E ACQUISIZIONE DEI DATI DELLA RETE SISMICA

Il Sistema di Monitoraggio in continuo dei vulcani campani (Vesuvio, Campi Flegrei e Ischia) è gestito dalla Sezione di Napoli “Osservatorio Vesuviano” dell’INGV ed è basato su reti multiparametriche terrestri e marine. È un sistema complesso e articolato, che utilizza varie metodologie per la trasmissione dei segnali in tempo reale e anche con scarico dati *on-demand*.

Le diverse reti utilizzano sistemi di trasmissione punto-punto o con nodi di smistamento definiti sulla base della logistica di ogni sito. Attualmente, la principale modalità di trasmissione sfrutta una dorsale Wi-Fi proprietaria dell’Osservatorio Vesuviano (Hiperlan a 5.0 e 2.4 GHz) configurata con nodi ridondanti che garantisce flessibilità e un elevato flusso dati potendo convogliare su un singolo canale i segnali di apparati diversi. Altre modalità di trasmissione prevedono l’impiego di connessioni GSM e LTE/4G, linee telefoniche ADSL o apparati radio UHF (analogici e digitali).

L’acquisizione dei segnali trasmessi da tutte le stazioni delle reti multiparametriche viene effettuata presso la sede dell’Osservatorio Vesuviano di Napoli. Ogni tipologia di rete utilizza sistemi basati su server locali e software proprietari o sviluppati dal personale dell’Osservatorio Vesuviano per le specifiche necessità di acquisizione, analisi ed archiviazione dei dati. Si tratta generalmente di architetture basate su server ridondanti per l’acquisizione dei dati *raw* e accessi protetti per i successivi trattamenti e analisi.

In alcuni casi, come per la Rete Sismica, l’acquisizione è più complessa e richiede sistemi di calcolo e pre-analisi dedicati.

Tra tutte le reti di monitoraggio, quella sismica si differenzia per tipologia delle stazioni remote, volume di dati trasmessi, complessità del sistema di acquisizione, condivisione con altre Sezioni monitoranti dell’INGV (in particolare con l’Osservatorio Nazionale Terremoti) e necessità di rendere tutti i segnali fruibili in continuo per le esigenze delle attività di sorveglianza H24/7, definite nella Convenzione INGV-DPC, nella Sala di Monitoraggio.

L’acquisizione dati della Rete Sismica Permanente dell’Osservatorio Vesuviano è basata sul sistema *Earthworm* sviluppato presso l’USGS. *Earthworm* è un sistema modulare

che permette di distribuire l'acquisizione e l'analisi dei dati sismici su più macchine anche geograficamente separate. I singoli "moduli" del sistema sono dei piccoli programmi estremamente specializzati che svolgono un unico compito: esistono moduli per l'acquisizione, per lo scambio dati, per il *picking* degli eventi sismici, per la localizzazione automatica, etc.

All'Osservatorio Vesuviano viene utilizzata questa estrema flessibilità del sistema *Earthworm* per creare un'acquisizione cosiddetta *multi-tier* con più siti di acquisizione distribuiti sul territorio. I siti periferici sono poi collegati alla Sede dell'Osservatorio tramite varie *backbone*, che sfruttano tecnologie diverse: UHF, ADSL, LTE/4G, Wi-Fi a 2.4 e 5.0 GHz. Queste *backbone* sono spesso ridondate in modo da garantire la trasmissione anche nel caso una di esse dovesse cadere.

Questo modello di acquisizione distribuita *multi-tier* garantisce che i dati sismici siano correttamente acquisiti anche nel caso di caduta contemporanea di più canali della *backbone* che collega il sito remoto alla Sede dell'Osservatorio. Infatti, i dati sono comunque acquisiti nei sistemi periferici e trasmessi quando la connessione ritorna attiva.

Per garantire un ulteriore livello di robustezza ai siti remoti, questi sono spesso dotati di sistemi di acquisizione ridondate, sfruttando due macchine in configurazione *master/slave*: quando una delle due dovesse fallire per qualche ragione, la compagna è in grado di prendere il controllo dell'acquisizione nel giro di pochi minuti.

Nel corso del 2023 è iniziato un graduale processo di modifica dei sistemi di acquisizione della rete sismica, passando da un sistema completamente basato su *Earthworm* ad uno basato su *Seiscomp/Seedlink*. *Seiscomp* è un sistema di gestione di dati sismici in tempo reale per alcuni aspetti simile ad *Earthworm*, ma più moderno come concezione ed implementazione. Il sistema è stato sviluppato al GFZ di Potsdam dallo spinoff Gempa ed è incentrato sull'utilizzo del server *seedlink*, che è in grado di acquisire e distribuire dati sismici in tempo reale utilizzando dei plugin appositi.

Tutti i siti di acquisizione remota trasmettono i dati sismici alla Sede dell'Osservatorio situata in Via Diocleziano a Fuorigrotta (Napoli). Per la sua posizione all'interno della caldera dei Campi Flegrei, la Sede funziona, oltre che da accentratore di dati, anche da sito di acquisizione per tutte le stazioni dei Campi Flegrei connesse tramite ponti Wi-Fi e di tutte quelle stazioni che trasmettono con sistemi isolati, come ad esempio la stazione all'interno dell'Accademia Aeronautica di Pozzuoli che trasmette su una linea ADSL o tutte le stazioni più recenti della Rete Mobile installata ad Ischia che trasmettono tramite apparati LTE.

Il precedente sistema di acquisizione basato su macchine fisiche in Alta Affidabilità è stato sostituito con un sistema di macchine virtuali basato sull'hypervisor Xen, un sistema estremamente leggero in cui le macchine virtuali possono condividere parte dell'hardware e del potere di calcolo con la macchina ospitante. È stato messo in opera un cluster di quattro macchine fisiche collegate a due SAN iSCSI che provvedono a fornire lo spazio disco per le macchine virtuali. Il cluster è basato sulla medesima tecnologia (Pacemaker+Corosync) con la quale era stato implementato il precedente sistema. La differenza fondamentale è che, in questo caso, le risorse distribuite dal cluster non sono più i singoli servizi ma le macchine virtuali stesse che potevano essere spostate da un server fisico ad un altro in maniera automatica.

Per mantenere coerenza con il precedente sistema, le macchine virtuali hanno mantenuto il medesimo nome e la funzione principale che gli era stata affidata nel sistema a tre macchine. Tutto il resto del sistema, ove possibile, è stato trasformato da macchine fisiche a macchine virtuali conservando la funzione.

Il resto dei sistemi è basato su un insieme di macchine fisiche e virtuali, ognuna con un compito diverso. In particolare, sono *server* fisici i NAS da 80TB che corrispondono allo *storage* di terzo livello, essendo il primo le macchine di acquisizione ed il secondo il NAS da 1TB usato come spazio temporaneo e da dove il personale turnista accede ai dati sismici durante i Turni di Sorveglianza.

2 LA SALA DI MONITORAGGIO

La Sala di Monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano (Figura 2.1) è l'infrastruttura dove vengono convogliati i segnali acquisiti da tutte le Reti di Monitoraggio in continuo dei vulcani campani e dalla Rete Sismica di Stromboli. Qui subiscono una elaborazione preliminare e vengono visualizzati con modalità concepite specificamente per gli scopi della sorveglianza vulcanica. Inoltre, in Sala sono presenti tutti i sistemi che consentono di comunicare con il DPC, con la Sala Sismica dell'Osservatorio Nazionale Terremoti (ONT) della sede di Roma e con altre istituzioni. I sistemi della Sala di Monitoraggio sono dotati di impiantistica (UPS, gruppi di continuità) in grado di garantire l'operatività 24h anche in caso di interruzione dell'erogazione di energia elettrica.

I sistemi di visualizzazione comprendono:

- 64 monitor con segnali sismici in tempo reale visualizzati mediante l'uso del software *WinDrum*; nel corso dell'anno una parte dei monitor da 19 pollici 4/3 è stata sostituita con monitor più grandi da 42" installati in verticale.
- una struttura attrezzata con un Vidiwall (4 schermi da 46") per la visualizzazione contemporanea degli ipocentri dei terremoti localizzati dal sistema automatico e di quelli rivisti sulle tre aree vulcaniche monitorate;
- 16 schermi per la visualizzazione di segnali geofisici, geochimici, termici e per la visualizzazione dello stato della Rete Sismica;
- un monitor da 50" per la visualizzazione in tempo reale degli epicentri localizzati dall'Osservatorio Nazionale Terremoti (ONT) sul territorio nazionale;
- 5 monitor ausiliari da 52" per la visualizzazione di segnali deformativi, di temperatura, geochimici e di altri parametri di tipo "lento" che concorrono al monitoraggio dei vulcani campani.

I monitor con i segnali sismici sono raggruppati secondo 5 aree geografiche per un immediato confronto dei segnali: Vesuvio, Campi Flegrei, Ischia, Regione Campania, Stromboli. I software che gestiscono i monitor possiedono delle funzionalità che permettono al personale in turno di sorveglianza di identificare eventi sismici, di visualizzare la stessa porzione di traccia sismica su più monitor e di calcolare rapidamente la magnitudo-durata di eventi locali.

I sistemi di analisi automatica operativi in Sala consentono il rilevamento e la localizzazione degli eventi sismici locali. Tali sistemi sono integrati in quelli di visualizzazione consentendo una visione globale aggiornata in tempo reale delle fenomenologie geofisiche in atto. Nella Sala sono presenti, inoltre, i sistemi software

che consentono l'analisi manuale degli eventi sismici e l'invio dei Comunicati al DPC e agli altri enti preposti.

In Sala sono presenti anche le postazioni per l'elaborazione preliminare dei dati GPS, tiltmetrici e mareometrici. Sono inoltre visualizzati i dati geochimici in continuo come flussi di CO₂ e di Rn.

Tutti i sistemi hardware e software che gestiscono le attività della Sala di Monitoraggio sono costantemente verificati per garantirne il corretto funzionamento e aggiornati in funzione delle necessità di acquisizione e analisi dei dati.



Figura 2.1 - La Sala di Monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano

È continuata l'implementazione della sala di ridondanza nella sede di Ercolano dell'Osservatorio Vesuviano. A tal scopo la sede di servizio è stata dotata di sistemi di energia ridondati (UPS e gruppo elettrogeno) e sono stati creati un mini centro di calcolo ed un mini centro stella, al servizio della nuova sala. Una stanza della sede di servizio è stata rinnovata e dotata di tutti i collegamenti sia alla rete elettrica protetta che alla nuova rete locale. La stanza è stata attrezzata con 10 nuovi monitor e 7 PC desktop per la gestione degli eventi sismici. Sono stati anche acquistati 5 server installati nel mini



Figura 2.2 - La Sala di Monitoraggio di ridondanza alla Sede Storica dell'Osservatorio Vesuviano durante la sua installazione.

centro di calcolo e verranno utilizzati come cluster *vmware* mentre altri due server che erano stati acquistati sul progetto PRESERVE verranno utilizzati, in parallelo, come cluster *Proxmox*. Su queste macchine verrà implementato un sistema di acquisizione parallelo a quello della sede centrale dell'Osservatorio Vesuviano.

VESUVIO

1 - MONITORAGGIO SISMOLOGICO

P. Ricciolino¹, M. Orazi¹, D. Galluzzo¹, E. Bellucci Sessa¹, A. Benincasa¹, A. Bobbio¹, G. Borriello¹, C. Buonocunto¹, A. Caputo¹, A. Carandente¹, V. Convertito¹, P. Cusano¹, G. Dalla Via¹, D. Delle Donne¹, A. Di Filippo¹, R. Esposito¹, G. Gaudiosi¹, F. Liguoro¹, D. Lo Bascio¹, R. Manzo¹, S. Morabito¹, R. Nappi¹, L. Nardone¹, A. Tramelli¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

Il monitoraggio sismologico del Vesuvio è svolto mediante l'uso congiunto di una Rete Sismica Permanente e una Rete Sismica Mobile. Tali reti consentono di individuare e classificare transienti sismici legati a terremoti o altri fenomeni naturali e artificiali.

1.1 RETE SISMICA PERMANENTE

La Rete Permanente di monitoraggio sismico del Vesuvio conta 18 siti di installazione (Figura 1.1.1, Tabella 1.1.1; La stazione OVO presso la Sede Storica è attualmente duplicata: analogica e digitale; le stazioni VTVA e VOVO non sono funzionanti per operazioni complesse da eseguire sui sensori da pozzo; la stazione VARP, gravemente danneggiata, è stata dismessa anche in accordo con l'Ente Parco del Vesuvio, quell'area sarà coperta da una nuova installazione la cui posizione è in corso di determinazione.

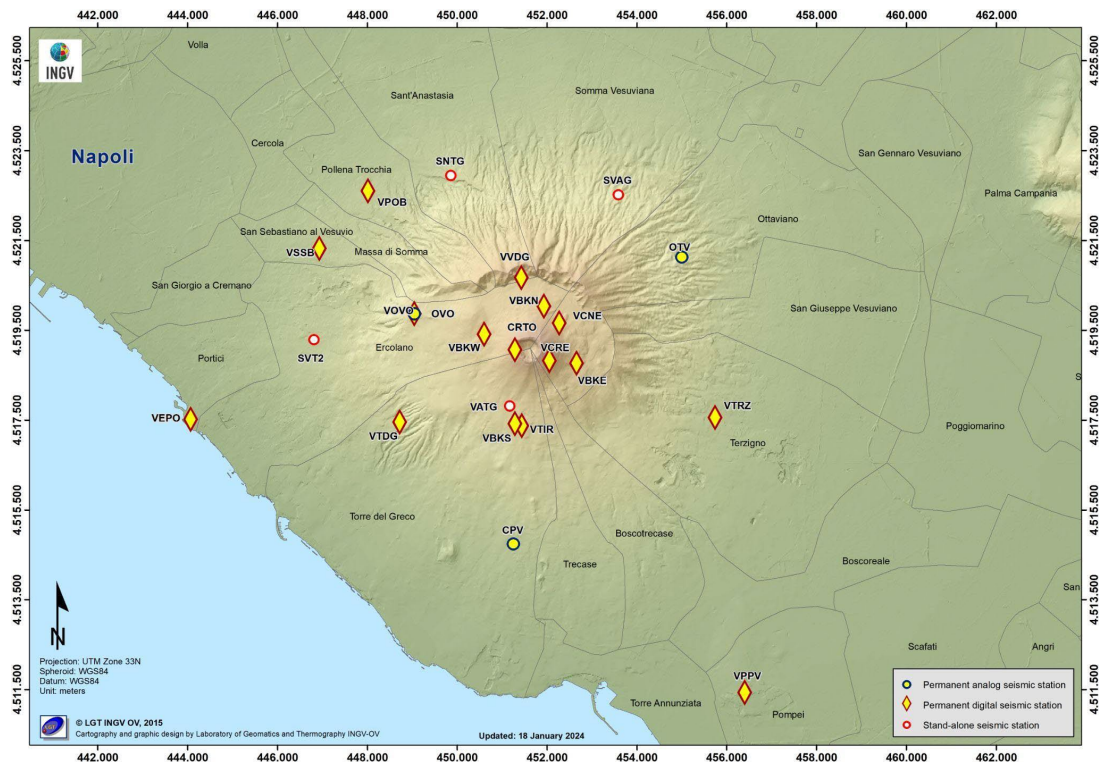


Figura 1.1.1 – Reti Sismiche del Vesuvio.

In ogni sito, secondo i casi, possono insistere più tipologie di stazioni e/o di sensori in base alle logiche di molteplicità di sensori o di ridondanza strumentale.

La rete è stata potenziata topologicamente e strumentalmente grazie al Progetto infrastrutturale PON “GRINT” finanziato dalla UE. Una parte di questo potenziamento ha visto la conversione di stazioni della Rete Mobile in Rete Permanente. Sebbene il PON in questione sia terminato il processo di ammodernamento e potenziamento strumentale è ancora in corso su altri finanziamenti della Regione Campania.

Ad oggi sulla rete sono presenti 6 stazioni di tipo analogico equipaggiate con sensori da 1Hz di cui 4 utilizzano sensori a tre componenti mentre le rimanenti sono a singola componente. Queste stazioni saranno presto dismesse in favore di stazioni digitali.

Le stazioni di tipo digitale sono 14 e sono basate sia sull’acquisitore GILDA progettato e prodotto dall’INGV Osservatorio Vesuviano che su strumentazione digitale della Guralp.

I sensori che equipaggiano le stazioni digitali sono i seguenti: 5 velocimetri a larga banda (0.016-50 Hz), 6 velocimetri a banda molto larga (0.0083-50Hz), 1 velocimetro a banda ultra larga (0.0041-50Hz), un velocimetro a larga banda Lennartz 3D/20s.

I sensori accelerometrici installati sono 6 tutti con fondo scala a 1g. Infine sono installati 5 microfoni infrasonici Infracyrus (progettati e prodotti dall’INGV Osservatorio Vesuviano) e un microfono broadband (0.1-50Hz) della Chaparral.

La Tabella 1.1.1 sintetizza, per ogni sito, il tipo di sensore e di acquisitore presente.

Tabella 1.1.1 – Stato della Rete Sismica Permanente del Vesuvio.

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
CMDT non operativa	40.7794N 14.4087E 118m	Camaldoli della Torre		Guralp CMG-40T 60s	GILDA	ADSL
CPV	40.7822N 14.4220E 181m	Cappella Vecchia	18/2/1992	Mark L4-3D	Analogica	Radio UHF analogica
CRTO	40.8212N 14.4223E 1205.5* m	Cratere Vesuvio Ovest	Settembre 2006	Guralp CMG-40T 60s, Infracyrus	GILDA	Wi-Fi
OTV	40.8399N 14.4662E 413.5* m	Ottaviano	20/3/1996	Mark-L4C	Analogica	Radio UHF analogica
OVO (duplicata: analogica e digitale)	40.8272N 14.3965E 584m	Sede Storica	Novembre 1971 15/3/2010	3 Geotech S13 Nanometrics Trillium 240s /1 Sensore Infrasonico Chaparral 25V	Analogica GILDA	Radio UHF analogica Wi-Fi /Fibra /LTE
VOVO (pozzo) non operativa	40.8283N 14.3956E 493m	Sede Storica	11/3/2015	Guralp 3TB/vel120s 5TB/accelerometro	2 GILDA	Intranet e Wi-Fi

PPV	40.7535N 14.4836E 30m	Pompei Scavi	2/3/2004	Mark-L4C	Analogica	Radio UHF analogica
SSB	40.8416N 14.3704E 176m	San Sebastian o	Febbraio 1993	Mark L4-3D	Analogica	Radio UHF analogica
TDG non operativa	40.8065N 14.3920E 305m	Torre Del Greco	1995 7/6/2016	Guralp CMG-40T 60s	GILDA	Radio UHF digitale
VBKE BKE	40.8185N 14.4386E 913* m	Vesuvio Bunker Est	08/10/202 1 Febbraio 1992	Guralp 3T 120s Guralp Fortis 3 Geotech S13	Guralp Affinity Analogica	LTE / WiFi Radio UHF analogica
VBKN	40.8300N 14.4299E 1004* m	Vesuvio Bunker Nord	12/5/2009	Guralp CMG-40T 60s, Infracyrus	GILDA	Wi-Fi
VBKS	40.8064N 14.4224E 645* m	Vesuvio Bunker Sud	06/06/202 3	Guralp 3ESPC 120s Guralp Fortis	Guralp Affinity	Wi-Fi
VBKW	40.8242N 14.4142E 874.5* m	Vesuvio Bunker Ovest	27/03/202 3	Guralp 3ESPC 120s Guralp Fortis	Guralp Affinity	Wi-Fi
VCNE	40.8266N 14.4339E 1006.5* m	Vesuvio Cratere Nord Est	19/11/201 4	Guralp 3T 120s Guralp Fortis	Guralp Affinity	Wi-Fi
VCRE	40.8190N 14.4314E 1175.5* m	Vesuvio Cratere Est	15/10/200 8	Guralp CMG-40T 60s, Infracyrus	GILDA	Wi-Fi
VEPO	40.8047N 14.3367E 2m	Vesuvio Enea Portici	11/9/2014	Lennartz 3D/20s Episensor ES-T	2 GILDA	ADSL
VPOB	40.8528N 14.3832E 221* mm	Pollena	2000 9/7/2014	Guralp 3T 120s Guralp Fortis	Guralp Affinity	Radio UHF digitale
VTIR	40.8059N 14.4242E 658* m	Vesuvio Località Tirone	19/6/2009	Guralp CMG-40T 60s, Infracyrus	GILDA	Wi-Fi
VTRZ	40.8076N 14.4753E 225* m	Terzigno	Agosto 1994	Guralp 3T 120s Guralp Fortis	Guralp Affinity	Wi-Fi
VTVA non operativa	40.7971N 14.4396E 366m	Trecase Ingresso Forestale	18/12/201 4	6 Guralp VSP Flute (classe 40T 60s)	5 GILDA	ADSL/UMTS
VVDG	40.8356N 14.4239E 855m	Vesuvio Valle del Gigante	7/9/2009	Guralp CMG-40T 60s, Infracyrus	GILDA	Wi-Fi

Nota: le quote indicate con (*) riportano l'altezza rispetto al geoide WGS84.

Nel corso del 2024 sono stati registrati un totale di 1416 eventi locali, ripartiti nelle diverse tipologie riportate in Figura 1.1.2.

I segnali sismici transienti registrati nell’area vesuviana e non classificabili come terremoti sono legati alle attività antropiche locali e identificati, in genere, come esplosioni di natura artificiale. Vi sono poi segnali attribuibili a frane, che interessano generalmente l’area craterica o il bordo calderico del Somma. Altri tipi di segnali, dovuti ad attività sismica non rientrante nelle precedenti categorie o a fenomeni non sismici (es. tuoni e ad altre attività antropiche), sono compresi nella tipologia “ALTRO”.

Per quanto riguarda l’attività sismica naturale sono stati registrati 1315 terremoti vulcano-tettonici ($M_{dmax} = 3.1 \pm 0.3$) (Tabella 1.1.2 e Figura 1.1.3).

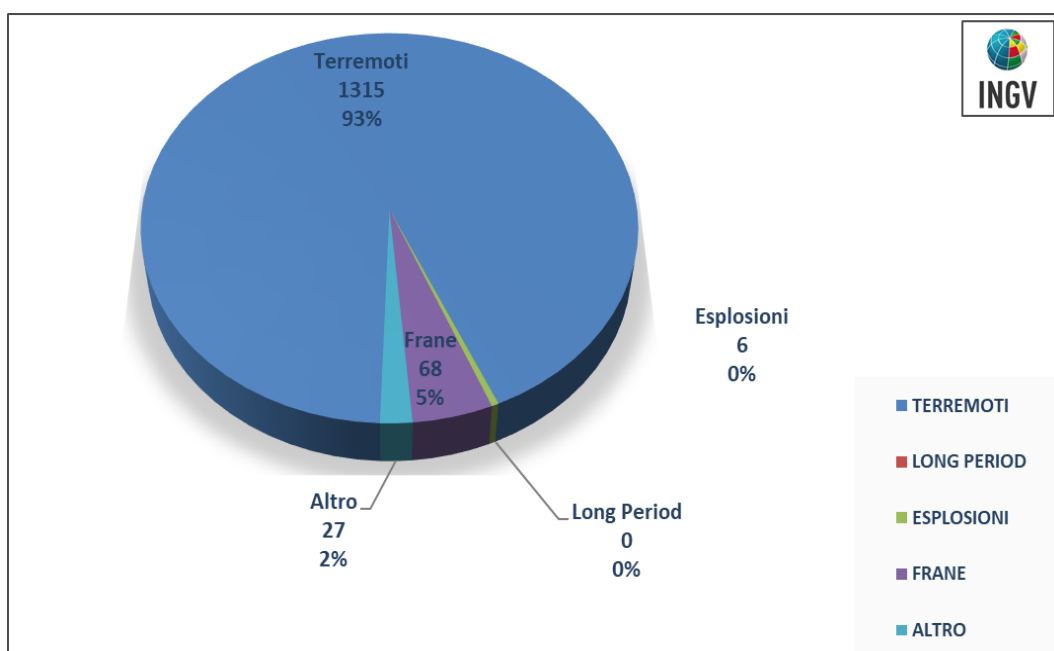


Figura 1.1.2 – Distribuzione percentuale degli eventi per tipologia nel 2024. Le esplosioni riportate sono tutte di origine artificiale.

È stato possibile determinare i parametri ipocentrali di 1123 eventi. Il numero totale di eventi registrati non si discosta significativamente da quello medio degli anni precedenti (Figura 1.1.3).

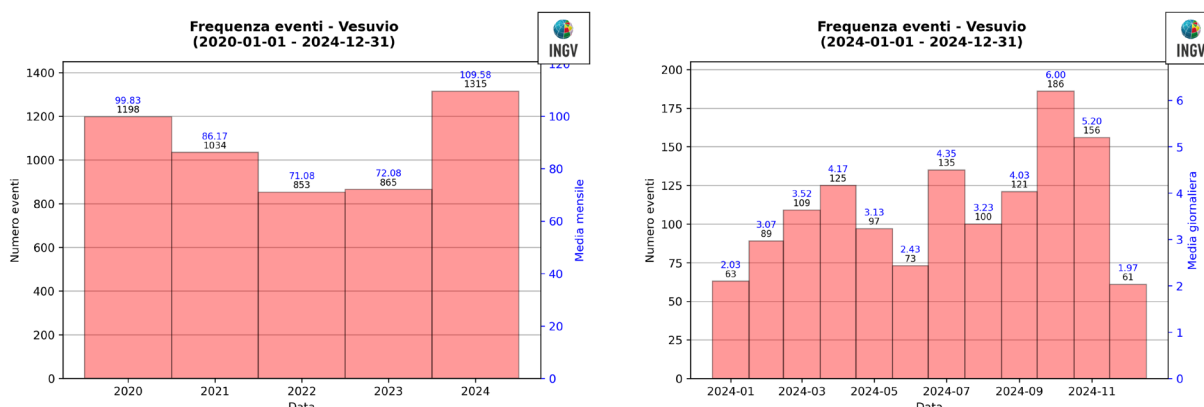


Figura 1.1.3 – Frequenza di accadimento dei terremoti vesuviani nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del 2024 (a destra).

I terremoti sono generalmente localizzati al di sotto dell'area craterica, con ipocentri fortemente concentrati nei primi due chilometri di profondità ed una profondità massima di circa 3 km (Figure 1.1.4 e 1.1.5).

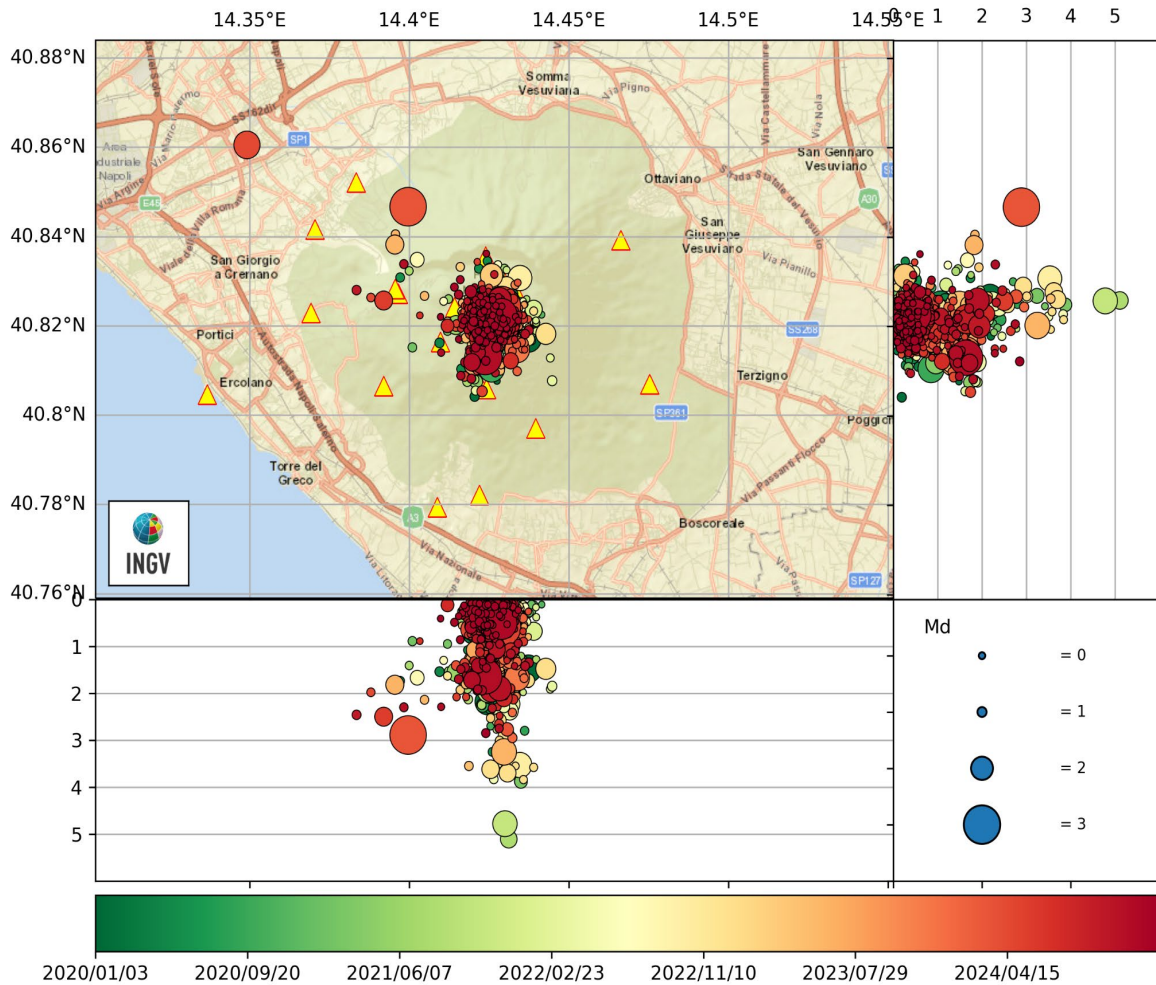


Figura 1.1.4 – Localizzazione degli ipocentri nell'area vesuviana dal 01/01/2020 al 31/12/2024.

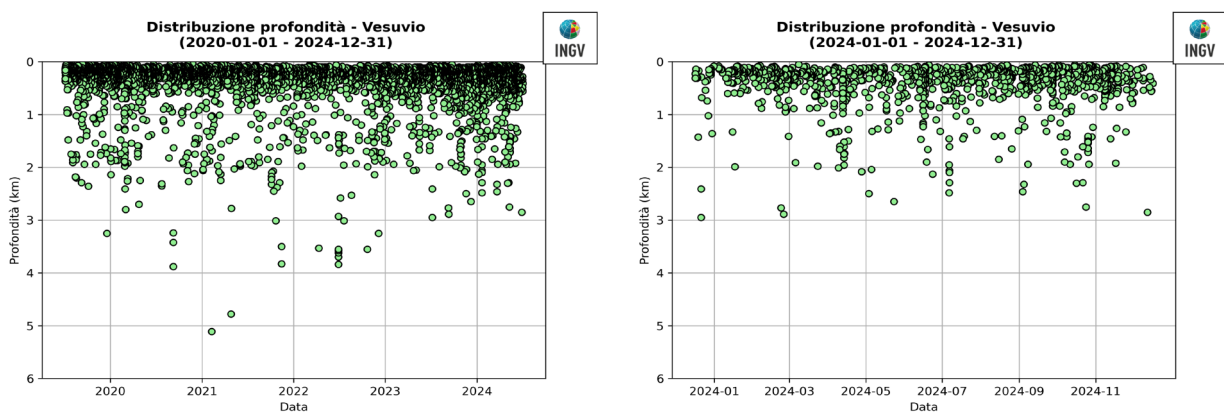


Figura 1.1.5 – Profondità ipocentrali dei terremoti vesuviani localizzati nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del 2024 (a destra).

Non si evidenziano variazioni significative nella frequenza di accadimento (Figura 1.1.3), nella distribuzione degli ipocentri (Figura 1.1.4), nella distribuzione temporale delle

profondità ipocentrali (Figura 1.1.5), nella distribuzione temporale delle magnitudo (Figura 1.1.6 e Tabella 1.1.2) e nel rilascio cumulativo di energia (Figura 1.1.7).

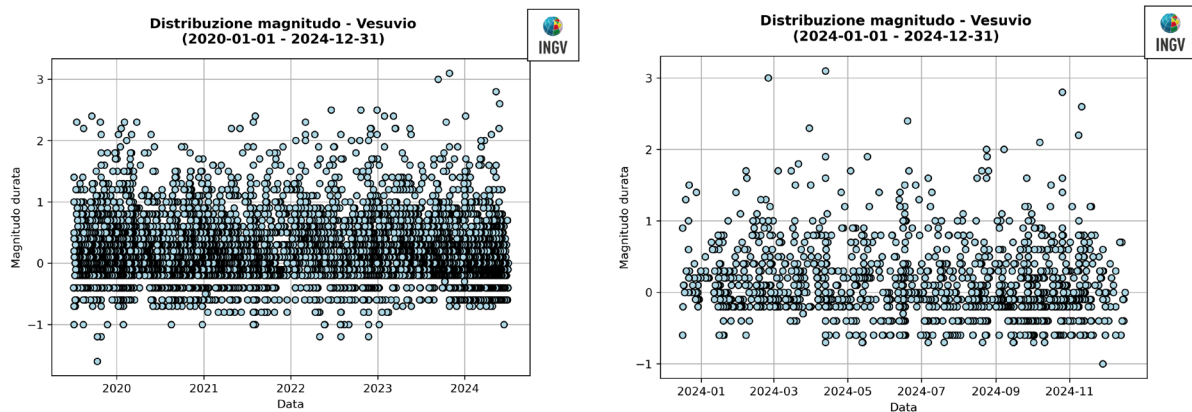


Figura 1.1.6 - Magnitudo dei terremoti vesuviani nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del 2024 (a destra).

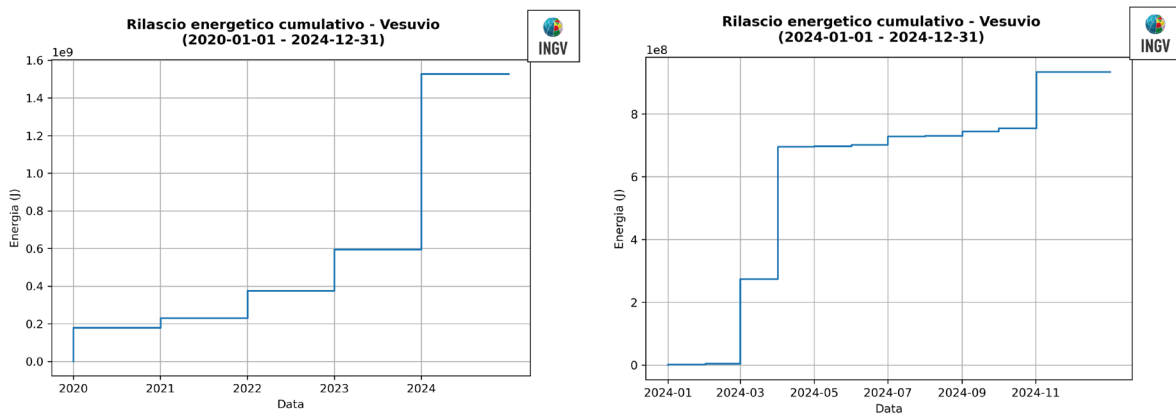


Figura 1.1.7 - Andamento cumulativo dell'energia rilasciata dai terremoti vesuviani nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del 2024 (a destra).

Tabella 1.1.2 – Riepilogo della sismicità registrata al Vesuvio nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del 2024 (a destra) suddivisa per classi di magnitudo e relative percentuali.

Numero totale terremoti: 5265 $M_{dmax} = 3.1 \pm 0.3$	
Numero terremoti con $M_d < 0.0$	1799 (34.17%)
Numero terremoti con $0.0 \leq M_d < 1.0$	2849 (54.11%)
Numero terremoti con $1.0 \leq M_d < 2.0$	453 (8.60%)
Numero terremoti con $2.0 \leq M_d < 3.0$	46 (0.87%)
Numero terremoti con $M_d > 3.0$	2 (0.04%)
Numero terremoti con M_d ND	116 (2.20%)

Numero totale terremoti: 1315 $M_{dmax} = 3.1 \pm 0.3$	
Numero terremoti con $M_d < 0.0$	553 (42.05%)
Numero terremoti con $0.0 \leq M_d < 1.0$	638 (48.52%)
Numero terremoti con $1.0 \leq M_d < 2.0$	83 (6.31%)
Numero terremoti con $2.0 \leq M_d < 3.0$	8 (0.61%)
Numero terremoti con $M_d > 3.0$	2 (0.15%)
Numero terremoti con M_d ND	31 (2.36%)

In Figura 1.1.8 è rappresentata la frequenza di accadimento dei terremoti registrati al Vesuvio dal 1972 e la relativa energia cumulativa.

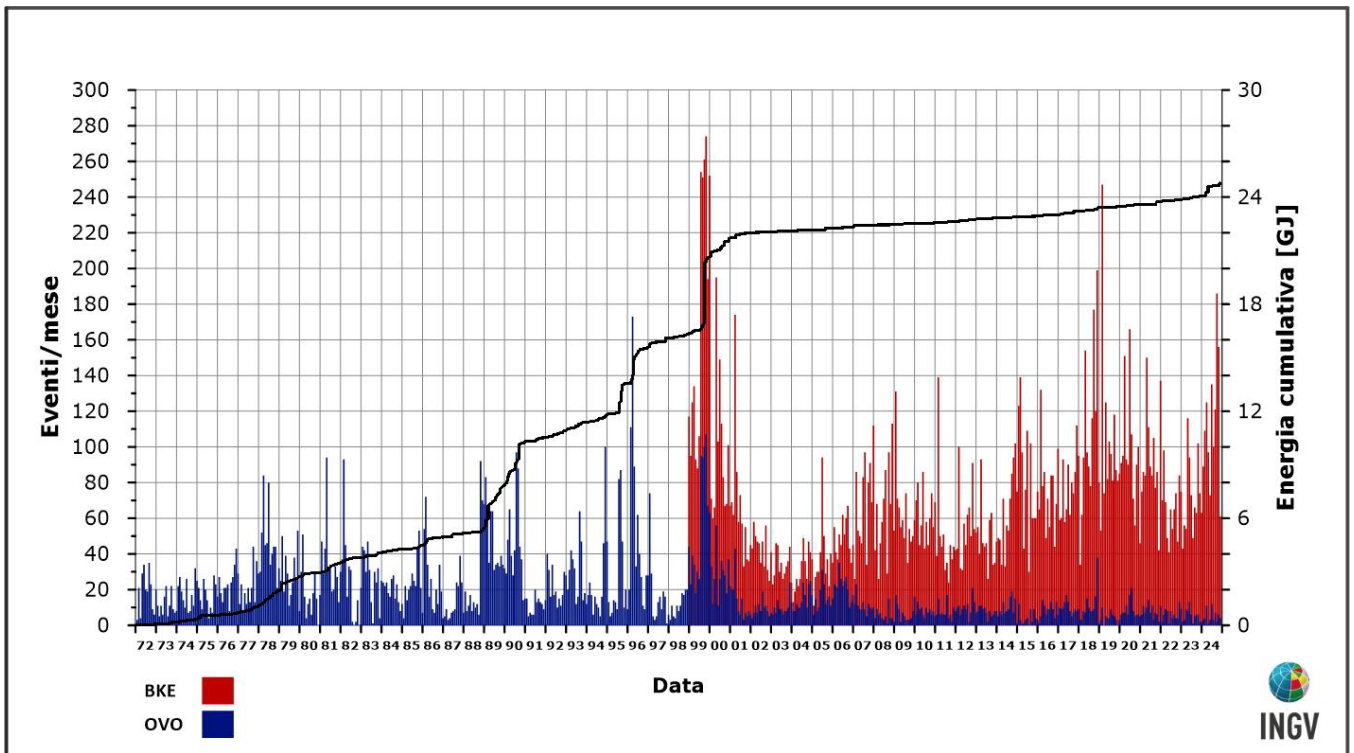


Figura 1.1.8 – Frequenza di accadimento dei terremoti registrati dal 1972 alla Stazione OVO (in blu) e dal 1999 alla stazione BKE (in rosso). La linea nera rappresenta l’energia cumulativa.

Da questa figura si può osservare come l’incremento del numero di eventi registrato negli ultimi anni sia legato essenzialmente ad una sismicità di bassa energia confinata nell’area craterica e rilevabile alla stazione OVO (Sede Osservatorio Vesuviano) solo in alcune occasioni.

1.2 RETE SISMICA MOBILE

La configurazione delle stazioni operative al Vesuvio durante il 2024 è mostrata in Figura 1.2.1, mentre le caratteristiche tecniche sono riassunte nella Tabella 1.2.1. Gli interventi strumentali di maggiore rilievo riguardano l’installazione di due stazioni sismiche in trasmissione: VSVT (San Vito, stazione convertita da registrazione offline) e VCDC (Castello di Cisterna).

Tutta la strumentazione funziona anche in modalità di acquisizione locale. La maggior parte delle stazioni Rete Mobile ha acquisito con discreta continuità per tutto il 2024; il *data-set* è costituito da rumore sismico, terremoti locali, regionali e telesismi.



Figura 1.2.1 – Stazioni sismiche della Rete Mobile operative al Vesuvio nel corso del 2024.

Tabella 1.2.1 – Stato della Rete Sismica Mobile operativa al Vesuvio al dicembre 2024. In grassetto le stazioni in trasmissione in tempo reale.

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisitore	Trasmissione
VCDC	40.9162 14.4096 95m	Castello di Cisterna	Maggio 2024	Tellus Lunitek 1s Episensor Kinematics - FBA-EST	Lunitek Atlas C	LTE
SNTG	40.8560N 14.4051E 255m	S.Anastasia	Aprile 2014	Guralp CMG-40T	Marslite	Locale
SVAG	40.8524N 14.4493E 373m	Somma Vesuviana	Maggio 2012	Guralp CMG-40T	Marslite	Locale
VSVT	40.8229N 14.3692E 195m	San Vito	Maggio 2024	Tellus Lunitek 1s Accelerom. Lunitek LTFB	Lunitek Atlas C	LTE
VATG	40.8099N 14.4210E 677m	Vesuvio Forestale	Settembre 2019	Guralp CMG40T	MarsLite	Locale

2 - MONITORAGGIO GEODETICO

Durante il 2024 il monitoraggio geodetico del Vesuvio è stato effettuato attraverso misure continue GNSS, tiltmetriche e mareografiche, una campagna di misure gravimetriche ed elaborazioni di dati satellitari.

2.1 RETE GNSS

P. De Martino¹, M. Dolce¹, G. Brandi¹, A. Iorio¹, G. Scarpato¹, U. Tammaro¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

La rete GNSS permanente operante nell'area vesuviana è costituita da 14 stazioni (Figura 2.1.1). A partire dal 2023 è stato realizzato un potenziamento della Rete GNSS attraverso l'installazione di 4 nuove stazioni GNSS (CRAT, BKSU, TREC e TRZG in Figura 2.1.1), l'upgrade di tutte le restanti stazioni da GPS a GNSS e un ammodernamento dei sistemi di alimentazione e trasmissione. A dicembre 2024 è stata installata la nuova stazione di PALM (Palma Campania), che sostituisce quella di PACA andata perduta a causa di lavori alla struttura che la ospitava (Figura 2.1.2).

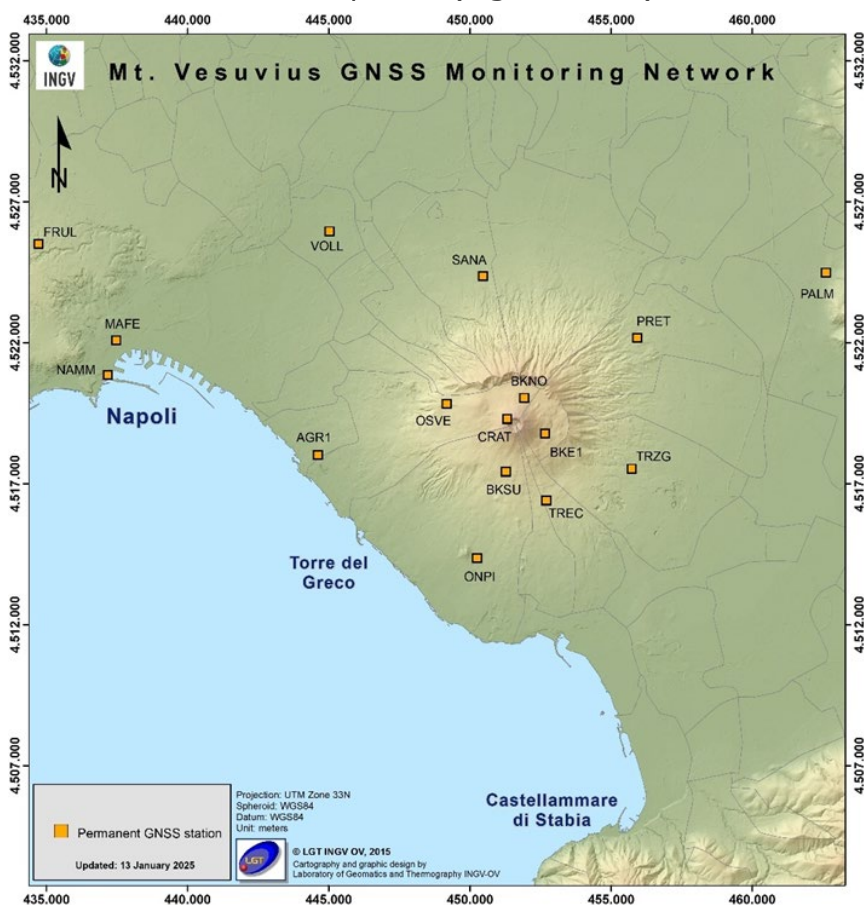


Figura 2.1.1 – Rete GNSS del Vesuvio.

In Tabella 2.1.1 sono riportati i nomi delle stazioni e le coordinate, le specifiche della strumentazione, gli intervalli di acquisizione dati ed i sistemi di trasmissione utilizzati.

Tabella 2.1.1 – Stato della Rete GNSS del Vesuvio.

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
AGR1	40.8112N 14.3434E 116m	Portici Facoltà di Agraria	2003	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1sec	ADSL
BKE1	40.8185N 14.4387E 917m	Vesuvio Bunker Est	2006	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1sec	Wi-Fi
BKNO	40.8299N 14.4299E 1007m	Vesuvio Bunker Nord	2009	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1sec	Wi-Fi
BKSU	40.8063N 14.4224E 649m	Vesuvio Bunker Sud	2023	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1sec	Wi-Fi
CRAT	40.8230N 14.4228E 1204m	Vesuvio Cratere	2023	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1sec	Wi-Fi
ENAV	40.5823N 14.3349E 541m	Punta Campanella	2003	Leica GR10 LEIAR25 LEIT	1sec	Wi-Fi
ONPI	40.7786N 14.4105E 178m	Torre del Greco	2001	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1sec	LTE
OSVE	40.8279N 14.3974E 677m	Sede Storica O. V.	2005	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	Wi-Fi
PALM	40.8700N 14.5564E 128m	Palma Campania	2024	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1sec	LTE
PRET	40.8494N 14.7472E 256m	Municipio di Ottaviano	2001	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1sec	ADSL
SANA	40.8688N 14.4122E 203m	Sant'Anastasia	2001	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1sec	LTE
TREC	40.7971N 14.4394E 403m	Trecase Forestale Vesuvio	2023	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1sec	Wi-Fi
TRZG	40.4875N 14.4752E 227m	Terzigno	2023	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1sec	Wi-Fi
VOLL	40.8828N 14.3476E 80m	Volla	2018	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1sec	LTE



Figura 2.1.2 - Stazione GNSS PALM (Palma Campania) installata a dicembre 2024.

Tutte le stazioni sono attrezzate con ricevitori GNSS di ultima generazione Leica GR10 e GR50 ed antenne di tipo Choke Ring Leica AR20 e AR25. I dati vengono trasmessi con varie tecnologie in funzione della logistica del sito. I sistemi di trasmissione comprendono otto stazioni che trasmettono tramite la rete Wi-Fi dell'Osservatorio Vesuviano, quattro che utilizzano la connettività LTE, due che trasmettono con tecnologia ADSL. Cinque stazioni sono alimentate con energia solare tramite pannelli fotovoltaici da 150W (BKE1, BKNO, BKSU, ONPI e PALM). Le restanti stazioni sono alimentate tramite rete elettrica e dotate di batterie tampone per estenderne l'operatività in caso di blackout.

Tutte le stazioni GNSS sono programmate con una doppia acquisizione in locale (file giornaliero a 30 sec ed orario ad 1 sec) e flusso dati ad 1 sec in tempo reale verso la Sala di Monitoraggio OV.

La gestione remota delle stazioni, la programmazione e download dei dati, la ricezione e processamento del flusso dati in tempo reale vengono effettuati tramite il software Spider della Leica Geosystems. Procedure automatiche giornaliere provvedono alla verifica e validazione dei dati, all'archiviazione e al processamento dei dati GNSS, alla restituzione dei risultati (serie temporali delle variazioni lungo le componenti Nord, Est e Quota, campi di velocità e/o spostamento planimetrici e verticali).

Tutti i dati GNSS dal 2023 sono stati riprocessati in modalità Precise Point Positioning (PPP) con il software PRIDE PPP-AR. Le serie temporali sono analizzate tramite il software Hector per calcolare le velocità ed un realistico valore dell'errore associato, stimare i segnali periodici a carattere annuale e le eventuali discontinuità dovute a cambi di antenna.

Dal 2022 è operativo in Sala di Monitoraggio OV il sistema di processamento e visualizzazione in tempo reale dei dati ad alta frequenza (1 Hz) delle stazioni GNSS dell'area vulcanica napoletana (Figura 2.1.3) realizzato nell'ambito della Convenzione DPC-INGV 2019-2021 (Allegato B2, WP2-Task2).

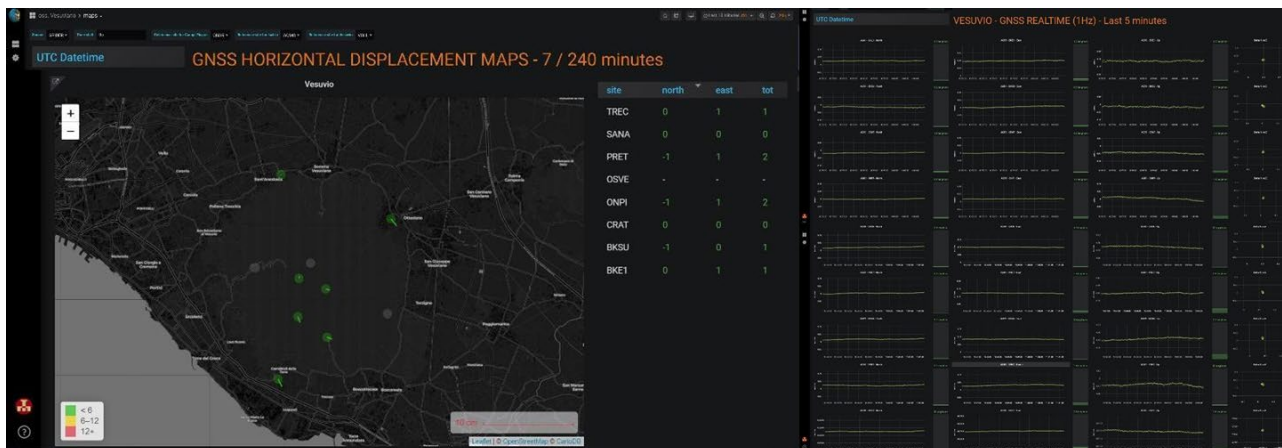


Figura 2.1.3 - (RTView_OV) Sistema di visualizzazione ed analisi in tempo reale dei dati GNSS ad alta frequenza (1 Hz) operativo in Sala di Monitoraggio.

Dall'analisi dei dati GNSS non si evidenziano deformazioni del suolo riconducibili a sorgenti vulcaniche.

I risultati confermano i trend medi pluriennali di subsidenza della parte alta dell'edificio vulcanico (Figura 2.1.4), coerenti con una fase di contrazione del Gran Cono dovuta ad effetti gravitativi e processi di compattazione e/o scivolamento di terreni poco coerenti ed in forte pendenza

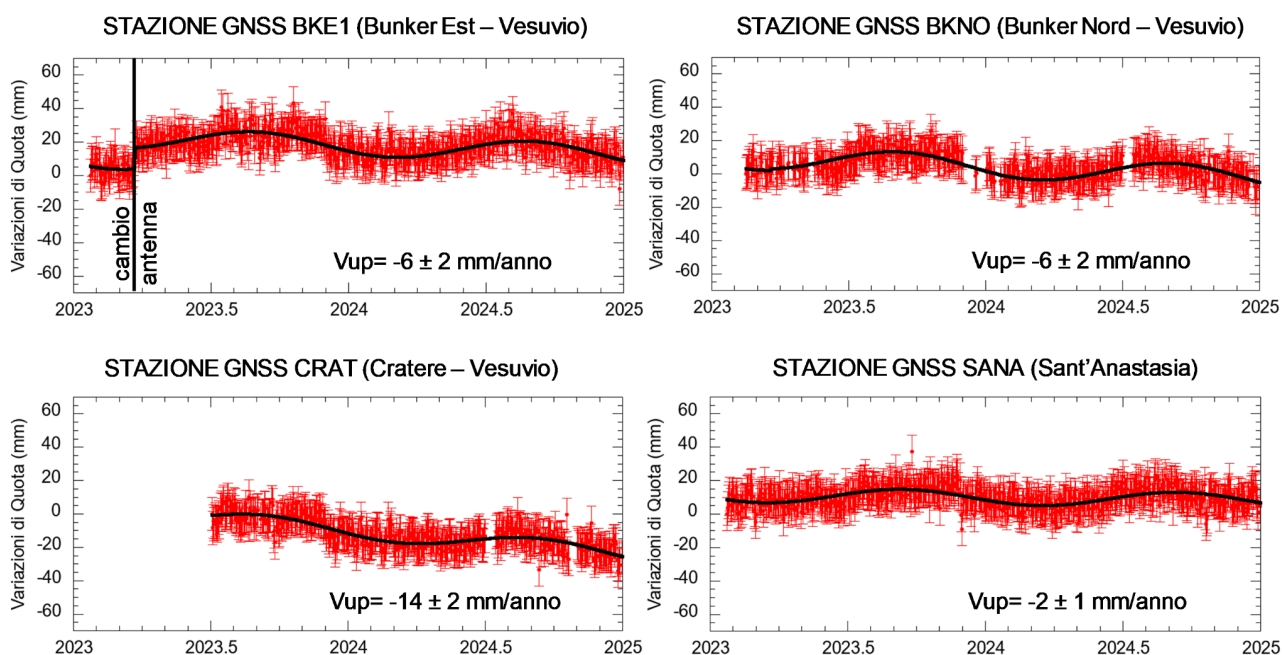


Figura 2.1.4 - Serie temporali delle variazioni giornaliere della componente verticale delle stazioni BKE1, BKNO, CRAT e SANA (Vesuvio) da gennaio 2023 a dicembre 2024.

2.2 RETE TILTMETRICA

I. Aquino¹, V. Augusti¹, F. De Cicco¹, M. Papaccio¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

La rete tiltmetrica operante nell'area vesuviana è costituita da 11 siti di cui 3 attrezzati con sensori analogici di superficie, mod. 702 (Applied Geomechanics Instruments), 3 con sensori digitali borehole (da pozzo), mod. Lily (Jewell Instrument), e 5 siti aggiuntivi da attrezzare con ulteriori sensori digitali borehole, mod. Lily (Jewell Instrument). La geometria della rete è mostrata in figura 2.2.1 e in Tabella 2.2.1 sono riportati i nomi delle stazioni, le coordinate, le specifiche della strumentazione, gli intervalli di acquisizione dati ed i sistemi di trasmissione utilizzati.

Il tiltmetro mod. 702 è un sensore analogico di superficie (dell'Applied Geomechanics Instruments), biassiale con trasduttore a bolla che misura variazioni di inclinazione del suolo dell'ordine di 0.1 mrad, lungo direzioni ortogonali X e Y ed è corredato da un sensore termico. Il tiltmetro mod. Lily (della Jewell Instrument) è un sensore digitale borehole anch'esso biassiale e dotato di sensore termico ed ha una risoluzione inferiore a 5 nanorads, inoltre è dotato di una bussola magnetica. Le stazioni tiltmetriche sono alimentate tramite rete elettrica o tramite pannello solare e dotate di batterie tampone. Tutte le stazioni acquisiscono 1 dato al minuto, i dati vengono archiviati in un datalogger e inviati al Centro di Monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano.

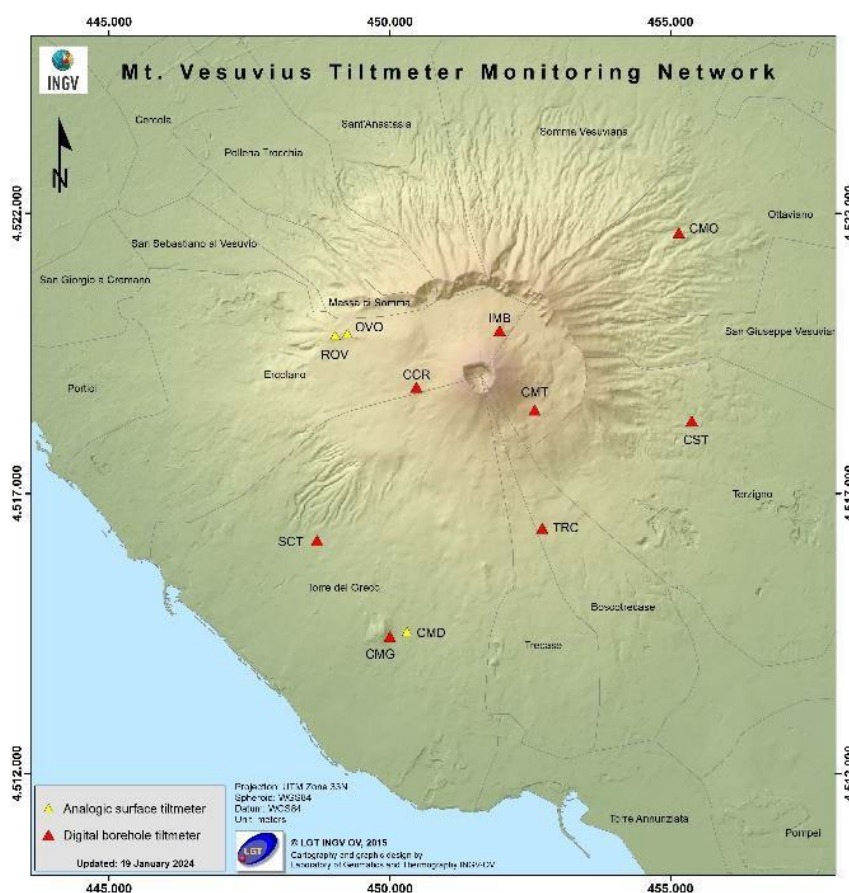


Figura 2.2.1 – Rete Tiltmetrica del Vesuvio.

I segnali registrati dalle stazioni tiltmetriche del Vesuvio consistono in serie temporali delle variazioni di inclinazione del suolo lungo due piani ortogonali (NS ed EW), di temperatura e declinazione magnetica (solo per i sensori digitali) e di pressione atmosferica (per i sensori analogici).

Le sequenze tiltmetriche considerate per il calcolo del campo di inclinazione del suolo derivano dai segnali originali registrati per le stazioni borehole e da quelli sottoposti ad un trattamento statistico di decorrelazione dagli effetti termici per le stazioni superficiali.

Tabella 2.2.1 – Stato della Rete Tiltmetrica del Vesuvio.

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Profondità	Acquisizione	Trasmisione
OVO	40.8281N 14.3966E 608 m	Sede Storica OV	18/02/1993	Applied Geomechanics mod. 702	-25 metri	1'	ADSL
ROV	40.8280N 14.3972E 608 m	Sede Storica OV	28/04/2014	Applied Geomechanics mod. 702	Piano campagna	1'	GSM
CMD	40.7797N 14.4090E 120 m	Torre del Greco Acquedotto Vesuviano	01/06/1996	Applied Geomechanics mod. 702	-2 metri	1'	GSM
TRC	40.7971N 14.4396E 372 m	Trecase Forestale	28/11/2011	Jewell Instrument mod. Lily	-28 metri	1'	ADSL
IMB	40.8288N 14.4303E 974 m	Rifugio Imbò	24/11/2014	Jewell Instrument mod. Lily	-22 metri	1'	Wi-Fi
CMG	40.7795N 14.4088E 120 m	Torre del Greco Acquedotto Vesuviano	17/04/2015	Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri	1'	ADSL
CMT	40.8160N 14.4378E 608 m	Ottaviano Valle dell'Inferno	06/05/2016	Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri	1'	ADSL
CCR	40.81968N 14.4127E 761 m	Ercolano Piazzale seggiovia		Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri		
CMO	40.8447N 14.4682E 282 m	Ottaviano Castello Mediceo		Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri		
CST	40.8144N 14.4710E 225 m	Terzigno Campo Sportivo		Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri		
CTG	40.7948N 14.3922E 158 m	Torre del Greco Chiesa Sacro Cuore		Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri		

L'alta risoluzione dei sensori tiltmetrici borehole consente di registrare variazioni di inclinazione del suolo anche associabili a variazioni locali dovute a migrazione di fluidi in aree ad elevata fratturazione che si sovrappongono alle variazioni dovute al campo di deformazione principale.

L'odografo di Fig. 2.2.2 riassume il tilting registrato dalle 3 stazioni digitali funzionanti, i cui segnali sono filtrati delle periodicità inferiori ad 1 giorno. In tale figura la deformazione relativa ad ogni sito-stazione è rappresentata con segmenti orientati di colore diverso che rappresentano la variazione progressiva registrata dal sensore. 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 la data di fine anno e 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.

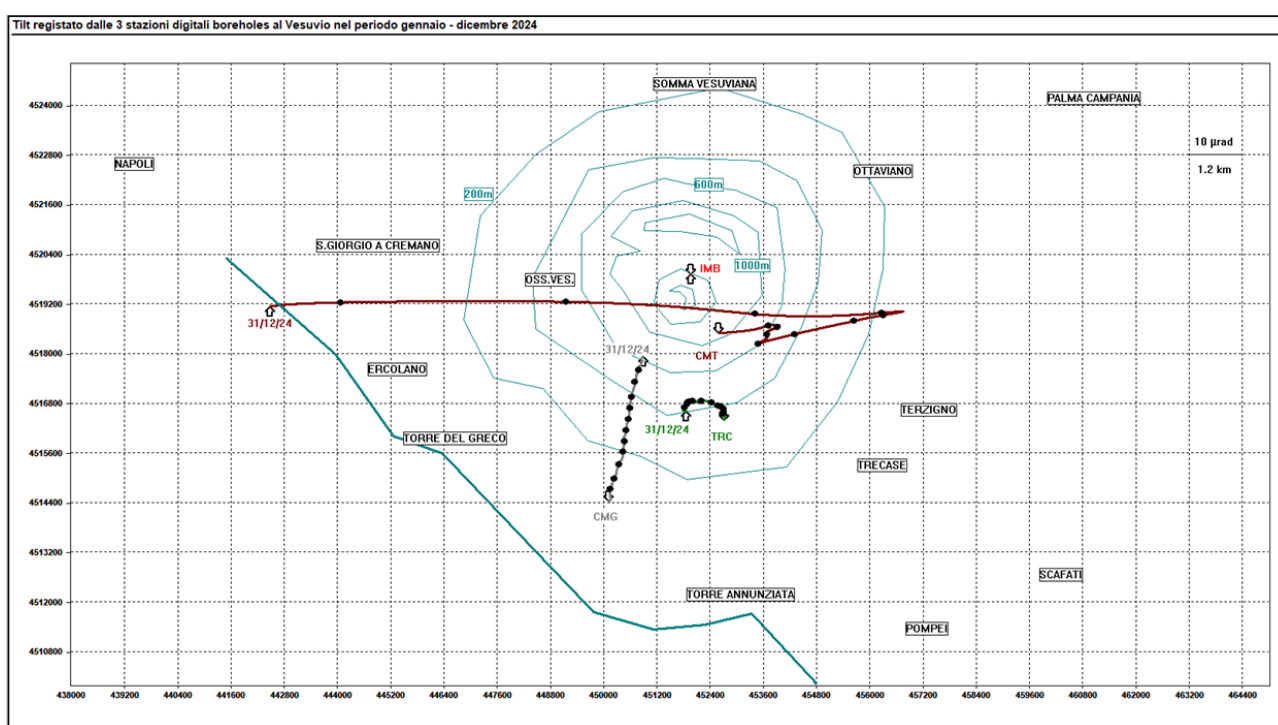


Figura 2.2.2 - Pattern tiltmetrico osservato al Vesuvio nel 2024 dai sensori CMT (bordeaux), TRC (verde) e CMG (grigio) ubicati a 25 m di profondità. Il lato di ogni maglia del reticolo equivale a 10 μ radianti o 1.2 km. I pallini neri sovrapposti ai vettori tilt indicano intervalli di un mese.

Nel 2024 il pattern di deformazione registrato dalla rete tiltmetrica del Vesuvio mostra una generalizzata subsidenza dell'edificio vulcanico.

Il segnale registrato alla stazione CMG mostra una netta inclinazione a N determinata dalla subsidenza craterica.

I segnali registrati alle stazioni TRC e CMT mostrano una progressiva subsidenza craterica su cui si sovrappone un segnale più articolato generato da un campo di deformazione locale che polarizza l'inclinazione di entrambe le stazioni verso W. A CMT l'effetto è di maggiore entità presumibilmente per la presenza di un campo di fratturazione locale che amplifica l'inclinazione del suolo in direzione W. Analizzando nel dettaglio il segnale originale si è osservato che la stazione CMT si inclina con la massima

frequenza a NE tra le 14:00 e le 16:00 ed a SW tra le 02:00 e le 04:00 ogni giorno in risposta alla marea semidiurna.

Nella Tabella 2.2.3 sono riportati, per le 3 stazioni digitali i valori cumulativi: della variazione di inclinazione del suolo in μ radianti, della variazione di temperatura registrata a fondo pozzo (\approx -25 m dal p.c.) e della direzione di tilting acquisite nel corso del 2024.

Tabella 2.2.2 - Tilt registrato, variazione termica e azimuth relativi alle stazioni digitali nel 2024.

<i>Stazione</i>	<i>Inclinazione</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Azimuth</i>
<i>Stazione TRC (372 m s.l.m.)</i>	<i>7.5 μradianti a NW</i>	<i>0.10 °C</i>	<i>284°</i>
<i>Stazione CMG (117 m s.l.m.)</i>	<i>29.7 μradianti a NNE</i>	<i>0.04 °C</i>	<i>12°</i>
<i>Stazione CMT (842 m s.l.m.)</i>	<i>66.3 μradianti a NW</i>	<i>0.14 °C</i>	<i>274°</i>

2.3 RETE MAREOGRAFICA

S. Guardato¹, R. Riccio¹, M. Dupuis¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano – Napoli

La Rete Mareometrica del Vesuvio consiste di 3 stazioni (Figura 2.3.1, Tabella 2.3.1). Nel corso del 2024, il funzionamento della rete si è assestato intorno ai valori di completezza dei dati superiore al 99% (Tabella 2.3.2). I dati sono disponibili all'indirizzo web: <http://medusa.ingv.it/MAREO/index.php>.

Il monitoraggio del livello mareometrico è realizzato mediante sensori elettro-meccanici costituiti da una piccola catena in materiale plastico, di lunghezza fissa, alle cui estremità sono fissati - in controbilanciamento - un elemento di appesantimento ed un galleggiante; la catena è fatta passare su di una puleggia, costituente lo shaft-encoder analogico. Il sistema così costituito è installato all'interno di un opportuno tubo di calma metallico accoppiamento diretto con il mare. I segnali, campionati ogni minuto, sono acquisiti da un convertitore A/D, memorizzati in files locali e, quindi, trasmessi via modem GSM-UMTS alla sala di monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano. L'alimentazione di ciascuna stazione avviene mediante l'utilizzo di pannelli fotovoltaici, batterie tampone e regolatori di carica.

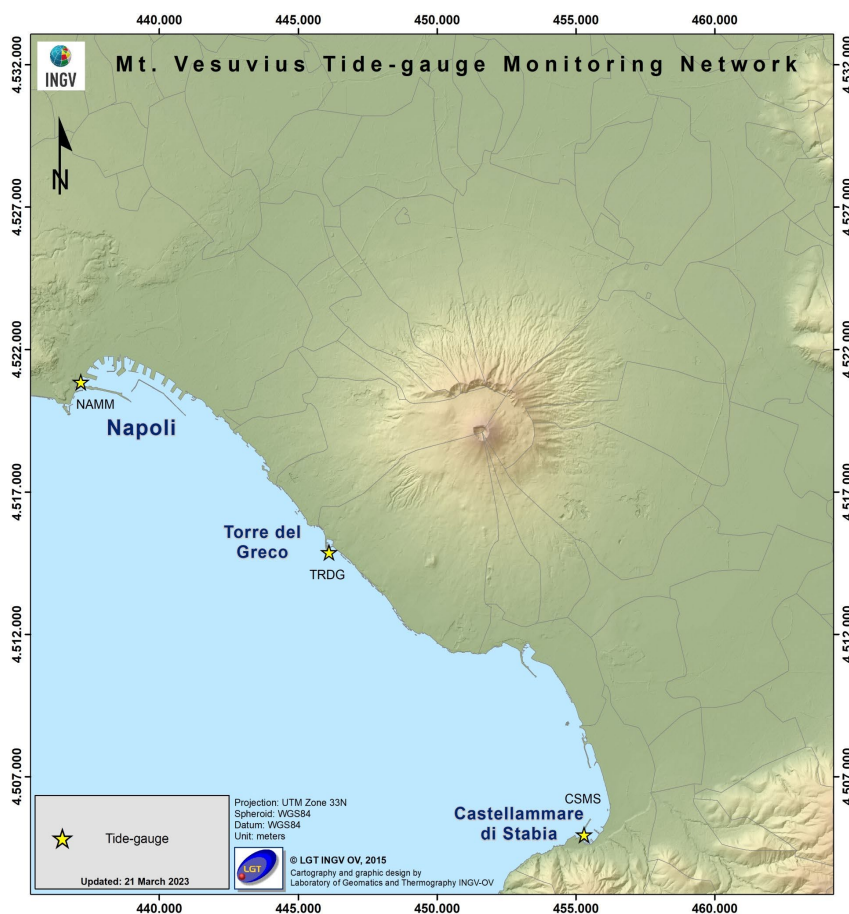


Figura 2.3.1 – Rete Mareografica del Vesuvio.

Le stazioni sono installate sulle banchine dei relativi moli in cabine metalliche o contenitori in vetroresina. L'ubicazione in ambiente marino condiziona notevolmente le

strutture di alloggio e pertanto è indispensabile una loro frequente manutenzione. A tale scopo vengono effettuati periodicamente, da personale subacqueo specializzato di ditte esterne all’Ente, lavori di sturo e di sostituzione degli anodi sacrificali di zinco ai tubi di calma, oltre ad eventuali operazioni di manutenzione straordinaria (es. presenza di oggetti che ostruiscono il tubo o altro).

Tabella 2.3.1 – Stazioni della Rete Mareometrica del Vesuvio.

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
TRDG	40.7830N 14.3614E	Torre del Greco	02/09/2008	di livello con shaft-encoder	60sec	UMTS-GSM
CSMS	40.6911N 14.4742E	Castellammare di Stabia	30/04/2003	di livello con shaft-encoder	60sec	UMTS-GSM
Stazione mareografica di riferimento: Napoli, Molo S. Vincenzo						
NAMM	40.8364N 14.2547E	Napoli, Molo S. Vincenzo	06/10/2015	di livello con shaft-encoder	60sec	UMTS-GSM

Nel corso del 2025, non appena saranno disponibili le risorse finanziarie necessarie, si prevede di munire le stazioni mareometriche anche di un sensore completamente digitale di tipo radar, che resterà in funzionamento parallelo a quello esistente per un periodo di prova di almeno 6 mesi, per poi passare definitivamente alla soppressione delle ormai obsolete stazioni elettromeccaniche con quelle totalmente digitali. Si prevede anche di ammodernare i sistemi relativi all’energizzazione delle stazioni, con nuovi pannelli fotovoltaici, batterie tampone e regolatori di carica MPPT controllabili da remoto.

La riorganizzazione dell’intera Rete Mareometrica, avvenuta nei primi mesi del 2023, ha permesso di ripristinare i segnali acquisiti da tutte le stazioni della rete, ferma da giugno 2021, e che nel corso del 2024 ha prodotto circa il 100% dei dati con continuità. Nell’area vesuviana, le analisi dei dati delle stazioni di Torre del Greco (TRDG) (Fig. 2.3.2) e di Castellammare di Stabia (CSMS) (Fig. 2.3.3), da gennaio 2016 alla fine del 2024, non evidenziano significativi movimenti del suolo rispetto alle misure precedenti; il generale comportamento di subsidenza si traduce, per l’intervallo temporale riportato, in un abbassamento dell’area di circa 4.2 cm per la stazione TRDG, e di circa 1.8 cm per la stazione CSMS.

Tabella 2.3.2 – Stato di funzionamento della Rete Mareometrica del Vesuvio (2024).

Stazione	Giorni di funzionamento	Giorni con mancanza di dati	Percentuale di funzionamento
TRDG	362	4	98,9%
CSMS	366	nessuno	100%
NAMM	364	2	99,5%

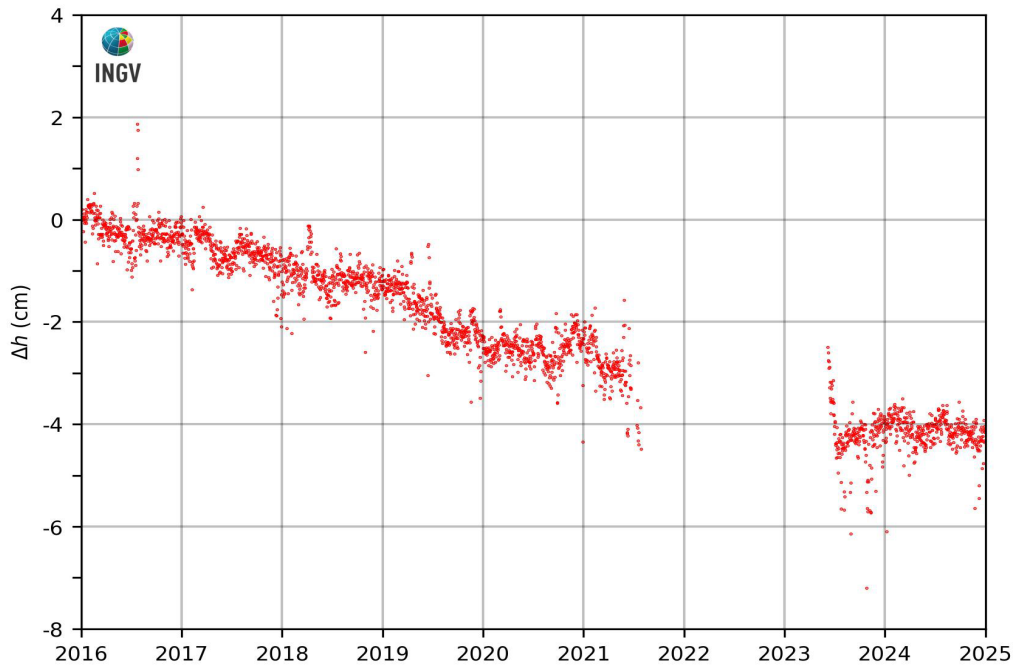


Figura 2.3.2 – Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2016 – dicembre 2024, ottenuti dall’analisi dei dati acquisiti dal sensore della stazione mareografica di Torre del Greco (TDRG). Le variazioni riportate rappresentano le medie giornaliere e sono riferite alla stazione di Napoli, Molo S. Vincenzo (NAMM).

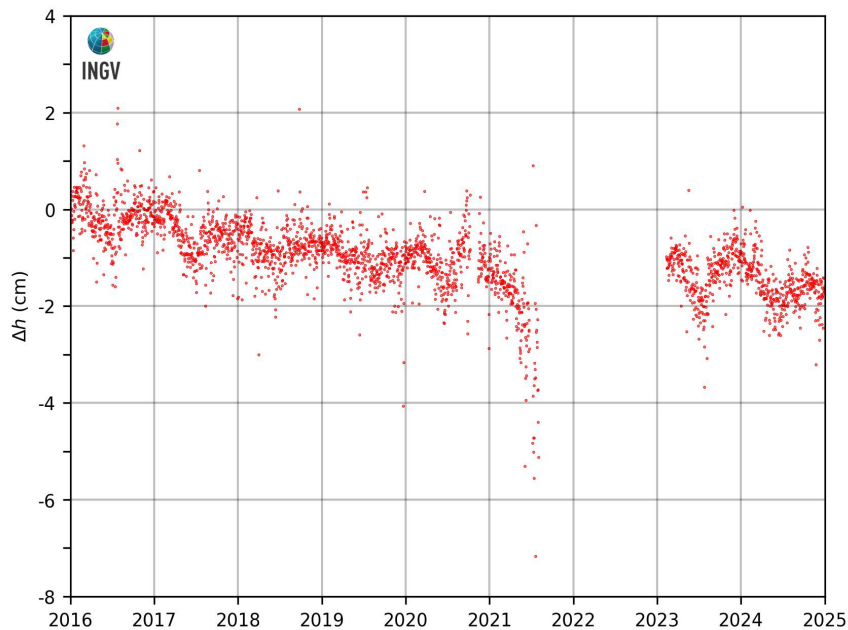


Figura 2.3.3 – Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2016 – dicembre 2024, ottenuti dall’analisi dei dati acquisiti dal sensore della stazione mareografica di Castellammare di Stabia (CSMS). Le variazioni riportate rappresentano le medie giornaliere e sono riferite alla stazione di Napoli, Molo S. Vincenzo (NAMM).

Nella Figura 2.3.4 vengono mostrati, a completamento, i dati registrati da tutte le stazioni mareometriche dell’area vesuviana per il periodo gennaio 2006 – dicembre 2024, riferiti alla stazione NAMM, da cui si non si evidenziano particolari movimenti del

suolo, fatta eccezione per la modesta subsidenza, consistente in 6.1 cm registrata alla stazione di TRDG, e di 3.4 cm registrata alla stazione di CSMS.

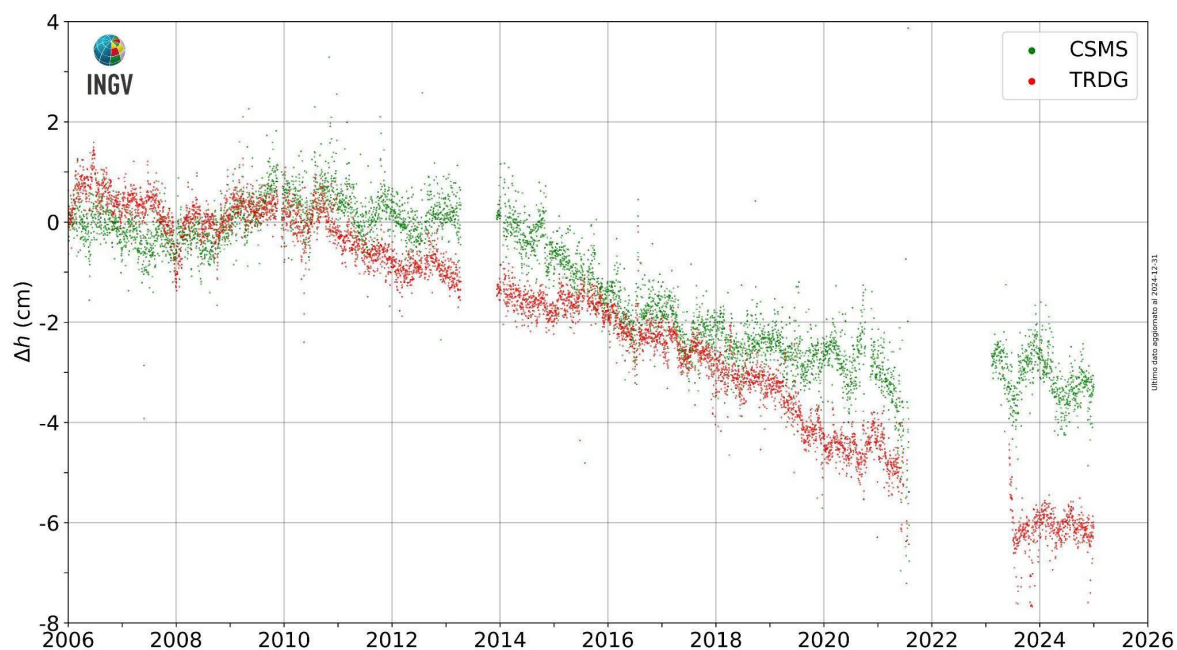


Figura 2.3.4 – Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2006 – dicembre 2024, ottenuti dall’analisi dei dati acquisiti da tutte le stazioni mareografiche del Vesuvio. Le variazioni riportate rappresentano le medie giornaliere e sono riferite alla stazione di Napoli, Molo S. Vincenzo (NAMM).

2.4 RETE GRAVIMETRICA

S. Carlino¹, T. Pivetta¹, G. Ricciardi¹, A. Fedele¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

Nel mese di aprile 2024 è stata svolta una campagna di misure gravimetriche relative nell'area vesuviana. Le misure sono state eseguite su 30 vertici della rete, collegati alla stazione gravimetrica assoluta di Napoli (Largo San Marcellino), assunta come riferimento (Figura 2.4.1). Le misure gravimetriche relative sono state eseguite sia con il gravimetro LaCoste & Romberg modello D numero 85 (LCR-D85) che con il nuovo gravimetro CG6 Scintrex, Serial Number: 23100574 (CG6-574) e sono state corrette per gli effetti di variazione della marea solida, del carico atmosferico e della deriva strumentale. La successiva compensazione degli errori di chiusura, con il metodo ai minimi quadrati, è stata eseguita su un numero di sei circuiti concatenati dell'intera rete, ottenendo un errore medio sulla rete pari a $\pm 10 \mu\text{Gal}$ ($1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{m/s}^2$).

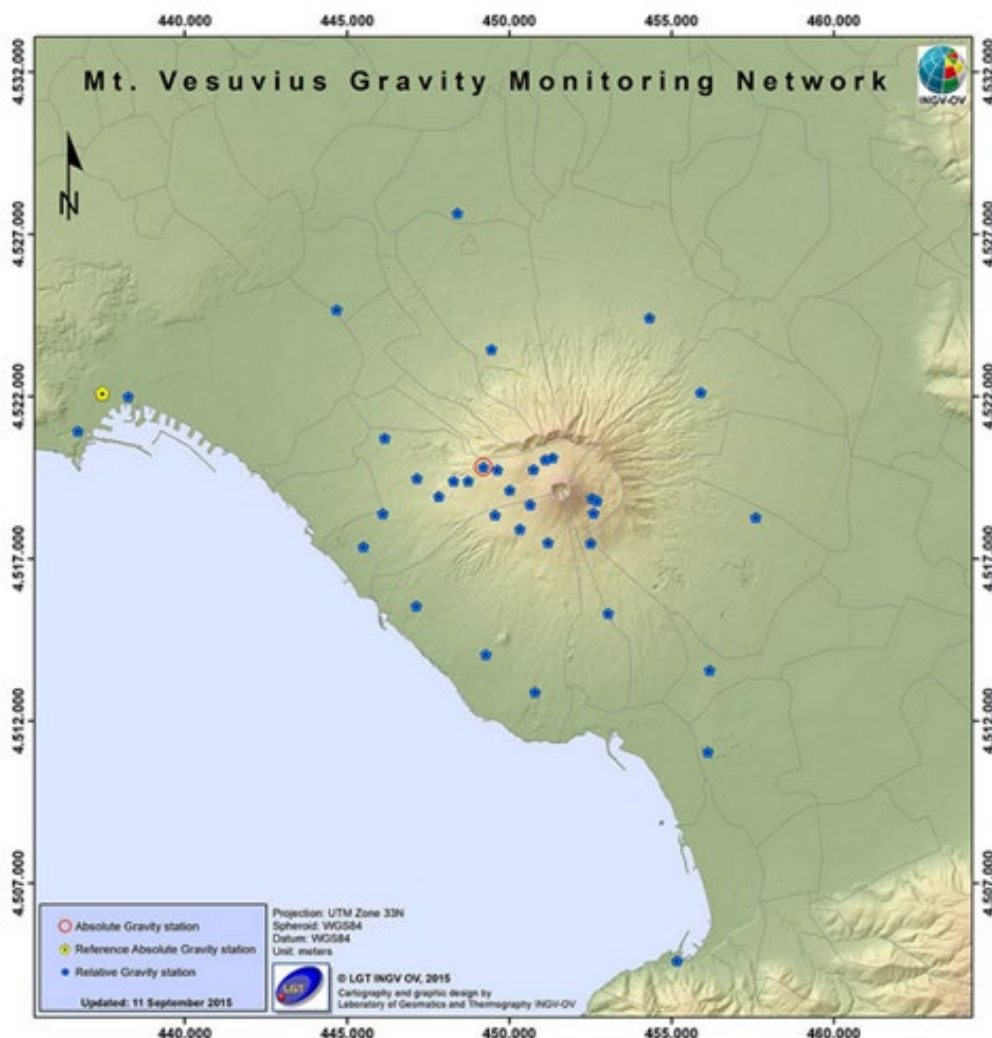


Figura 2.4.1 – Vertici della rete gravimetrica dell'OV-INGV Vesuvio (www.ov.ingv.it). Il punto giallo, che rappresenta il caposaldo assoluto di riferimento, è localizzato presso il complesso monumentale di Largo San Marcellino (Napoli).

Sono state in seguito calcolate le differenze dei valori di gravità relativa, per ogni singolo vertice, rispetto alla stazione di riferimento di Napoli. I valori ottenuti sono stati poi confrontati con quelli della campagna precedente, eseguita con il gravimetro LaCoste & Romberg LCR-D85 nel maggio 2023, il cui errore medio sulla rete era pari a $\pm 8 \mu\text{Gal}$, ottenendo le differenze Δg relative. Vista la limitatezza delle deformazioni del suolo nell'arco di tempo considerato ($< 1 \text{ cm}$) nel computo del residuo non viene considerata la correzione per l'effetto di variazione di quota (FAG). Rispetto alla campagna precedente si evidenzia un incremento dei residui gravimetrici, con valori positivi che interessano l'intero apparato vulcanico. Le variazioni massime sono dell'ordine dei $+40 \mu\text{Gal}$ e si osservano nel settore del recinto calderico del Mt. Somma, immediatamente a SW del Gran Cono. Variazioni con ampiezze e pattern spaziali simili sono già state osservate negli anni precedenti ed attribuite ad oscillazioni di falde acquifere e/o migrazioni di fluidi verso la superficie.

Valori minori, ai limiti dell'errore statistico di $10 \mu\text{Gal}$, si rinvencono nel settore pedemontano a sud del vulcano, mentre lungo la costa tra Torre del Greco e Torre Annunziata, non si evidenziano variazioni rispetto all'anno precedente.

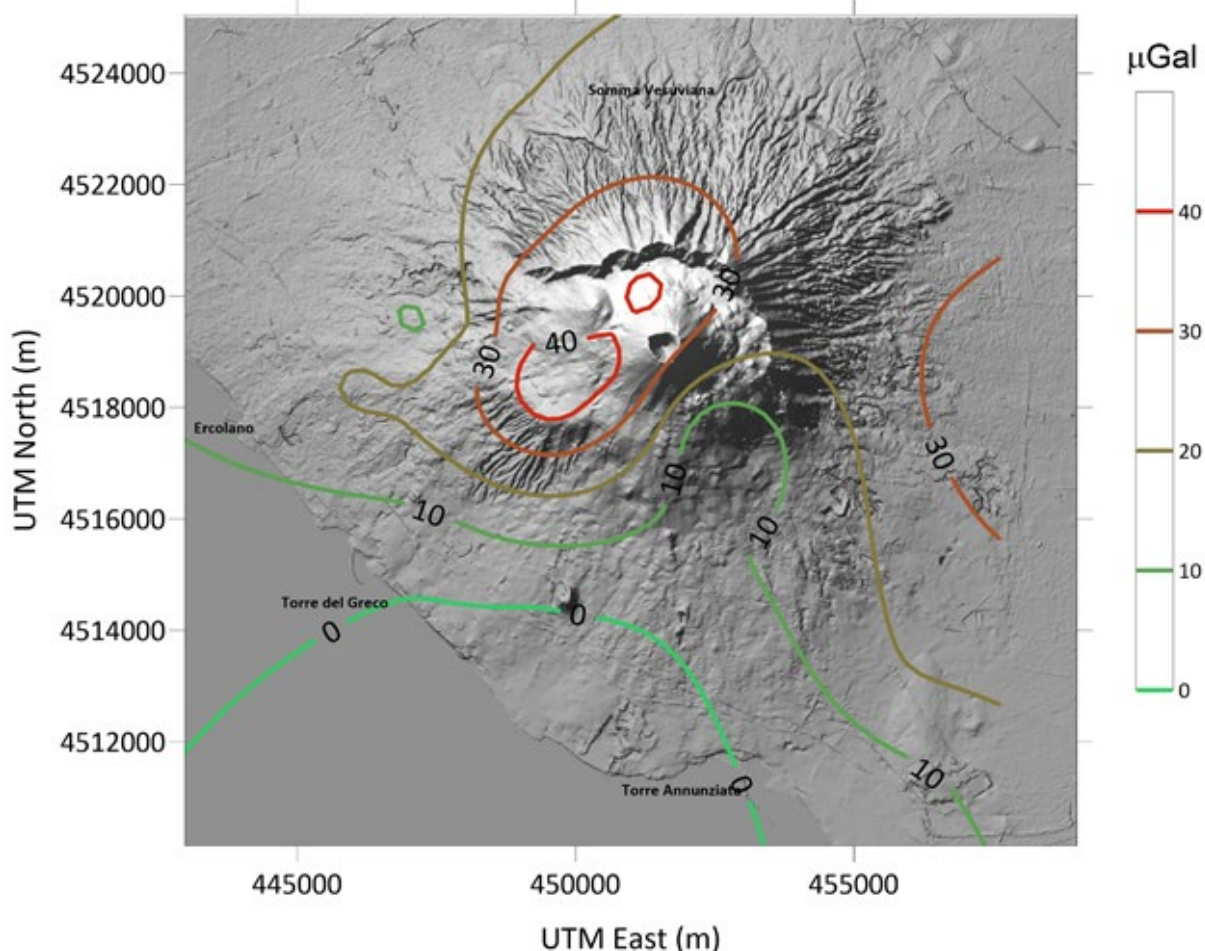


Figura 2.4.2. - Variazioni di gravità Δg , con riferimento al vertice di Napoli S. Marcellino, ottenute tra la campagna di aprile 2024 e maggio 2023. L'equidistanza delle isolinee è di $10 \mu\text{Gal}$, l'errore totale stimato sulla rete del 2023 è pari a $\pm 8 \mu\text{Gal}$ per la campagna e a $\pm 10 \mu\text{Gal}$ per la campagna 2024.

2.5 MONITORAGGIO SATELLITARE CON INTERFEROMETRIA SAR

S. Borgstrom¹, M. Polcari²

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

² INGV Osservatorio Nazionale Terremoti – Roma

Il monitoraggio interferometrico delle deformazioni del suolo nell'area Vesuviana utilizza i dati Radar ad Apertura Sintetica (SAR) acquisiti dai principali sensori e/o costellazioni satellitari attualmente operative: Sentinel-1A (S-1A) del programma europeo Copernicus, gestito dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA) e COSMO-SkyMed 1°/2° generazione (CSK/CSG) dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI).

L'analisi dei dati viene effettuata dall'Osservatorio Vesuviano in collaborazione con l'Osservatorio Nazionale Terremoti.

SENTINEL-1A (S-1A) - ANALISI MULTI-TEMPORALE

Per tale analisi sono stati utilizzati i dati in banda C del sensore Sentinel-1A dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) disponibili in rete attraverso i canali web della stessa Agenzia. L'analisi della deformazione in atto nell'area Vesuviana è stata eseguita sfruttando l'algoritmo d'interferometria differenziale denominato SBAS (Small BAseline Subset), avvalendosi di codici public domain reperibili in rete sui siti dei rispettivi sviluppatori e utilizzati su piattaforma Linux/Mac OS XV.

La successiva elaborazione ha consentito di generare mappe della velocità media di deformazione del suolo e serie temporali di deformazione lungo la linea di vista del sensore (LoS - Line of Sight) per le orbite ascendenti (01.01.2024 - 26.12.2024) e discendenti (31.12.2023 - 25.12.2024), oltre alle mappe della velocità media di deformazione del suolo lungo la componente verticale (fig.2.5.1) ed orizzontale in direzione E-W ricavate dalla scomposizione del moto, resa possibile per la disponibilità dei dataset lungo le due orbite.

Nella tabella 1 vengono riassunte le caratteristiche principali dei dataset processati.

	ASCENDENTE	DISCENDENTE
Lunghezza d'onda [cm]	5.5	
Angolo medio d'incidenza [gradi]	39	
Modalità d'acquisizione	Terrain Observation by Progressive Scan (TOPS)	
Risoluzione spaziale [m]	30 x 30	
Intervallo temporale	01.01.2024 - 26.12.2024	31.12.2023 - 25.12.2024
Immagini SLC	31	29
Interferogrammi [5 connessioni/scena]	140	130
Orbita	44	22

Tabella 1 - Dataset Sentinel-1A utilizzati per l'elaborazione interferometrica dell'area Vesuviana

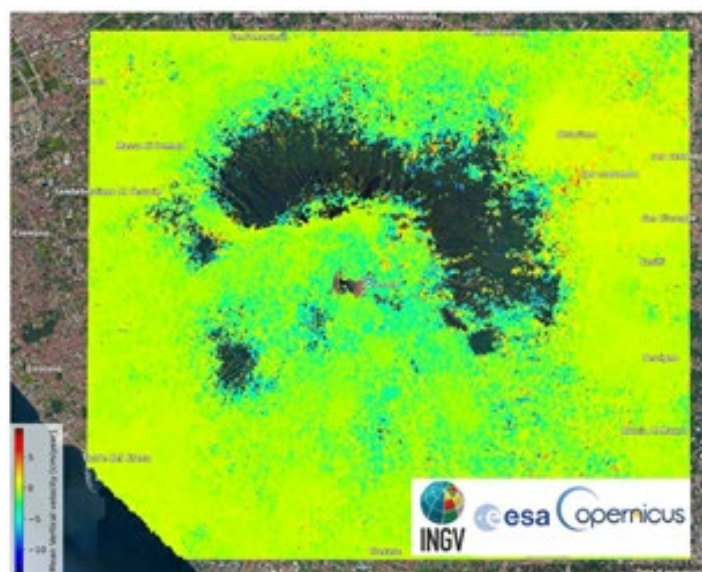


Figura 2.5.1 - Mappa della velocità media di deformazione del suolo lungo la componente verticale (Sentinel-1A, 31.12.2023 - 26.12.2024) per l'area Vesuviana.
Dati IWS - TOPS mode, orbite ascendenti (44) e discendenti (22)

La correzione del ritardo atmosferico è stata effettuata avvalendosi del modello atmosferico globale ERA-5 dello European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF).

Le orbite precise e/o preliminari utilizzate per il processamento dei dati si sono rese disponibili sui canali web dell'ESA.

Per la rimozione del contributo topografico nella fase interferometrica è stato utilizzato un modello digitale del terreno ricavato da dati SRTMGL1 (SRTM Global 1arcsec) opportunamente ridotto all'ellissoide di riferimento WGS84.

Come si evince dall'analisi della figura 2.5.1, non si evidenziano significative deformazioni del suolo nell'area Vesuviana imputabili a fenomeni vulcanici nel 2024.

Si confermano inoltre valori di subsidenza di entità molto contenuta nella parte alta dell'edificio vulcanico, in prossimità della zona craterica, in buon accordo con i valori misurati dalle stazioni GNSS localizzate nell'area.

3 - MONITORAGGIO VULCANOLOGICO

Le attività di monitoraggio vulcanologico vengono svolte con una Rete Permanente di Telecamere all'infrarosso termico e con campagne di misure con Termocamera Mobile, Termocoppia e Drone.

3.1 RETE PERMANENTE MONITORAGGIO TERMICO AD IMMAGINE

G. Vilardo¹, F. Sansivero¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano – Napoli

Nell'area vesuviana è operativa una stazione permanente per l'acquisizione di immagini all'infrarosso termico della rete di sorveglianza TIRNet, ubicata sul bordo del cratere del Vesuvio (Figura 3.1.1, Tabella 3.1.1). Tale stazione inquadra il versante interno sud-occidentale del cratere del Vesuvio, che risulta essere interessato da una significativa anomalia termica.

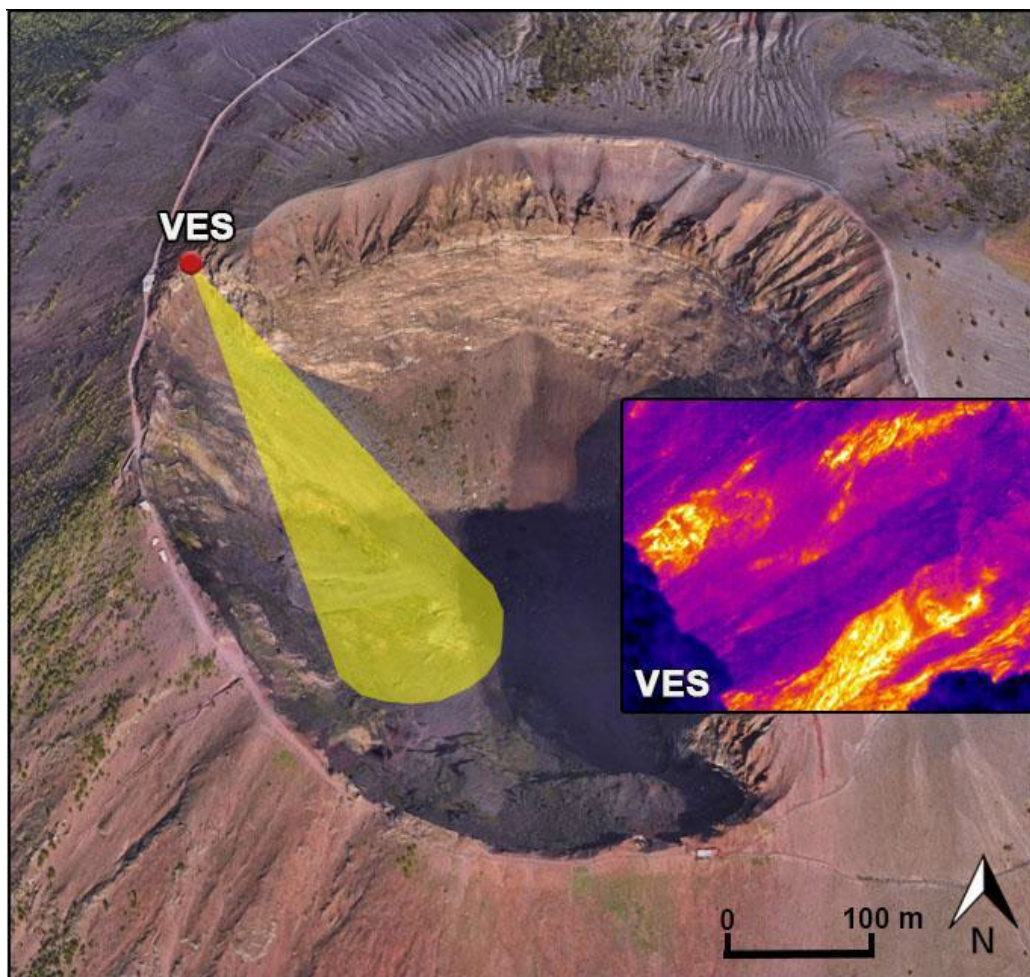


Figura 3.1.1 - Mappa della stazione della Rete Permanente di Monitoraggio Termico ad Immagine TIRNet, operante al Vesuvio.

Tabella 3.1.1 - Stato attuale della rete permanente di monitoraggio termico ad immagine operante al Vesuvio.

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
VES	40.8214N 14.4219E 1165m	Cratere Vesuvio Bordo nord-occidentale	Luglio 2004 Aggiornamenti del sensore: Giugno 2019	Termocamera FLIR A655 (640 x 480) FoV: 25° x 19°	Remote Monitoring System ICARO	Wi-Fi

La stazione, operativa sin da luglio 2004, ha subito diverse modifiche e periodi di malfunzionamento. Nella seconda metà del mese di giugno 2019 è stata sostituita la termocamera con un modello a risoluzione maggiore (640 x 480 pixel).

In Figura 3.1.2 è riportata l'elaborazione delle serie temporali relative alle acquisizioni notturne effettuate con la termocamera 640x480 nel periodo 2021-2024. Ai valori di temperatura massima delle serie temporali è stata rimossa la componente stagionale mediante processamento con l'algoritmo di destagionalizzazione analitica STL (Seasonal Trend Decomposition), implementato nel software A.S.I.R.A. di elaborazione dei dati IR della Rete TIRNet (Sansivero et al., 2019; Sansivero & Vilardo, 2024).

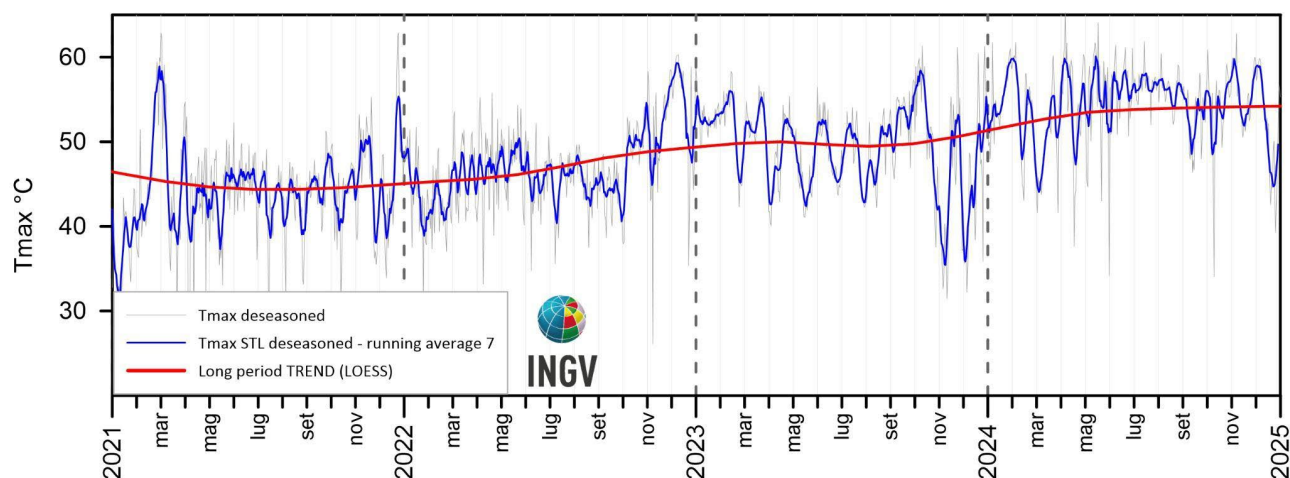


Figura 3.1.2 - Stazione Vesuvio (VES). Serie temporali dei valori di temperatura massima giornaliera rilevata nelle immagini IR destagionalizzate mediante applicazione dell'algoritmo STL [Trend + Residuo (grigio); media settimanale (blu); trend a lungo termine (rosso)].

Il cronogramma della serie temporale delle temperature massime destagionalizzate mostra nel 2024 un trend caratterizzato da sensibili oscillazioni, con un lieve aumento dei valori nella prima metà dell'anno che comporta un aumento delle temperature medie di circa 4 °C rispetto a quelle registrate nel 2023. Da giugno 2024 si registra un andamento fondamentalmente stabile sempre caratterizzato da consistenti oscillazioni.

3.2 MONITORAGGIO TERMICO CON TERMOCAMERA MOBILE E TERMOCOPPIA

E. Marotta¹, R. Avino¹, G. Avvisati¹, P. Belviso¹, A. Carandente¹, R. Peluso¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano – Napoli

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 maggiore temperatura 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.

Da dicembre 2020 si utilizza una nuova termocamera FLIR T1020 a maggiore risoluzione (1024 x 768 pixel). Quando possibile, contemporaneamente alla FLIR T1020 si continua ad utilizzare anche la FLIR SC640. La doppia misura consente di calibrare i valori rilevati con la nuova termocamera.

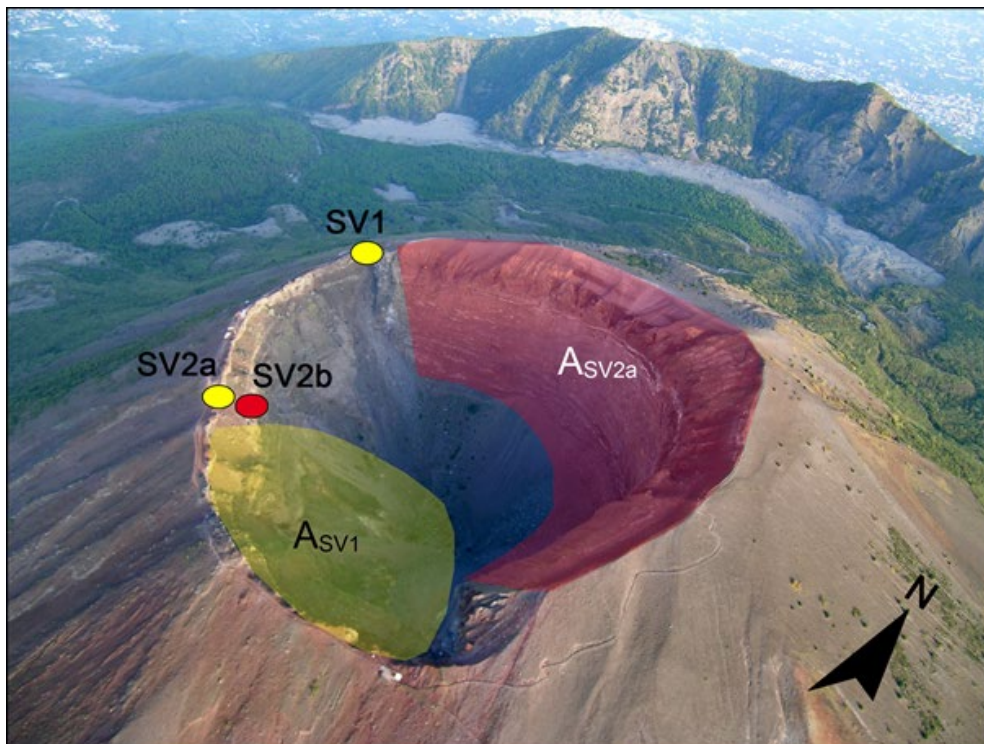


Figura 3.2.1 – Cratere del Vesuvio. In giallo sono riportati i punti stazione dai quali vengono effettuati i rilievi con telecamera termica, in rosso quello nel quale vengono effettuati anche rilievi con termocoppia rigida. L'area in rosso (ASV2a) è quella ripresa dal punto stazione SV2a, mentre l'area in giallo (ASV1) è ripresa dal punto stazione SV1.

Da maggio 2022, in alcuni siti e quando le condizioni lo consentono, le misure di temperatura vengono rilevate anche con l'ausilio di un drone equipaggiato con una termocamera FLIR VUEPRO ad alta risoluzione (640x512 pixel) e precisione ± 5 °C.

Nel 2024, a causa di impedimenti amministrativi non è stato possibile effettuare voli con drone.

I rilievi effettuati nel 2024, in generale, non mostrano significative variazioni di temperatura massima e modifiche nella distribuzione areale del campo fumarolico nei diversi punti di misura.

La comparazione delle fotocomposizioni di immagini termiche del versante interno orientale del cratere, riprese dal punto stazione SV2a (Figura 3.2.1) nel 2024, non evidenzia significative modifiche nella distribuzione areale del campo fumarolico (Figura 3.2.2b, b1, b2).

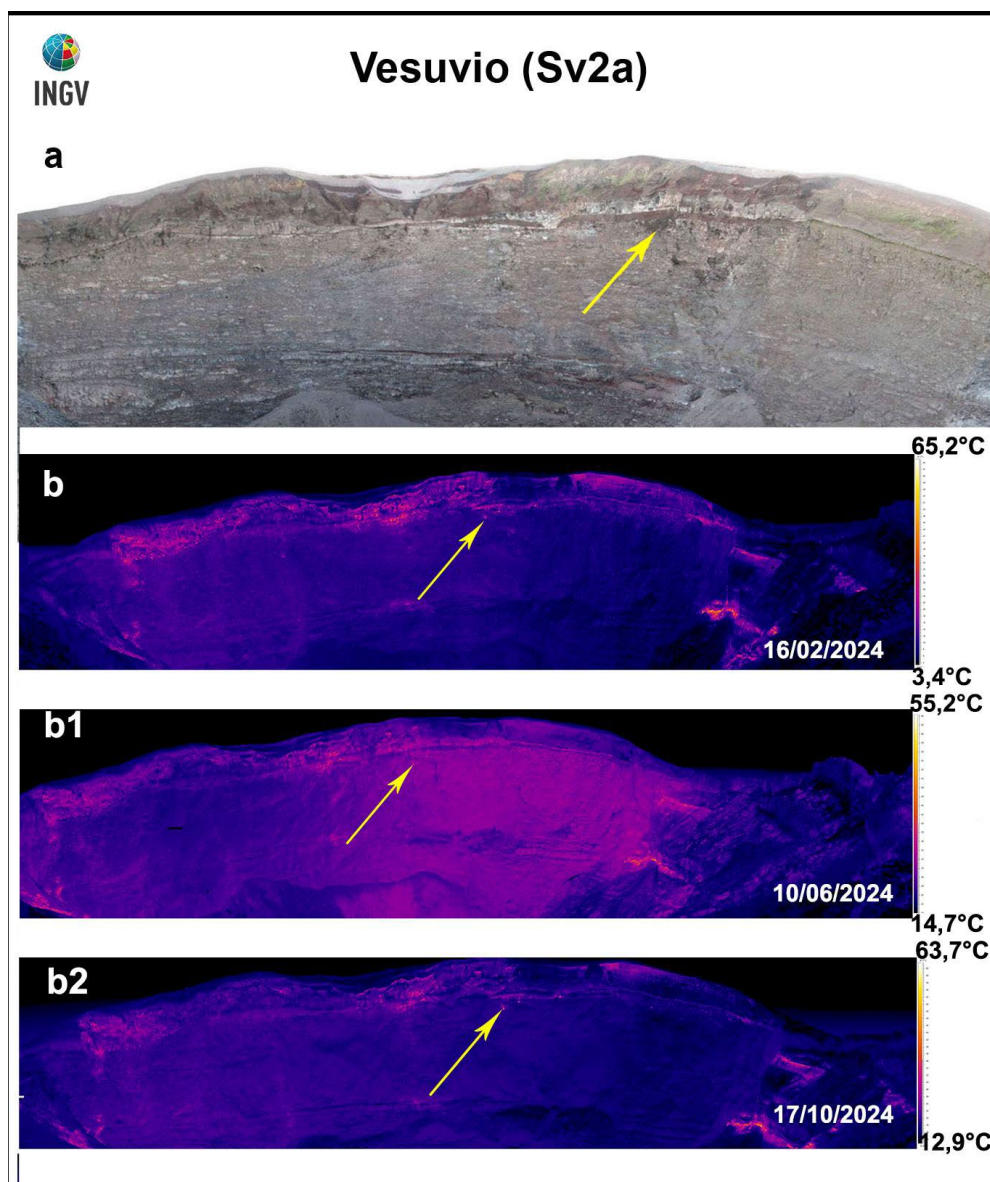


Figura 3.2.2 – Settore orientale del cratere del Vesuvio. Fotocomposizioni di immagini nel visibile (a) e delle corrispondenti immagini termiche relative al 16/02/2024 (b), 10/06/2024 (b1) e 17/10/2024 (b2) dal punto stazione SV2a di Fig. 3.2.1.

La freccia gialla in Figura 3.2.2 indica il punto costantemente a più alta temperatura (che nel 2024 è variato da circa 55 a circa 70 °C), il cui valore è piuttosto stabile all'interno delle variazioni stagionali.

Anche la comparazione di fotocomposizioni delle immagini termiche effettuate dal punto stazione SV1 (Figura 3.2.1) durante il 2024 non evidenzia significative modifiche nella distribuzione areale del campo fumarolico (Figura 3.2.3b, b1, b2). La freccia gialla in figura 3.2.3a indica il punto costantemente a più alta temperatura (che varia da circa 55 a circa 69 °C). Questa temperatura massima non mostra significative variazioni rispetto agli anni passati fatta eccezione per le variazioni stagionali.

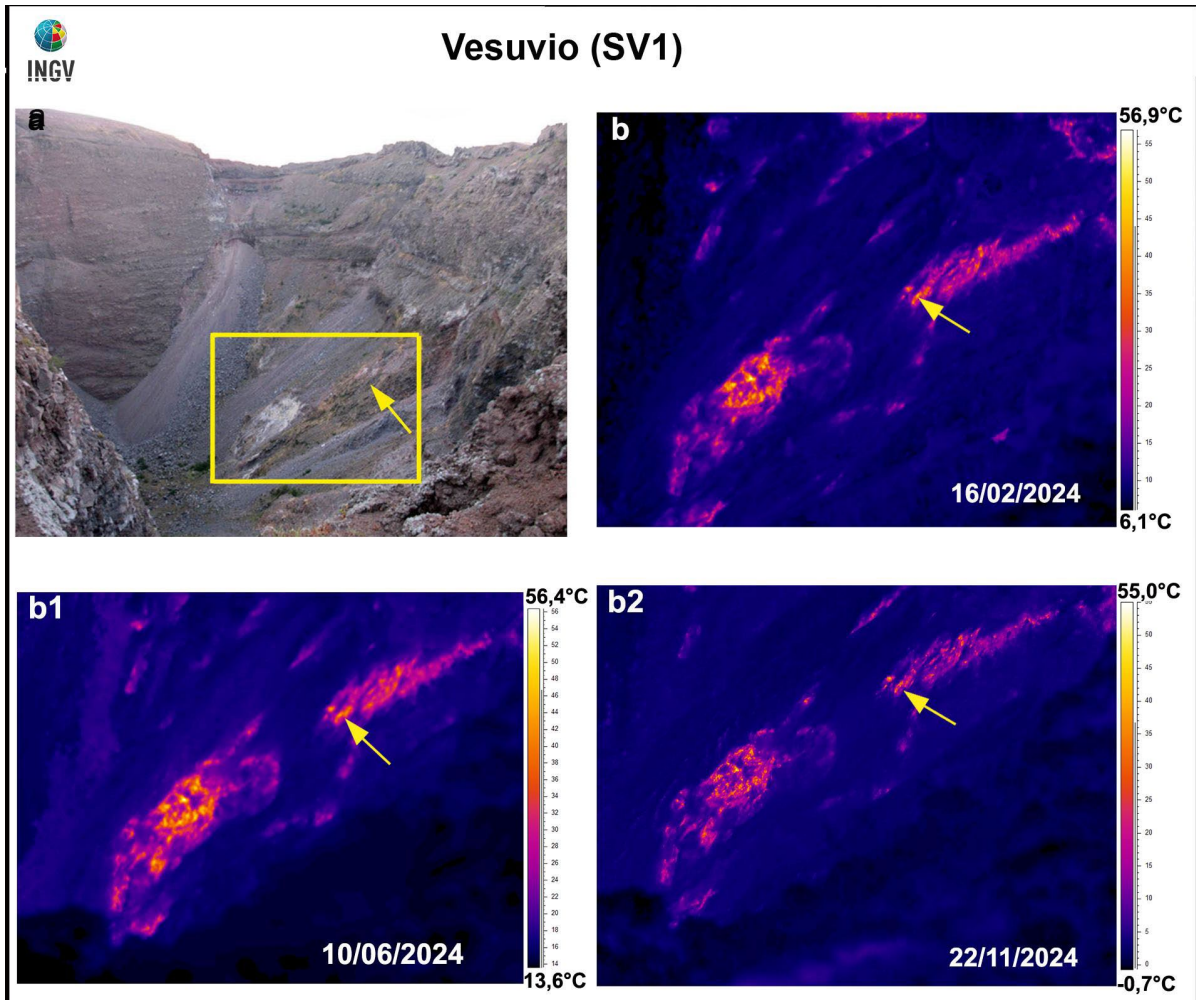


Figura 3.2.3 – Settore meridionale del cratere del Vesuvio. Immagini nel visibile (a) e immagini termiche, relative all’area ricadente nel riquadro giallo (a), riprese il 16/02/2024 (b), il 10/06/2024 (b1) e il 22/11/2024 (b2) dal punto stazione SV1 di Figura 3.2.1; la freccia gialla indica l’area che costantemente è a più alta temperatura.

I valori di temperatura massima della fumarola del punto stazione SV2b (Figura 3.2.1), nel settore meridionale del cratere del Vesuvio, sono riportati in Figura 3.2.4. In generale le temperature rilevate rientrano nelle medie stagionali degli anni precedenti.

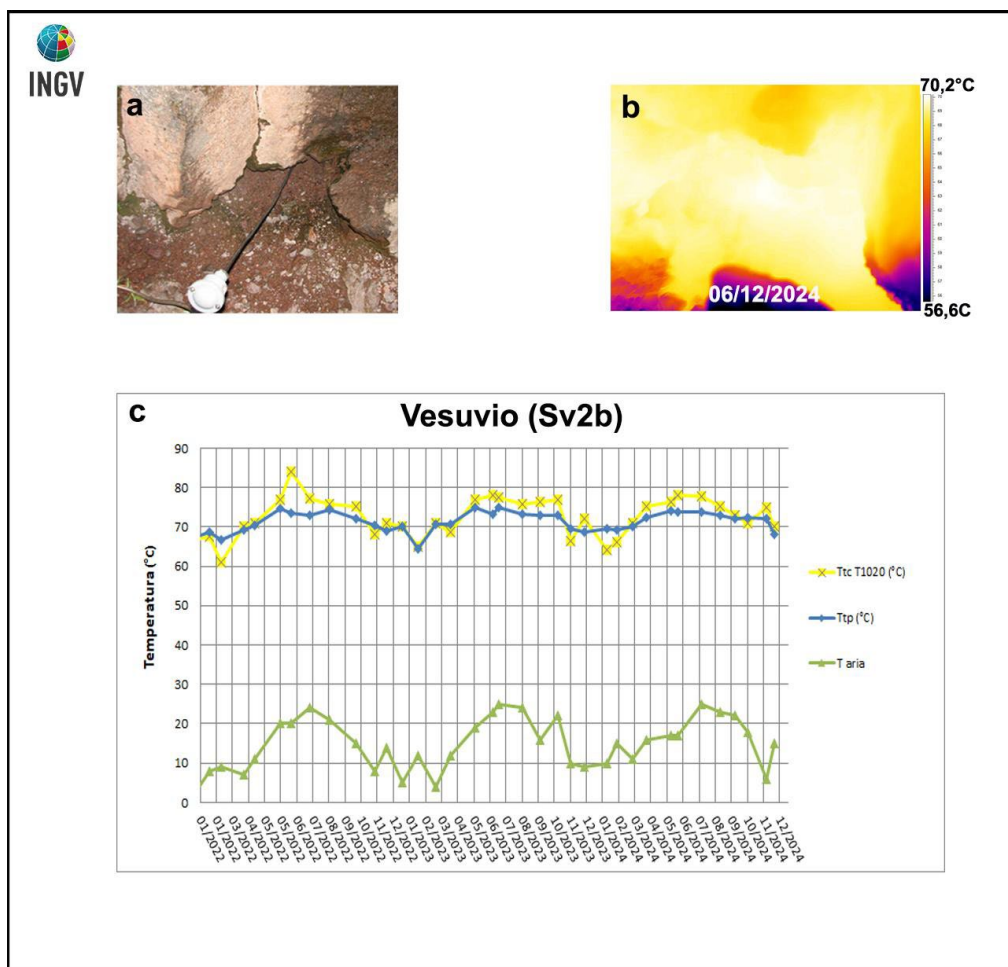


Figura 3.2.4 - Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese al punto SV2b di Figura 3.2.1, di una fumarola ubicata sul settore occidentale del cratere del Vesuvio. Valori massimi di temperatura con termocamera FLIR T1020 (TtcT1020) e valori di temperatura della termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell'aria (Taria) misurata nel momento del rilievo termico, da gennaio 2022 a dicembre 2024 (c).

4 - MONITORAGGIO GEOCHIMICO

Le attività di sorveglianza geochimica al Vesuvio sono svolte dalla Sezione di Napoli “Osservatorio Vesuviano” e dalla Sezione di Palermo.

4.1 MONITORAGGIO GEOCHIMICO DELLA SEZIONE DI NAPOLI “OSSERVATORIO VESUVIANO”

S. Caliro¹, R. Avino¹, A. Carandente¹, E. Cuoco¹, C. Minopoli¹, F. Rufino¹, A. Santi¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano – Napoli

La Rete di Monitoraggio Geochimico del Vesuvio (Figura 4.1.1) è costituita da due stazioni multiparametriche (GEMMA): FLXOV6, installata in area bordo cratere (settore SW) e FLXOV7 installata in area di fondo cratere, entrambe per la misura in continuo del flusso di CO₂ dal suolo, della temperatura della fumarola principale e del gradiente di temperatura del suolo. In Tabella 4.1.1 sono riportate le stazioni geochimiche installate in area vesuviana.

La stazione FLXOV7 è stata irreparabilmente danneggiata da una frana e sarà a breve sostituita con una nuova stazione del nuovo tipo (V15), acquistate nell’ambito dei progetti infrastrutturali PON GRINT e POR Preserve, che andranno gradualmente a sostituire tutte le stazioni della rete geochimica. Inoltre, è stata installata (2023) a bordo cratere settore NW una stazione multiparametrica attualmente in fase di test.



Figura 4.1.1 - Ubicazione della stazione multiparametrica FLOX6 (bordo cratere), della stazione FLXOV7 (fondo cratere) e dei siti dove sono eseguite le attività di sorveglianza geochimica in area craterica. In particolare, sono riportate le principali fumarole di bordo cratere (B1-B3) e di fondo cratere (FC2), sono inoltre riportati i punti fissi per la misura del flusso di CO₂ dal suolo e della temperatura del suolo, in area bordo cratere (simboli bianchi) e in area di fondo cratere (simboli gialli).

Tabella 4.1.1 - Rete Geochimica dell'Osservatorio Vesuviano al Vesuvio.

Stazione	Coordinate	Località	Data Installazione	RETE	Parametri monitorati
FLXOV6	40.8202N 14.4233E 1155 m	Vesuvio Bordo Cratere	2015	OV	Flusso di CO ₂ , multiparametrica
FLXOV7 sarà sostituita da V15	40.8212N 14.4254E	Vesuvio Fondo Cratere	2017	OV	Flusso di CO ₂ , multiparametrica
V12	40.8226N 14.4288E	Vesuvio bordo cratere NE	2023	OV	Multiparametrica, meteo

Le attività di sorveglianza geochimica effettuata dall'Osservatorio Vesuviano sono di seguito riportate:

- Campagne periodiche di campionamento dei gas fumarolici emessi dalla fumarola FC5 sita a fondo cratere del Vesuvio, analisi della composizione chimica (H₂O, CO₂, H₂S, H₂, Ar, N₂, CH₄, He) ed isotopica (⁴⁰Ar/³⁶Ar, ^{TM15}N₂, ^{TM13}CCO₂; ^{TM18}O_{CO2}, ^{TM2}H₂O, ^{TM18}O_{H2O}).
- Campagne periodiche di misura del flusso di CO₂ e della temperatura del suolo a 10 cm di profondità, su una maglia di punti fissi in area di bordo cratere (area anemometro) del Vesuvio.
- Campagne periodiche di campionamento delle maggiori fumarole di bordo cratere e analisi della composizione chimica.
- Misura in continuo del flusso di CO₂ dal suolo (ogni 2 ore), della temperatura della fumarola principale, del gradiente di temperatura del suolo, della pressione e della temperatura atmosferica (ogni 10 minuti) tramite le stazioni multiparametriche FLXOV6 installata in area bordo cratere (settore SW) e la stazione FLXOV7 installata in area di fondo cratere.

La stazione FLXOV6 è basata sull'acquisitore del tipo "GEMMA" sviluppato presso la sezione "Osservatorio Vesuviano" di Napoli, sono collegate via wi-fi alla rete di monitoraggio e trasmettono i dati in tempo reale alla Sala di Monitoraggio OV, mentre la stazione che sostituirà la FLXOV7 è del nuovo tipo acquistate nell'ambito dei progetti infrastrutturali PON GRINT e POR Preserve.

COMPOSIZIONE CHIMICA DELLE FUMAROLE

Una dettagliata descrizione del modello geochimico interpretativo del sistema idrotermale del Vesuvio è riportata nel lavoro scientifico Chiodini et al., (2001) e nei precedenti rapporti di sorveglianza in cui sono state segnalate variazioni della composizione delle fumarole interne al cratere. In particolare, a partire dal terremoto del 9 ottobre 1999 (Md=3.6) sono stati misurati per 2 anni aumenti nel tempo sia del rapporto He/CO₂ che della p_{CO2} stimata sulla base di geindicatori gassosi. Contemporaneamente si è verificata la diminuzione del rapporto H₂/CO₂ e l'incremento del rapporto CO₂/CH₄ (Fig. 2). Tali variazioni sono state interpretate come un

incremento dell'input di fluidi magmatici più ossidanti, poveri in CH₄ e ricchi in He nel sistema idrotermale (Caliro et al., 2011). A partire dall'autunno 2002, le composizioni chimiche delle fumarole hanno mostrato un graduale ritorno dei valori verso le condizioni pre-1999. Una dettagliata descrizione delle variazioni e delle possibili interpretazioni sono riportate nel lavoro scientifico Caliro et al. (2011).

A causa delle copiose precipitazioni avvenute durante gli scorsi anni, si sono verificate diverse frane in area craterica del Vesuvio. Una frana ha interessato l'area di emissione della fumarola FC2 di fondo cratere rendendo impossibile il campionamento dei fluidi. In alternativa, è stata campionata un'altra fumarola denominata FC5 (Chiodini et al., 2001), che aveva mostrato caratteristiche simili, situata in prossimità della stazione geochimica di fondo cratere (Fig. 4.1.1), ma di cui non esiste un record continuo della composizione chimica. I dati analitici comparati con quelli della fumarola FC2 nei diagrammi di (Fig. 4.1.2), mostrano composizioni simili e variazioni composizionali contemporanee, pertanto i dati composizionali di questa fumarola vengono utilizzati come una valida alternativa nel monitoraggio del sistema idrotermale. Analogamente le stime di temperatura e di pressione parziale di CO₂ di equilibrio di questi campioni (Fig. 4.1.3) mostrano una diminuzione dei valori, supportando il trend pluriennale di diminuzione dell'attività idrotermale all'interno dell'area craterica del Vesuvio.

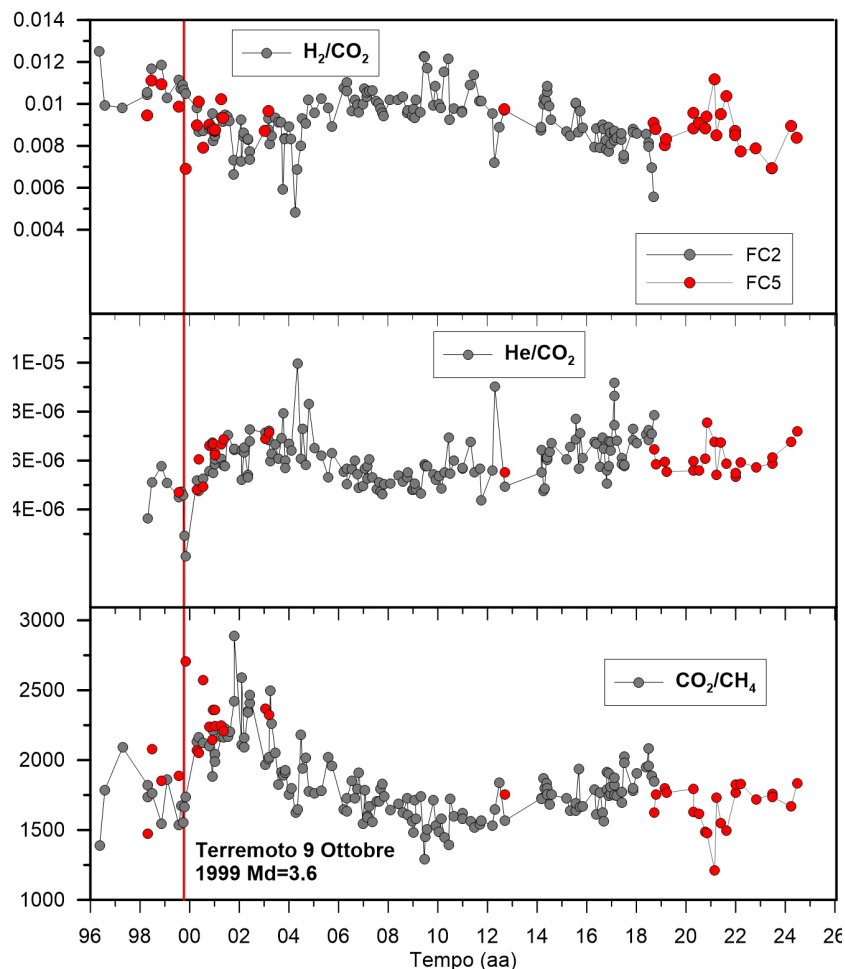


Figura 4.1.2 - Variazioni composizionali delle fumarole FC2 (simboli grigi) e FC5 (simboli rossi) nel periodo 1996-2024.

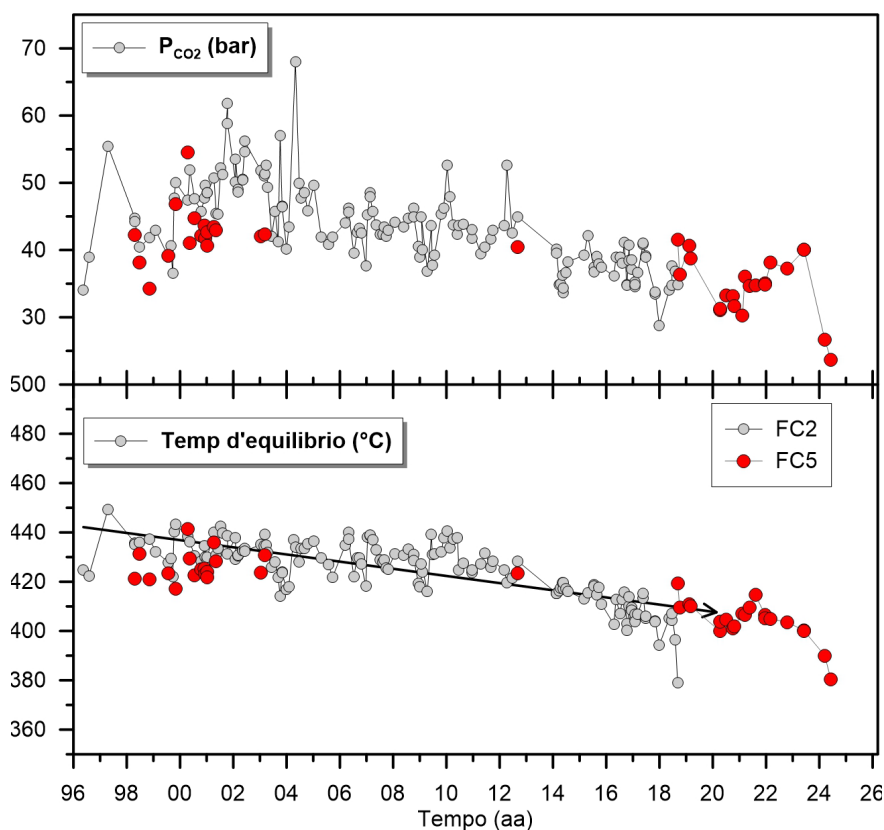


Figura 4.1.3 - Cronogramma dei valori di equilibrio della temperatura e pressione parziale di CO₂ stimati per il sistema idrotermale del Vesuvio sulla base della composizione della fumarola FC2 (simboli grigi) e FC5 (simboli rossi). Le stime per entrambe le fumarole indicano una diminuzione nel tempo dei valori di equilibrio.

Va comunque segnalato che nei campioni degli ultimi anni si registra un lieve aumento del rapporto CO₂/CH₄ ed He/CO₂, rispetto ai valori più bassi raggiunti nel periodo 2009-2010, che potrebbe essere legato ad un aumento nella frazione di fluidi ossidanti (magmatici?).

Tuttavia, le composizioni dei campioni mostrano una diminuzione dei valori di equilibrio di temperatura e pressione parziale di CO₂ (stime basate sul CO) rispetto ai periodi precedenti, rientrando in un trend pluriennale di diminuzione dell'attività idrotermale all'interno del cratere del Vesuvio (Figura 4.1.3).

La composizione delle fumarole di bordo cratere, costituita essenzialmente da una miscela di aria e del componente idrotermale profondo (Caliro et al., 2011), nei campioni misurati nel 2024 non ha mostrato variazioni significative rispetto ai periodi precedenti (Figura 4.1.4).

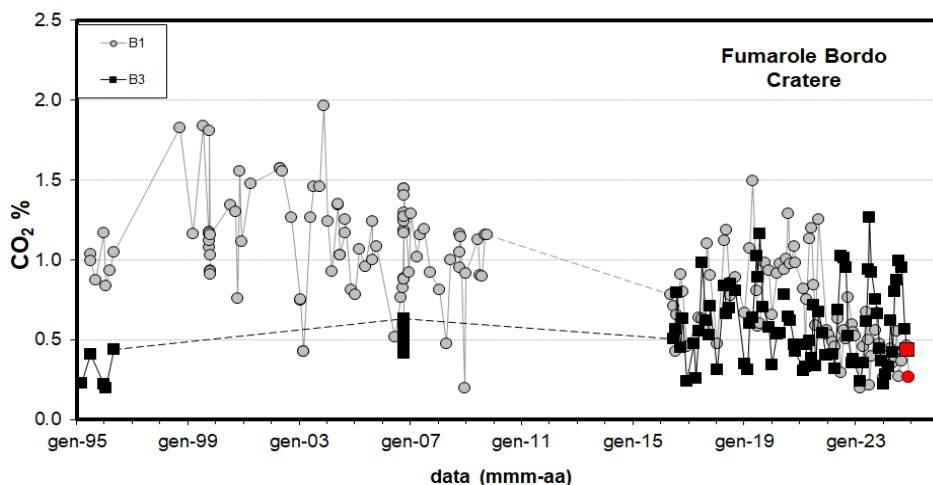


Figura 4.1.4 - Variazione temporale della concentrazione di CO₂ delle fumarole di bordo cratere.

MISURE DI FLUSSO DI CO₂ E TEMPERATURA AL SUOLO

La stazione multiparametrica, installata in area bordo cratere (settore SW), misura in continuo:

- flusso di CO₂ dal suolo
- gradiente di temperatura nel suolo
- temperatura della maggiore emissione fumarolica dell'area
- pressione atmosferica
- temperatura dell'aria

I parametri misurati nel periodo di interesse non hanno mostrato variazioni significative (Figura 4.1.5). Le lievi variazioni osservate sono da mettersi in relazione a particolari eventi meteorologici (pioggia, vento forte, bassa pressione etc.).

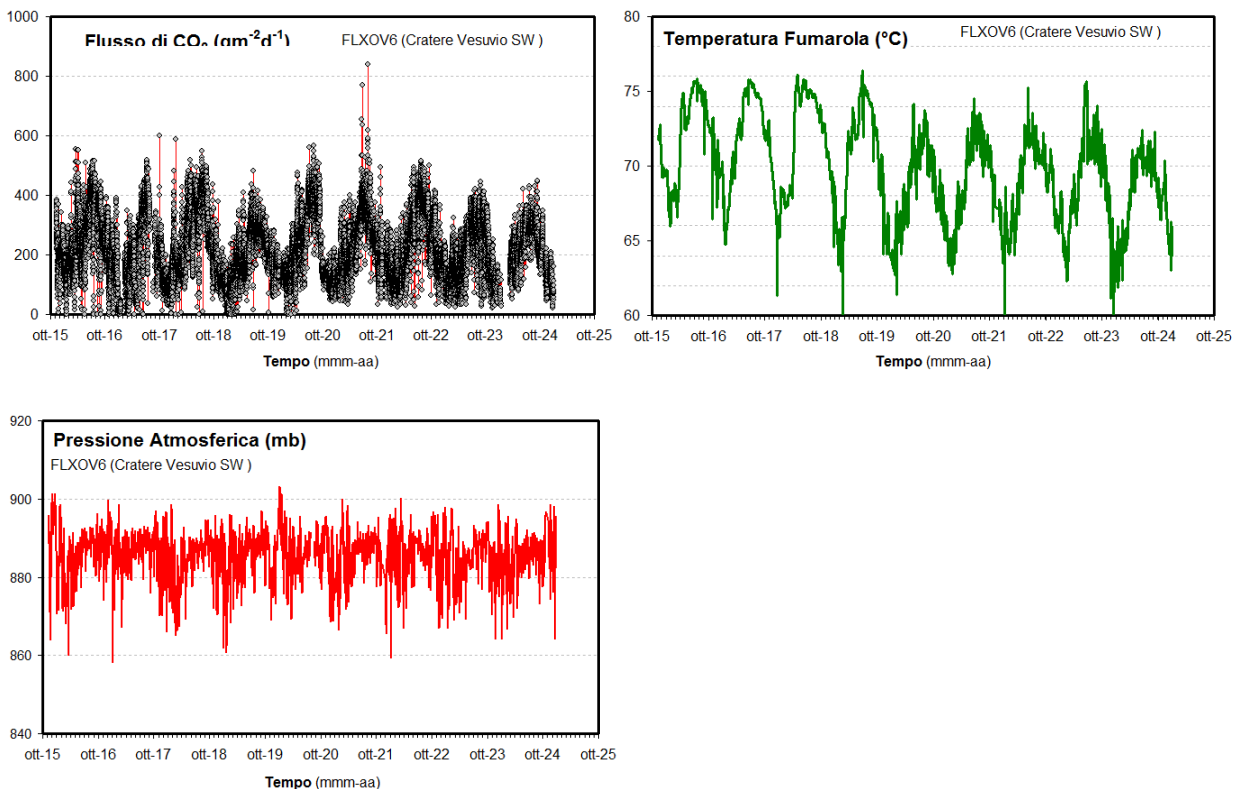
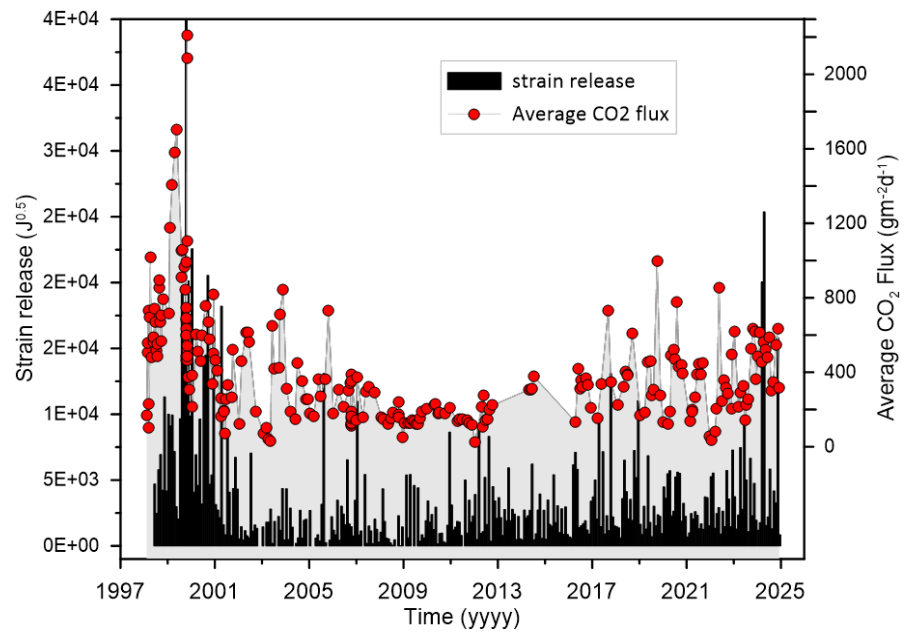


Figura 4.1.5 - Serie temporali di alcuni parametri misurati dalla stazione geochimica FLXOV6 installata in area bordo cratere del Vesuvio (settore SW). I valori, eccetto il flusso di CO₂ dal suolo, sono riportati come medie giornaliere.

Le campagne periodiche di misura del flusso di CO₂ e della temperatura del suolo a 10 cm di profondità, su una maglia di 15 punti fissi in area di bordo cratere (area anemometro, Fig. 4.1.1) del Vesuvio, vengono eseguite dal febbraio 1998. I valori medi dei flussi di CO₂ di ciascuna campagna sono riportati, insieme allo strain release (una funzione dell'energia sismica), nel cronogramma di Fig. 4.1.6, dove è riconoscibile un primo periodo dall'inizio 1998 alla fine del 1999 caratterizzato da un trend crescente del flusso di CO₂ e da una maggiore sismicità (culminata con l'evento del 9 ottobre 1999, M_{dmax} = 3.6) e un periodo successivo all'evento sismico dell'ottobre 1999, caratterizzato da valori di flusso decrescenti e mediamente più bassi.

Figura 4.1.6 - Cronogramma del valore medio del flusso di CO₂ misurato in 15 punti fissi del bordo craterico del Vesuvio, area anemometro. Nel grafico è anche riportato lo “strain release” ovvero una funzione dell’energia legata agli eventi sismici.



Dal 2017 si registra un lieve aumento del valore medio dei flussi misurati, contemporaneo a un lieve aumento, rispetto ai periodi precedenti, dell’energia sismica rilasciata.

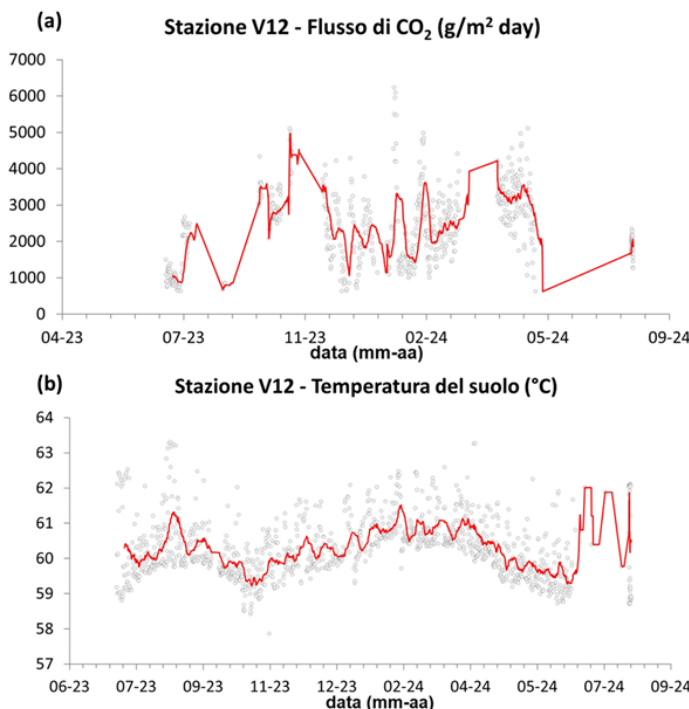


Figura 4.1.7 - Serie temporale del flusso dal suolo di CO₂ e della temperatura del suolo; media mobile a 24h indicata dalla linea rossa

La nuova stazione V12, attualmente installata sul fianco NE del Vesuvio è programmata per effettuare un’acquisizione ogni 6 ore. Vista la composizione chimica dei fluidi del Vesuvio (presenza di vapore acqueo) e la natura intrinseca del sito di installazione, sicuramente tale stazione risulta essere la più problematica nella fase di gestione e manutenzione. I valori di flusso di CO₂ misurati fino ad oggi variano tra 623 e 6231 g/m²day con un valore medio di 2532 g/m²day (sd=966) (Fig.6a). I valori di temperatura al suolo misurati fino ad oggi variano tra 57 e 63 °C con un valore medio di 60 °C (sd=0.82) (Fig.4.1.17).

4.2 MONITORAGGIO GEOCHIMICO DELLA SEZIONE DI PALERMO

S. Bellomo¹, W. D’Alessandro¹, C. Federico¹, L. La Pica¹

¹ INGV – Sezione di Palermo

Le attività di sorveglianza geochimica del Vesuvio svolte dalla Sezione di Palermo sono consistite in campionamenti periodici delle acque di alcuni pozzi e sorgenti, in gran parte sul fianco sud-occidentale del vulcano e in misure continue della temperatura della falda acquifera.

La rete geochimica della Sezione di Palermo nell'area vesuviana consta di due stazioni (Figura 4.2.1; Tabella 4.2.1) che misurano la temperatura delle falde sotterranee, installate in un pozzo (P14) ed in una sorgente (Olivella) con registrazione locale dei dati.

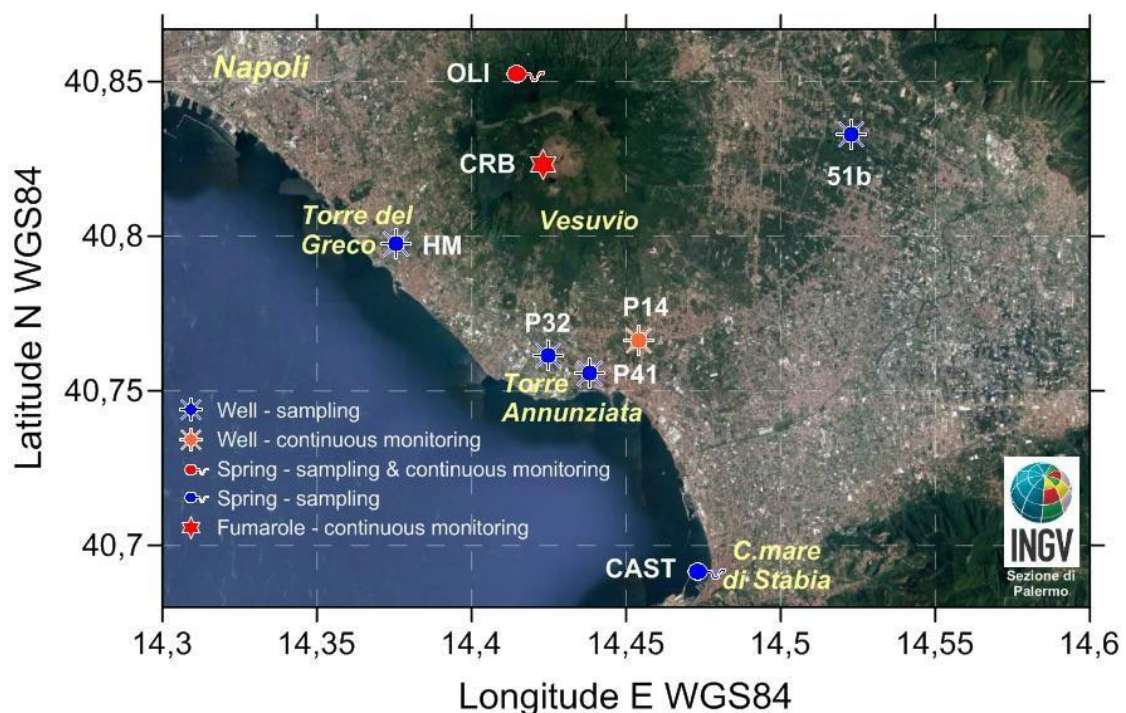


Figura 4.2.1 - Localizzazione dei siti di campionamento della Sezione di Palermo al Vesuvio.

Tabella 4.2.1 - Rete Geochimica della Sezione di Palermo al Vesuvio.

Stazione	Coordinate	Località	Data Installazione	Parametri monitorati
Sorgente Olivella OLI	40.8521N 14.4186E 372 m	Sant'Anastasia	2003	Temperatura della falda acquifera sotterranea.
Pozzo 14 P14	40.7661N 14.4543E 63 m	Torre Annunziata	2004	Temperatura della falda acquifera sotterranea.

L'attività di sorveglianza dell'acquifero del Vesuvio è stata condotta sino al 2016 su 8 siti (pozzi e sorgenti) ubicati sui fianchi dell'edificio vulcanico. Dal 2017 il numero dei siti monitorati si è ridotto a 7, in quanto in uno di questi la proprietà ha dismesso il sistema di pompaggio dell'acqua, rendendo impossibile il campionamento. Di seguito si riporta la tabella descrittiva dei siti che costituiscono attualmente la rete di campionamento delle falde sotterranee, indicante i nuovi codici identificativi che saranno da ora in poi utilizzati in sostituzione dei vecchi, allo scopo di allinearli a quelli del database della Sezione di Palermo, contenente il record completo dei dati geochimici sulle falde vesuviane (Tabella 4.2.2).

Tabella 4.2.2 - Rete di campionamento delle falde sotterranee della Sezione di Palermo al Vesuvio.

Nuovo codice	Vecchio codice	Tipologia	Dati chimico-isotopici	Monitoraggio continuo
OLI	47	Sorgente	SI	SI
HM	29	Pozzo	SI	NO
P32	19	Pozzo	SI	NO
P41	13	Pozzo	SI	NO
51b	1	Pozzo	SI	NO
P14	14	Pozzo	NO	SI
CAST	70	Sorgente	SI	NO

Al momento del prelievo sono misurati i principali parametri chimico-fisici: temperatura, conducibilità elettrica, pH, potenziale redox. Sui campioni è stata effettuata l'analisi chimica dell'acqua (elementi maggiori) e dei gas disciolti (H₂, O₂, N₂, CO, CH₄, CO₂).

In 2 dei 7 siti sopra indicati, OLI e P14 (Fig. 4.2.1), viene effettuato il monitoraggio continuo della temperatura dell'acqua (dati disponibili dal 2004), con registrazione e download locale dei dati, allo scopo di valutare eventuali variazioni dell'input termico nella falda meteorico-idrotermale del Vesuvio.

I dati acquisiti sono immagazzinati in appositi database e disponibili, in forma protetta, al personale della Sezione di Palermo e resi pubblici attraverso relazioni e/o pubblicati su riviste specializzate nazionali ed internazionali.

Dei siti di monitoraggio, 3 sono localizzati sul fianco meridionale del vulcano, dove sono state identificate le zone di più intensa risalita di fluidi vulcanici, 1 ciascuno sui fianchi occidentale, settentrionale ed orientale, in prossimità di strutture tettoniche attive, ed uno all'esterno della struttura vulcanica (CAST), in prossimità di una discontinuità tettonica ed utilizzato come termine di confronto (Figura 4.2.1).

I siti selezionati per la sorveglianza presentano caratteristiche peculiari e sono rappresentativi dell'eterogeneità geochimica dell'acquifero vesuviano. Si tratta di acque fredde o debolmente termali ($7 < T^{\circ}\text{C} < 24.1$), di salinità compresa tra 500 e 3000 mg/l e pH tra 5.5 e 8.3.

Tra i parametri misurati si riportano in forma grafica quelli che più direttamente forniscono informazioni utili a valutare lo stato di attività del sistema vulcanico, essendo legati al flusso dei fluidi di origine profonda, magmatica e/o idrotermale: la temperatura

delle acque sotterranee e la concentrazione dello ione bicarbonato, la cui origine è in gran parte legata alla dissoluzione e idrolisi della CO_2 ; i grafici relativi sono riportati nelle Figure 4.2.2 e 4.2.3.

Le osservazioni sono aggiornate al 17/10/2024, data dell'ultima campagna di misure. Nel 2024 sono state eseguite due campagne di campionamento che si sono svolte a metà marzo ed a metà ottobre 2024.

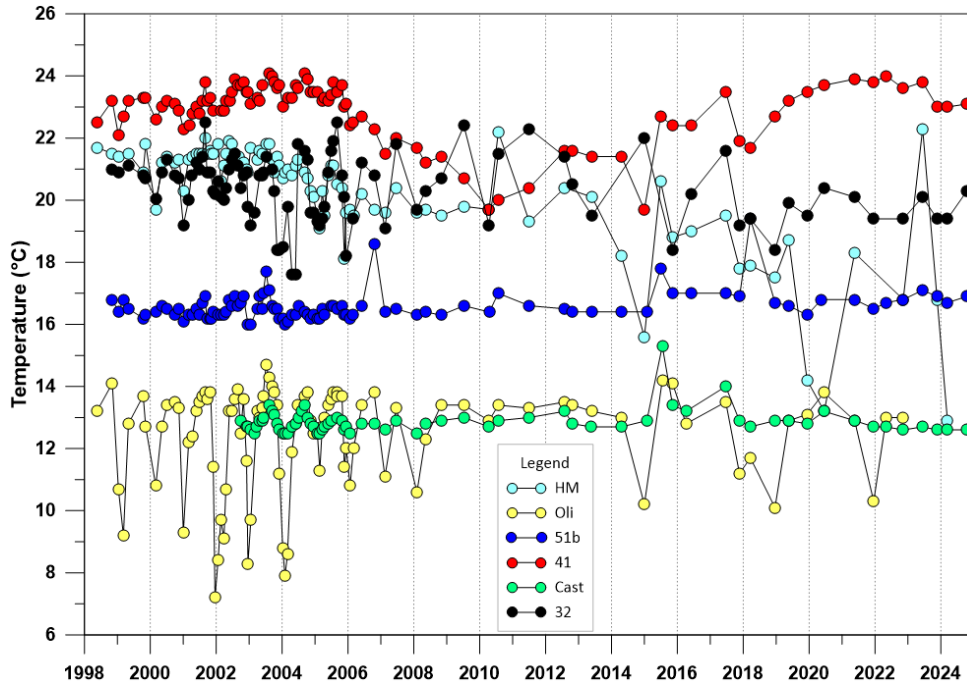


Figura 4.2.2 -
Variazioni temporali
della temperatura
delle falde
sotterranee.

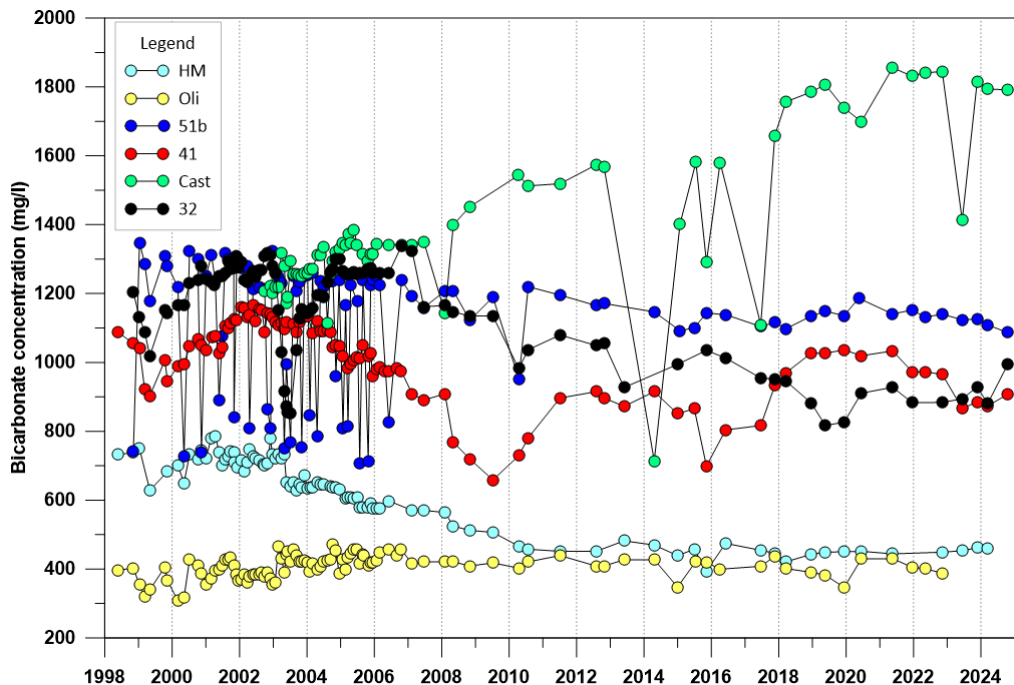


Figura 4.2.3 -
Variazioni
temporali della
concentrazione
dello ione
bicarbonato
nelle acque
sotterranee.

A causa di frane la via di accesso alla sorgente Olivella risulta molto pericolosa e non è stato possibile effettuare il campionamento e scaricare di conseguenza i dati della stazione di temperatura in continuo.

I dati di temperatura misurati a partire dal 1998, non mostrano variazioni di rilievo, le variazioni in tutti i siti sono in linea con le oscillazioni medie registrate nell'intero periodo di osservazione.

Le concentrazioni dello ione bicarbonato non mostrano variazioni di rilievo, fatta eccezione per il sito **Cast** che mostra un trend in aumento correlato al graduale incremento di CO₂ disciolta (Figg. 4.2.3 e 4.2.4).

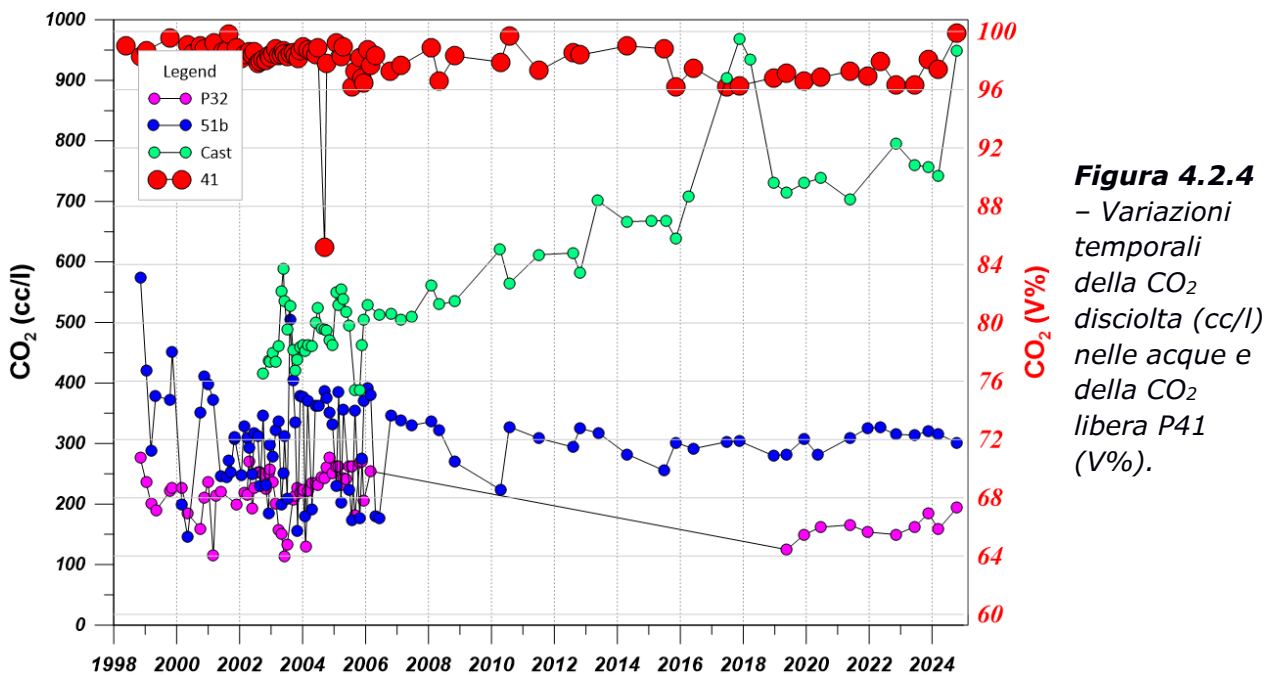


Figura 4.2.4 – Variazioni temporali della CO₂ disciolta (cc/l) nelle acque e della CO₂ libera P41 (V%).

Per quanto concerne il monitoraggio in continuo delle temperature, i dati relativi sono riportati in Figura 4.2.5. Nel campionamento eseguito a giugno 2020 sono stati installati dei nuovi datalogger (tinytag Aquatic 2) sia nel sito P14 che alla sorgente Olivella.

I dati registrati con i due sistemi di acquisizione (Sws e TinyT così denominati in Fig. 4.2.5) nel periodo giugno 2020-maggio 2021 mostrano una perfetta sovrapposizione negli andamenti a meno di una piccolissima differenza costante nel tempo.

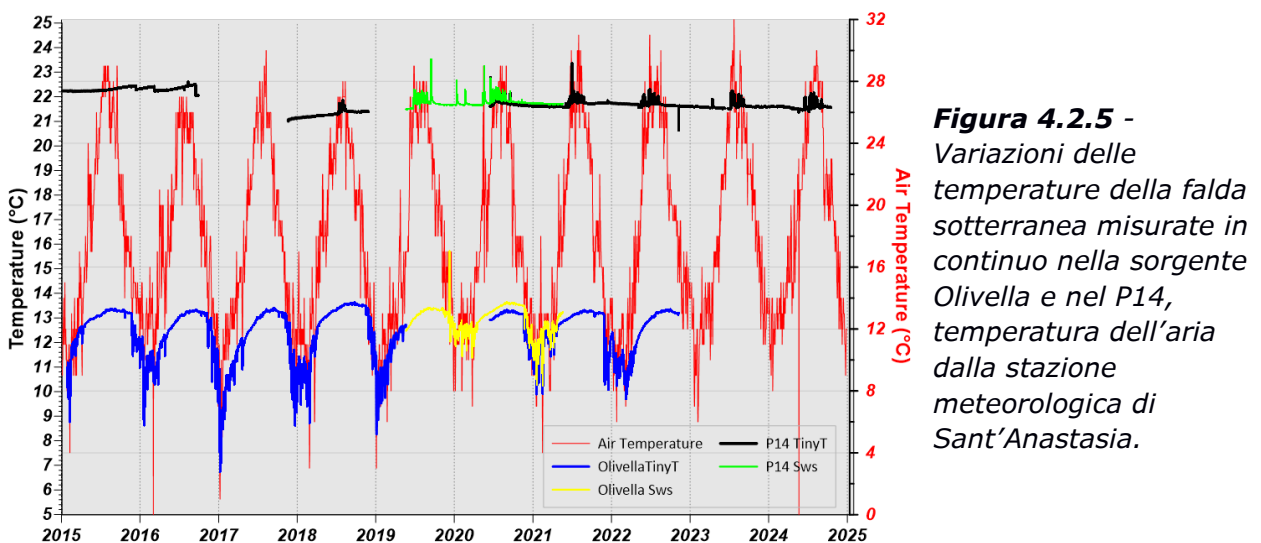


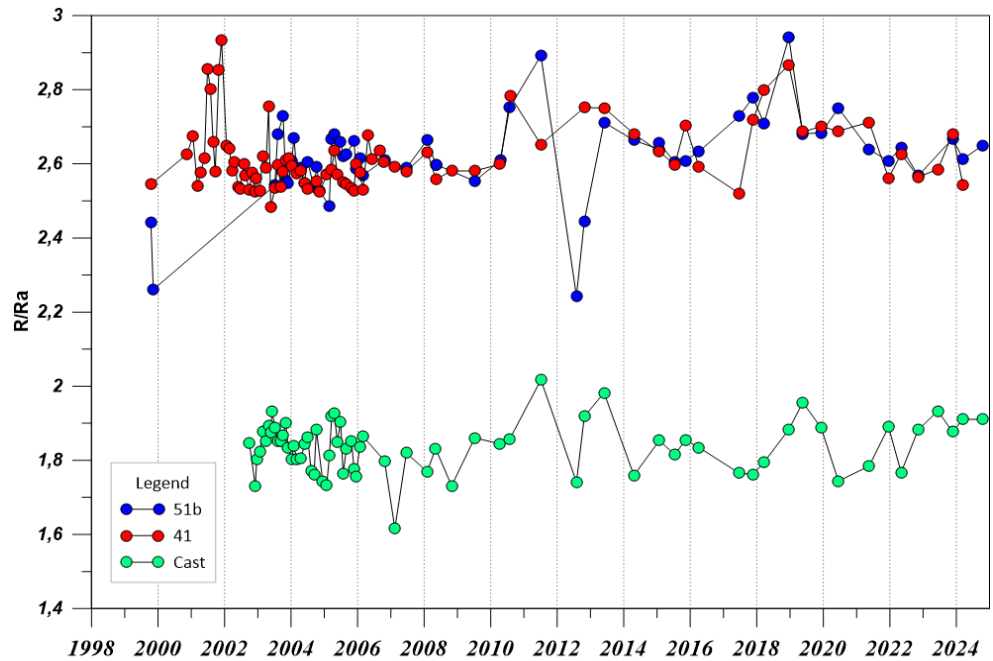
Figura 4.2.5 – Variazioni delle temperature della falda sotterranea misurate in continuo nella sorgente Olivella e nel P14, temperatura dell'aria dalla stazione meteorologica di Sant'Anastasia.

I dati registrati ad Olivella mostrano delle variazioni nella norma degli andamenti medi stagionali, senza nessuna variazione di rilievo, e sono ben correlabili con gli andamenti

della temperatura media dell'aria registrati nella stazione meteo di Sant'Anastasia, i dati di temperatura registrati a P14 non mostrano nessuna variazione di rilievo.

Il rapporto isotopico dell'elio misurato nei campioni di acqua sotterranee, espresso come rapporto R/Ra , non mostra variazioni di rilievo rispetto alle variazioni medie misurate (Fig. 4.2.6).

Figura 4.2.6 –
Variazione
temporali del
rapporto R/Ra nelle
acque sotterranee.



In conclusione, i parametri geochimici osservati forniscono informazioni indicative di un sistema vulcanico la cui attività non è interessata da variazioni di rilievo.

CAMPI FLEGREI

1 - MONITORAGGIO SISMOLOGICO

P. Ricciolino¹, M. Orazi¹, D. Galluzzo¹, E. Bellucci Sessa¹, A. Benincasa¹, A. Bobbio¹, G. Borriello¹, C. Buonocunto¹, A. Caputo¹, A. Carandente¹, V. Convertito¹, P. Cusano¹, G. Dalla Via¹, D. Delle Donne¹, A. Di Filippo¹, R. Esposito¹, G. Gaudiosi¹, S. Guardato¹, R. Riccio¹, F. Liguoro¹, D. Lo Bascio¹, R. Manzo¹, S. Morabito¹, R. Nappi¹, L. Nardone¹, S. Petrosino¹, A. Tramelli¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

Il monitoraggio sismologico dei Campi Flegrei viene svolto mediante l'uso congiunto di una Rete Permanente ed una Rete Mobile. Tali reti consentono di individuare e classificare transienti sismici (legati a terremoti o altri fenomeni naturali ed artificiali).

1.1 RETE SISMICA PERMANENTE

La Rete Permanente di monitoraggio sismico dei Campi Flegrei conta 29 siti di installazione (di cui 3 non operativi) terrestri e marina (Figura 1.1.1, Tabella 1.1.1).

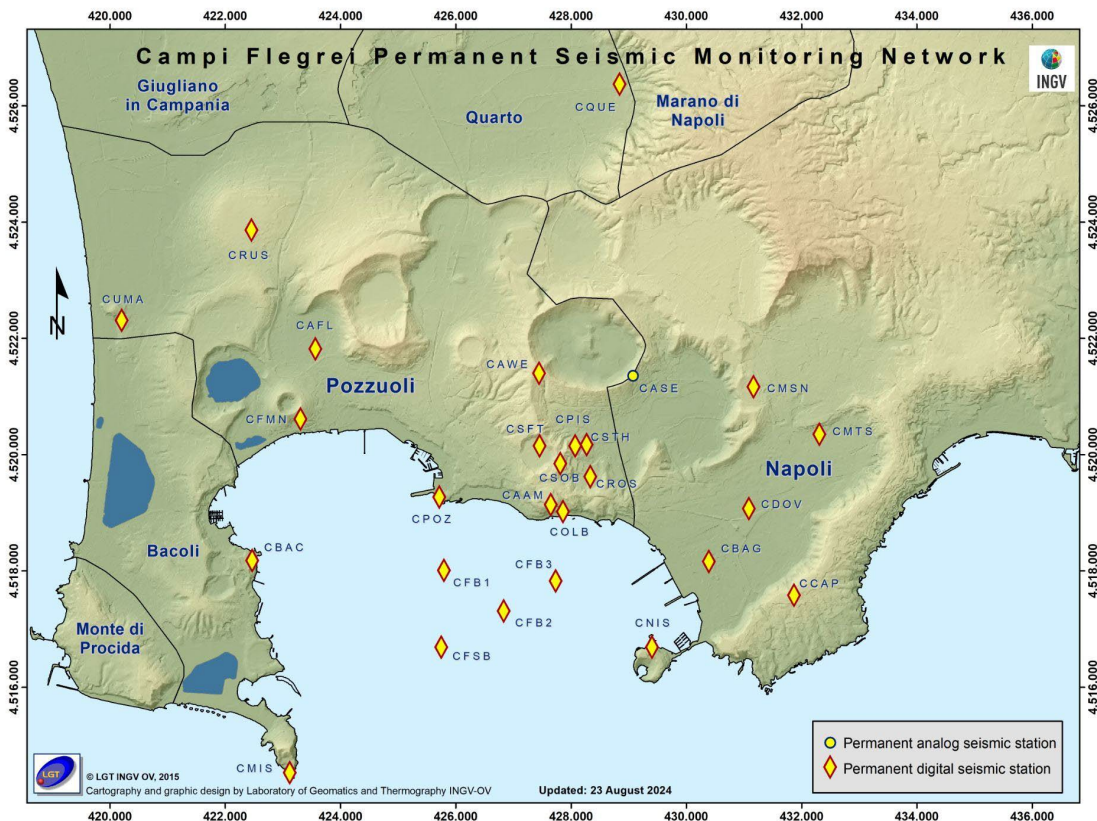


Figura 1.1.1 – Rete Sismica Permanente dei Campi Flegrei.

In ogni sito, secondo i casi, possono insistere più tipologie di stazioni e/o di sensori in base alle logiche di molteplicità di sensori o di ridondanza strumentale. Per esempio, nel sito Csth vede la contemporanea coesistenza di una coppia di stazioni digitali che acquisiscono un sensore velocimetrico a banda molto larga, di un sensore velocimetrico corto periodo e di un accelerometro.

L’infrastruttura marina permanente di monitoraggio e ricerca multi-parametrica sperimentale che opera nel Golfo di Pozzuoli, denominata MEDUSA (<http://medusa.ingv.it/>), è costituita da 4 boe geodetiche (CFBA, CFBB, CFBC e CFSB) ed altrettanti moduli sottomarini, equipaggiati con strumentazione geofisica, oceanografica e multiparametrica.

Nella rete è presente 1 stazione di tipo analogico equipaggiata con sensori da 1Hz monocomponente. Le 25 rimanenti stazioni sono digitali: quelle terrestri sono basate sull’acquisitore GILDA, progettato e realizzato presso l’INGV Osservatorio Vesuviano, e Guralp Affinity o DM24, quelle marine sono basate su acquisitori Guralp DM24 (3 stazioni) e Quanterra Q330 (1 stazione).

I sensori che equipaggiano le stazioni digitali sono i seguenti: 5 velocimetri a larga banda (Broad Band: 0.016-50 Hz), 10 velocimetri a banda molto larga (0.008-50Hz), 4 Trillium compact OBS (120s), 4 velocimetri attivi a corto periodo (1-80 Hz), 1 velocimetro da 20s, un velocimetro da 30s, 13 accelerometri da superficie.

La rete dispone anche di 3 microfoni infrasonici Infracyrus e un array infrasonico di 4 elementi basato su questi stessi sensori ed installato sul tetto dell’edificio dell’Osservatorio Vesuviano. Esiste poi un ulteriore array sismo-acustico specifico per l’area di Pisciarelli che è costituito da 4 nodi di Infracyrus + 1 nodo con sensore ad alta dinamica e larghissima banda chaparral MD60-UHP2.

Tabella 1.1.1 – Stato della Rete Sismica Permanente dei Campi Flegrei. In grigio le stazioni non operative.

Stazione	Località	Coordinate	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
ARCO non operativa	Arco Felice	40.8438N 14.0933E 22 m	01/02/2006	Guralp CMG-40T 60s	GILDA	ADSL
ASE	Astroni Est	40.8402N 14.1587E 107 m	28/07/2000	Mark L4-C 1Hz	Analogica	Radio UHF analogica
CAAM	Accademia Aeronautica Militare	40.8201N 14.1420E 170* m	09/12/2011	Guralp CMG-3ESPC 120s Guralp Fortis Microfono Infracyrus	Guralp Affinity	ADSL
CCAP	Posillipo	40.8064N 14.1923E 207* m	20/04/2005	Lennartz 3D-Lite, 1Hz	GILDA	ADSL
CAWE (ex CASO)	Astroni Ovest	40.8404N 14.1394E 276* m	01/07/2015	Guralp CMG-40T 60s Guralp Fortis	Guralp Affinity	Wi-Fi
CBAC	Castello di Baia	40.8109N 14.0806E 76.5* m	15/09/2009	Guralp CMG-3T 120s Guralp Fortis	Guralp Affinity	Wi-Fi

CBAG	Bagnoli	40.8115N, 14.1747E -122* m - 52* m	20/05/2014	Guralp 3TB(120s)/5TB pozzo Guralp CMG-40T 30s superficie	2 GILDA 1 GILDA	Wi-Fi
CCCA non operativo	Zona Celle Pozzuoli	40.8326N 14.1236E -26m	23/05/2016	Guralp 3TB(120s)/5TB pozzo	2 GILDA	UMTS
CCVA non operativo	Via Campana	40.8561N 14.1177E -25m, -51,5m, - 78m, -104,5m, - 131m, -157,5m	09/03/2015	6 Guralp VSP Flute (classe 40T 60s)	5 GILDA	UMTS
CDOV CAID	Sede di Via Dioleziano	40.8197N 14.1828E 18 m	28/05/2011	Lennartz 3D-Lite 1Hz Array 4 Microfoni Infracyrus	GILDA GILDA	Rete dati interna
CFB1	Golfo di Pozzuoli	40.8103N 14.1212E -40 m	01/07/2016	Trillium compact OBS (120s), ColibrysSF-3000L, HTI-04 Hydrophone, Paroscientific 8CDP60-I pressure sensor	Kinematics Q330, Guralp DM24/Minim us	UMTS
CFB2	Golfo di Pozzuoli	40.8042N 14.1338E -74 m	01/07/2016	Trillium compact OBS (120s), ColibrysSF-3000L, HTI-04 Hydrophone, Paroscientific 8CDP130-I pressure sensor	Kinematics Q330, Guralp DM24/Minim us	UMTS
CFB3	Golfo di Pozzuoli	40.8090N 14.1442E -38 m	01/07/2016	Trillium compact OBS (120s), ColibrysSF-3000L, HTI-04 Hydrophone, Paroscientific 8CDP60-I pressure sensor	Kinematics Q330, Guralp DM24/Minim us	UMTS
CSFB	Golfo di Pozzuoli	40.7978N 14.1198E -96 m	01/11/2008	Trillium compact OBS (120s), ColibrysSF-3000L, HTI-04 Hydrophone, Paroscientific 8CDP130-I pressure sensor	Kinematics Q330, Guralp DM24/Minim us	UMTS
CFMN	Oasi WWF Monte Nuovo	40.8329N 14.0904E 92*m	23/09/2014	Guralp 3ESPC 120s Guralp Fortis	Guralp Affinity	Wi-Fi

CMTS (ex CIRC)	Via Metastasio Fuorigrotta	40.8314N 14.1972E 40 m	05/02/2016	Lennartz 3D-Lite 20s	GILDA	UMTS
CMIS	Capo Miseno	40.7781N 14.0889E 133.5* m	12/10/2015	Guralp CMG-3ESPC 120s Guralp Fortis	Guralp Affinity	Wi-Fi
CMSN (ex CMSA)	Monte S. Angelo Dip. Scienze Fisiche	40.8386N 14.1836E 95 m	28/11/2008	Guralp CMG-40T 60s	GILDA	Rete GARR
COLB	Galleria SEPSA Olibano	40.8190N 14.1446E 56* m	06/07/2011	Guralp 3ESPC 120s Guralp Fortis Microfono Infracyrus	Guralp Affinity	Wi-Fi
CPIS	Pisciarelli	40.8292N 14.1470E 69 m	29/01/2010	Guralp CMG-40T 60s 1 Infrasonico 100s Chaparral UHP2 + 4 Infracyrus 1Hz	Guralp Affinity	Wi-Fi
CPOZ	Pozzuoli Darsena	40.8211N 14.1191E 52.5* m	19/07/2011	Guralp CMG-3 ESPC 120s Kinematics Episensor ES-T	Guralp Affinity	Wi-Fi
CSOB	Solfatara Bordo Est	40.8265N 14.1440E 222.5* m	2000 2007 08/06/2021	Guralp 3ESPC 120s Guralp Fortis	Guralp Affinity	Wi-Fi
CSFT	Solfatara	40.8292N 14.1396E 151* m	Gennaio 2013	Guralp CMG-40T 60s Microfono Infracyrus	GILDA	Wi-Fi
CNIS	Nisida	40.7978N 14.1646E 1 m	1983 2022	Guralp CMG-3ESPC 120s Guralp Fortis	Guralp Affinity	LTE
CRUS	Monte Rusciello	40.862148N 14.079901E 175* m	2 maggio 2024	Velocimetro Lennartz 3D-Lite 1Hz, Accelerometro Episensor EST	Guralp Affinity	ADSL
CUMA	Cuma	40.847947N 14.053389E 81* m	giugno 2024	Guralp CMG-40T 60s, accelerometro Guralp Fortis	Guralp Affinity	LTE
CQUE (ex QUAR)	Quarto	40.8853N 14.1538E 108* m	4/07/2023	Guralp CMG-3ESPC 120s Guralp Fortis	Guralp Affinity	ADSL
CSTH	Solfatara Tennis Hotel	40.8294N 14.1493E 108* m	13/04/2021	Guralp 3ESPC 120s Guralp Fortis Lennartz 3D-Lite 1Hz	Guralp Affinity Guralp DM24	LTE

Nota: le quote indicate con (*) riportano l'altezza rispetto al geoide WGS84.

Nel corso del 2024, sono stati registrati un totale di 6757 eventi locali, ripartiti nelle diverse tipologie riportate in Figura 1.1.2.

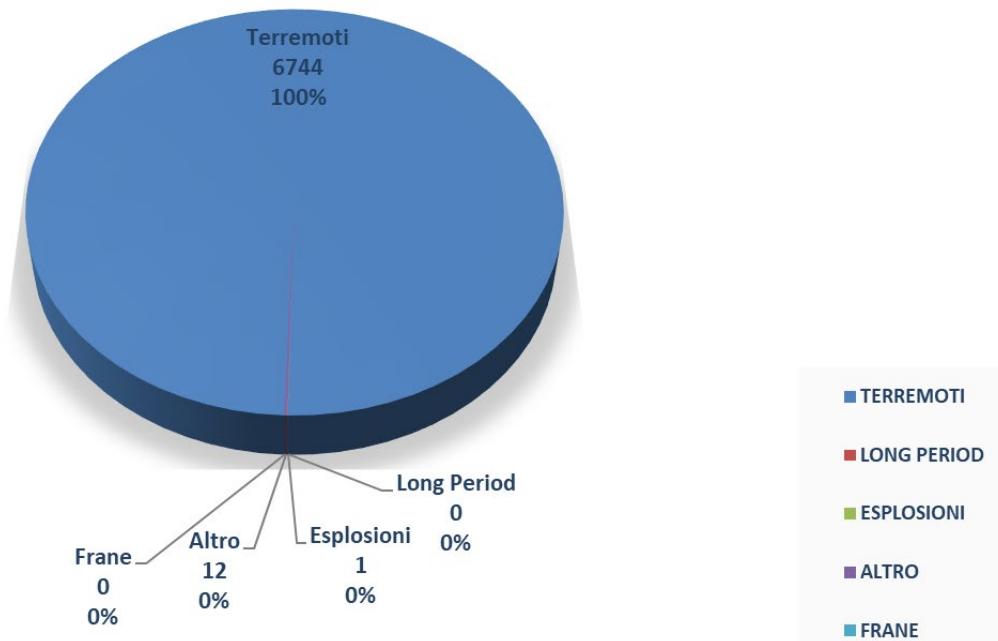


Figura 1.1.2 – Distribuzione percentuale degli eventi per tipologia nel 2024. Le esplosioni riportate sono tutte di origine artificiale.

La maggior parte dei segnali sismici transienti registrati nell’area flegrea e non classificabili come terremoti sono legati alle attività antropiche locali e identificati, in genere, come esplosioni di natura artificiale. Altri tipi di segnali, dovuti ad attività sismica non rientrante nelle precedenti categorie o a fenomeni non sismici (es. tuoni e ad altre attività antropiche), sono compresi nella tipologia “ALTRO”.

Per quanto riguarda l’attività sismica naturale nel corso del 2024 sono stati registrati 6744 terremoti vulcano-tettonici ($M_{dmax}=4.4\pm 0.3$; evento del 20/05/2024 alle 18:10 UTC) la maggior parte dei quali (~ 83%) di magnitudo inferiore a 1.0 (Tab. 1.1.2). Permane un notevole incremento nel numero totale di eventi registrati e nell’energia sismica rilasciata, rispetto ai valori medi degli anni precedenti (Figure 1.1.3; 1.1.6; 1.1.8 e 1.1.10).

Il terremoto di $M_d=4.4\pm 0.3$ del 20/05/2024 alle 18:10 UTC risulta, l’evento di maggiore energia registrato a partire dalla ripresa di questa fase bradisismica iniziata nel 2005 e degli ultimi 40 anni.

È stato possibile determinare i parametri ipocentrali di 4896 eventi.

La maggior parte degli eventi localizzati ricade nell’area compresa tra Astroni, Solfatara-Pisciarelli-Agnano, Pozzuoli e il Golfo di Pozzuoli con profondità prevalentemente concentrate nei primi 3 km e profondità massime fino a circa 5 km (Figure 1.1.4 e 1.1.5).

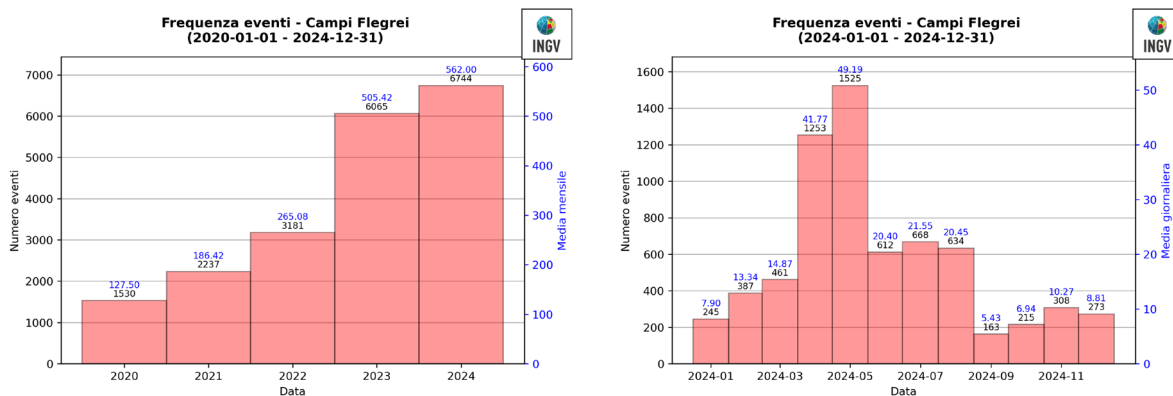


Figura 1.1.3 – Frequenza di accadimento dei terremoti ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del 2024 (a destra).

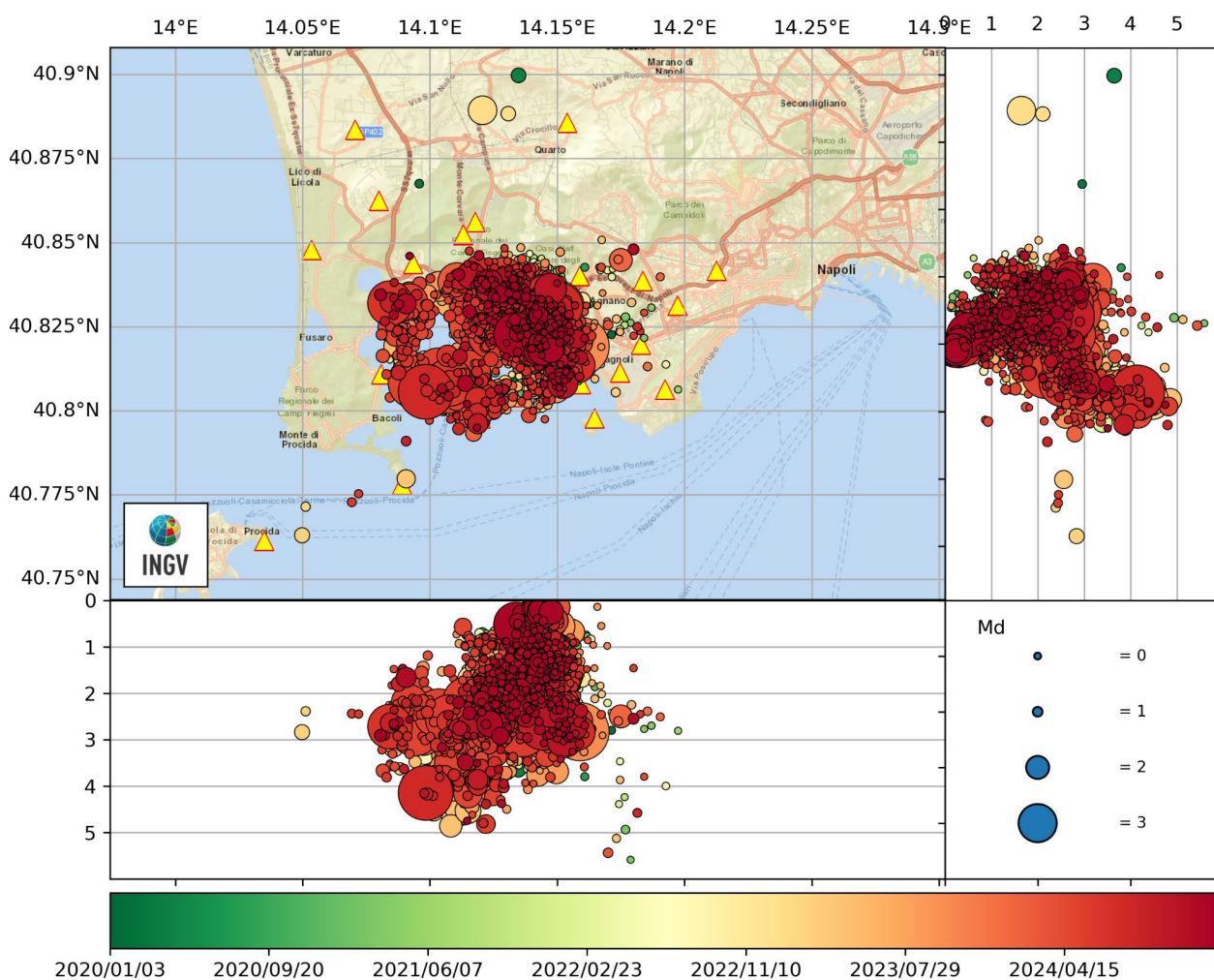


Figura 1.1.4 – Localizzazione degli ipocentri nell'area flegrea dal 01/01/2020 al 31/12/2024.

Tabella 1.1.2 - Riepilogo della sismicità registrata ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del 2024 (a destra) suddivisa per classi di magnitudo e relative percentuali.

Numero totale terremoti: 19757 $M_{dmax}=4.4\pm 0.3$		Numero totale terremoti: 6744 $M_{dmax}=4.4\pm 0.3$	
Numero terremoti con $M_d < 0.0$	9054 (45.83%)	Numero terremoti con $M_d < 0.0$	2192 (32.50%)
Numero terremoti con $0.0 \leq M_d < 1.0$	7321 (37.06%)	Numero terremoti con $0.0 \leq M_d < 1.0$	3236 (47.98%)
Numero terremoti con $1.0 \leq M_d < 2.0$	1012 (5.12%)	Numero terremoti con $1.0 \leq M_d < 2.0$	515 (7.64%)
Numero terremoti con $2.0 \leq M_d < 3.0$	185 (0.94%)	Numero terremoti con $2.0 \leq M_d < 3.0$	90 (1.33%)
Numero terremoti con $3.0 \leq M_d < 4.0$	37 (0.19%)	Numero terremoti con $3.0 \leq M_d < 4.0$	23 (0.34%)
Numero terremoti con $M_d \geq 4.0$	4 (0.02%)	Numero terremoti con $M_d \geq 4.0$	2 (0.03%)
Numero terremoti con M_d N.D.	2144 (10.85%)	Numero terremoti con M_d N.D.	686 (10.17%)

A maggio e ad agosto 2024 sono stati identificati alcuni eventi ibridi con caratteristiche simili, localizzati nella zona di Accademia a profondità superficiali. Un’analisi di dettaglio ha evidenziato che i fluidi coinvolti sono di natura idrotermale.

In Fig 1.1.5 sono riportati gli spettrogrammi alle componenti verticali delle stazioni CAAM e CSOB per gli eventi più energetici di maggio ed agosto.

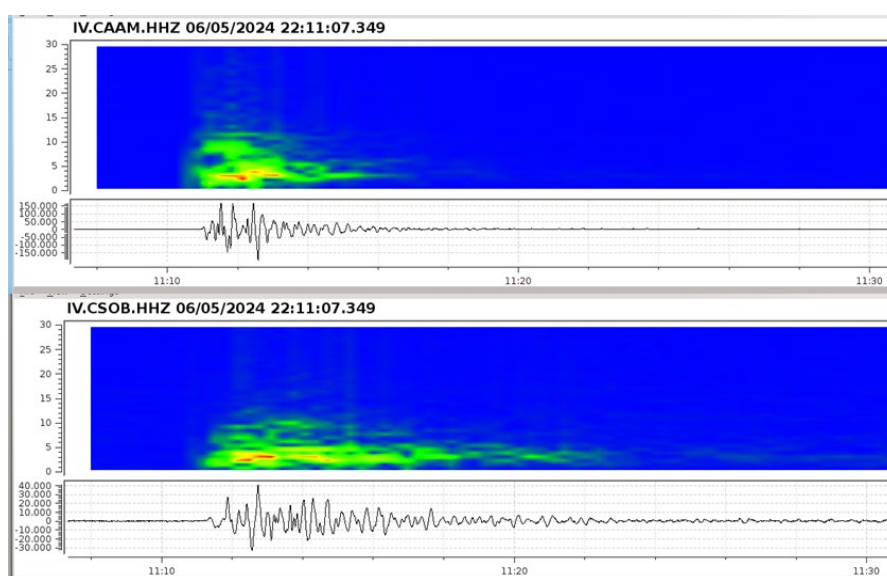


Figura 1.1.5a - Spettrogramma dell’evento del 06/05/2024 alle 22:11 UTC alle stazioni CAAM e CSOB.

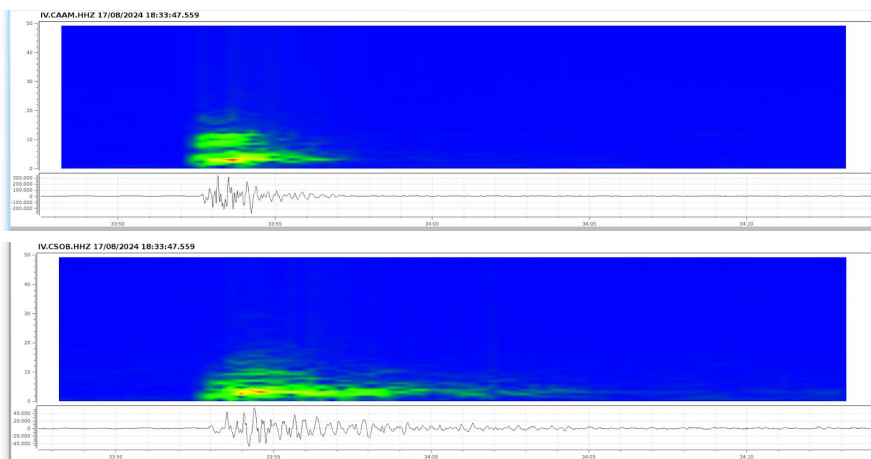


Figura 1.1.5b - Spettrogramma dell'evento del 17/08/2024 alle 18:33 UTC alle stazioni CAAM e CSOB.

Non si evidenziano variazioni significative nella distribuzione delle localizzazioni (Figura 1.1.4) e nelle profondità ipocentrali (Figura 1.1.6).

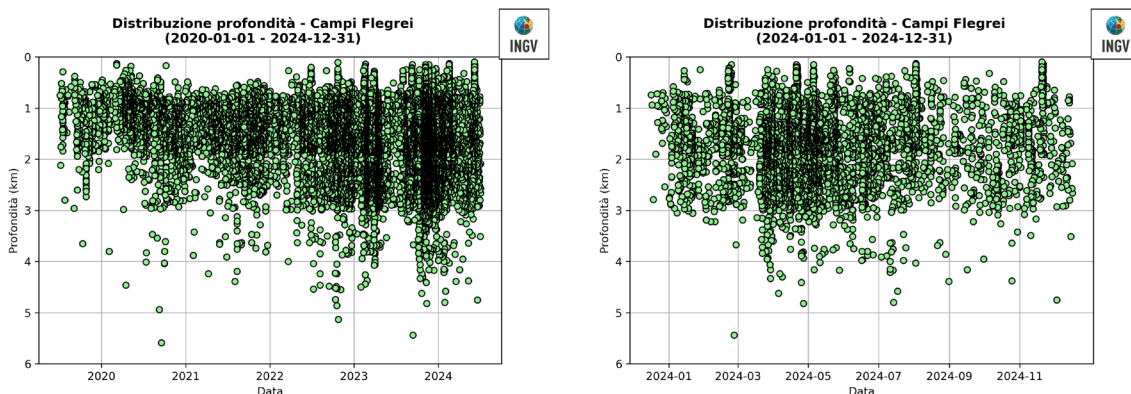


Figura 1.1.6 – Profondità ipocentrali dei terremoti nell'area flegrea localizzati nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del 2024 (a destra).

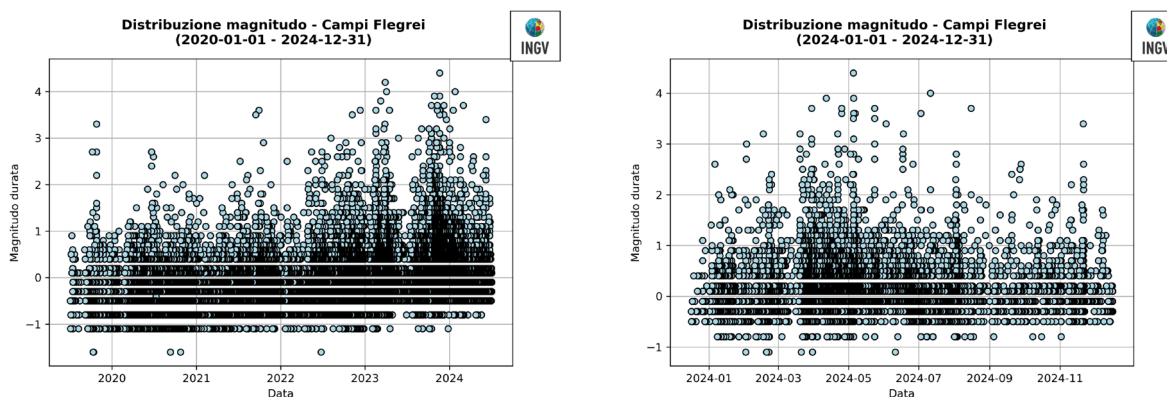


Figura 1.1.7 - Magnitudo dei terremoti nell'area flegrea nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del 2024 (a destra).

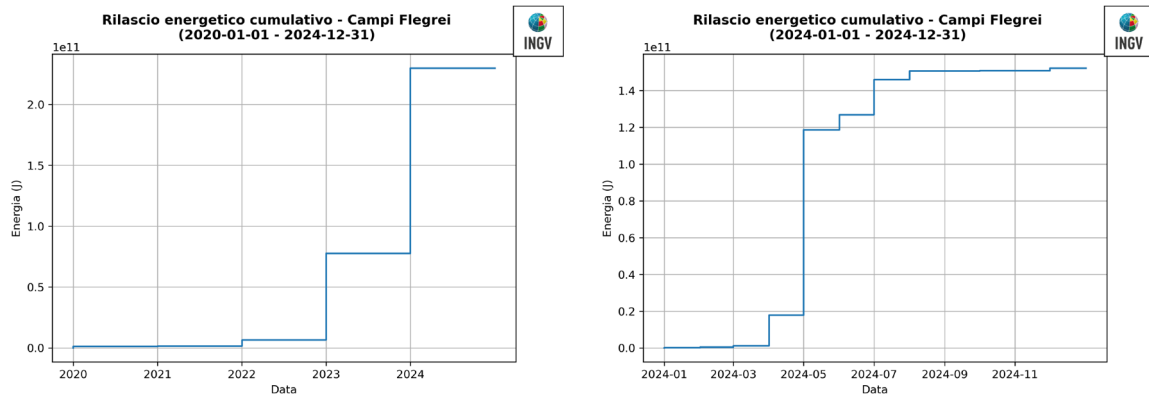


Figura 1.1.8 – Andamento cumulativo dell’energia rilasciata dai terremoti nell’area flegrea nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del 2024 (a destra).

L’analisi dei meccanismi focali degli eventi più energetici del 2024 (Figura 1.1.9) mostra prevalentemente soluzioni associabili a meccanismi di tipo normale.

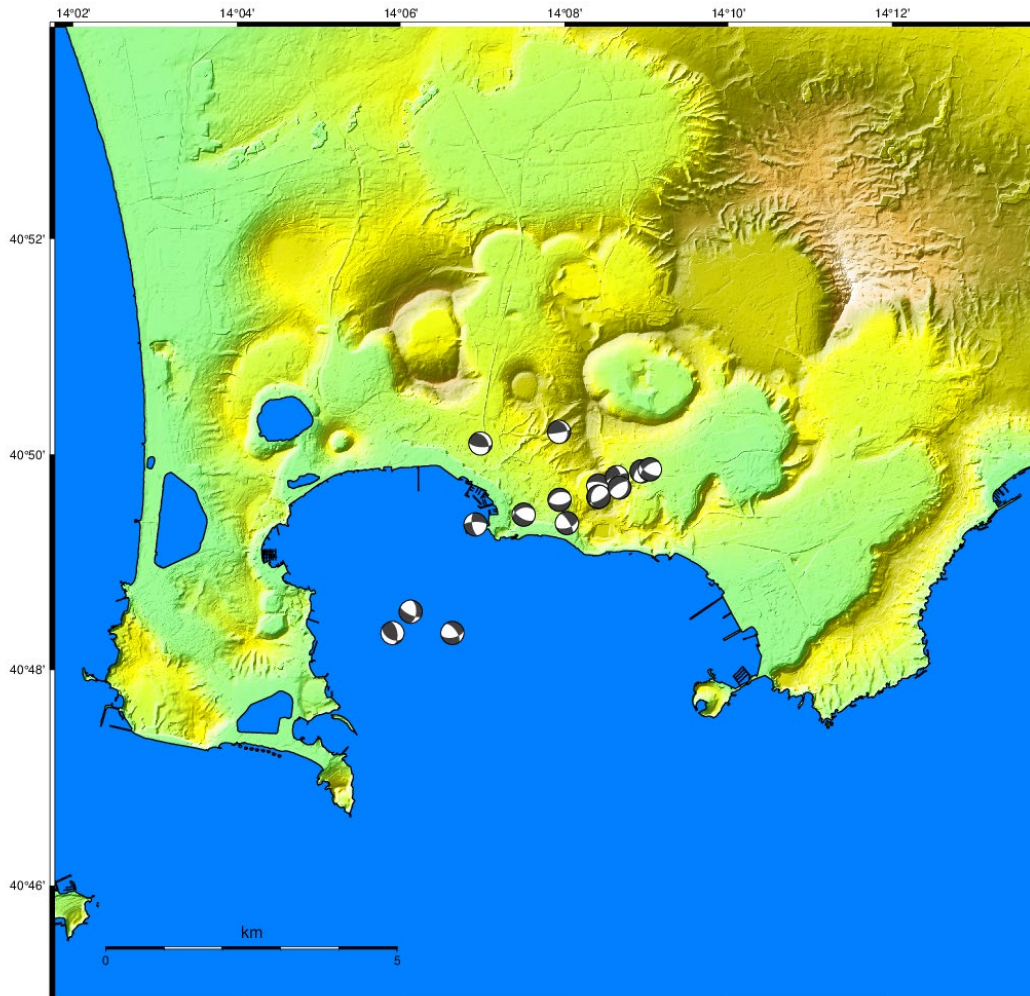


Figura 1.1.9 - Meccanismi focali elaborati per gli eventi più energetici registrati ai Campi Flegrei nel 2024.

La sismicità dei Campi Flegrei è spesso caratterizzata, analogamente ad altri vulcani, da sciame sismici. In Tabella 1.1.3 sono riportati gli sciame sismici registrati nel corso del 2024.

Tabella 1.1.3 - Sciame sismici registrati ai Campi Flegrei nel corso del 2024.

Inizio sciame	N. eventi	M_{dmax}	Area
2024/02/11 05:24 UTC	14	1.7±0.3	Solfatara Pisciarelli
2024/02/19 00:46 UTC	5	1.8±0.3	Solfatara e golfo di Pozzuoli
2024/03/07 22:07 UTC	61	2.3±0.3	Pozzuoli Accademia Solfatara
2024/03/10 15:06 UTC	9	2.6±0.3	Pozzuoli Accademia
2024-04-04 05:14 UTC	11	3.2±0.3	Pozzuoli Porto
2024-04-06 11:59 UTC	6	2.5±0.3	Golfo di Pozzuoli
2024-04-06 18:18 UTC	8	2.1±0.3	Pozzuoli
2024-04-07 12:34 UTC	19	2.3±0.3	Pozzuoli Solfatara Pisciarelli
2024-04-09 03:39 UTC	7	1.7±0.3	Solfatara
2024-04-09 20:27 UTC	32	2.8±0.3	Pozzuoli Solfatara Pisciarelli
2024-04-11 05:23 UTC	57	2.3±0.3	Pozzuoli Solfatara golfo di Pozzuoli
2024-04-14 07:35 UTC	71	3.7±0.3	Pozzuoli Solfatara Pisciarelli
2024-04-21 01:20 UTC	30	2.5±0.3	Pozzuoli Solfatara golfo di Pozzuoli
2024-04-21 06:45 UTC	36	2.1±0.3	Pozzuoli Solfatara
2024-04-23 01:36 UTC	13	1.6±0.3	Pozzuoli
2024-04-26 01:38 UTC	95	3.9±0.3	Pozzuoli Golfo di Pozzuoli
2024-04-29 17:44 UTC	57	2.2±0.3	Pozzuoli
2024-04-30 22:01 UTC	2615	2.4±0.3	Pozzuoli Golfo di Pozzuoli
2024/05/03 00:16 UTC	9	1.9±0.3	Pozzuoli Porto
2024/05/06 22:11 UTC	107	3.2±0.3	Solfatara Pisciarelli
2024/05/06 03:46 UTC	14	2.6±0.3	Pozzuoli
2024/05/10 10:31 UTC	7	3.7±0.3	Golfo di Pozzuoli
2024/05/12 06:38 UTC	23	1.7±0.3	Pozzuoli Solfatara golfo di Pozzuoli
2024/05/13 20:45 UTC	14	2.3±0.3	Solfatara Golfo di Pozzuoli

2024/05/18 04:06 UTC	16	2.8±0.3	Solfatara Pisciarelli
2024/05/20 01:56 UTC	17	2.4±0.3	Pozzuoli Solfatara
2024/05/20 17:51 UTC	252	4.4±0.3	Solfatara Pisciarelli Pozzuoli
2024/05/25 00:58 UTC	26	2.7±0.3	Solfatara
2024/05/31 13:33 UTC	10	1.5±0.3	Pisciarelli
2024/06/08 01:48 UTC	58	3.7±0.3	Solfatara Pisciarelli
2024/06/16 23:35 UTC	9	1.5±0.3	Solfatara
2024/06/24 02:08 UTC	25	2.0±0.3	Solfatara
2024/07/08 13:09 UTC	23	3.2±0.3	Golfo di Pozzuoli
2024/07/11 09:57 UTC	7	2.6±0.3	Solfatara Pisciarelli
2024/07/12 04:23 UTC	8	1.8±0.3	Solfatara Pisciarelli
2024/07/18 06:08 UTC	11	3.6±0.3	Solfatara Pisciarelli
2024/07/26 11:44 UTC	6	4.0±0.3	Golfo di Pozzuoli
2024/08/14 15:20 UTC	11	1.4±0.3	Solfatara Cigliano
2024/08/17 12:52 UTC	121	2.8±0.3	Accademia Solfatara Agnano
2024/08/18 12:05 UTC	13	1.2±0.3	Agnano
2024/08/20 08:59 UTC	11	1.0±0.3	Solfatara Pisciarelli
2024/08/25 11:44 UTC	7	1.7±0.3	Solfatara Cigliano
2024/08/30 19:16 UTC	8	3.7±0.3	Solfatara Pisciarelli
2024/09/07 19:11 UTC	7	1.5±0.3	Solfatara
2024/10/05 04:00 UTC	8	2.4±0.3	Pozzuoli
2024/10/06 18:02 UTC	6	2.0±0.3	Pozzuoli
2024/10/13 06:06 UTC	9	2.6±0.3	Agnano
2024/10/26 14:18 UTC	9	1.9±0.3	Solfatara Agnano
2024/11/16 23:31 UTC	15	1.0±0.3	Agnano Pisciarelli
2024/11/25 16:52 UTC	14	2.2±0.3	Pozzuoli
2024/12/05 02:47 UTC	11	1.7±0.3	Pozzuoli Accademia
2024/12/06 04:33 UTC	36	3.4±0.3	Pozzuoli Accademia
2024/12/22 20:56 UTC	5	1.7±0.3	Pozzuoli
2024/12/22 10:24 UTC	4	1.6±0.3	Pozzuoli

In Figura 1.1.10 è rappresentata la frequenza di accadimento dei terremoti registrati ai Campi Flegrei dal 1983 e la relativa energia cumulativa.

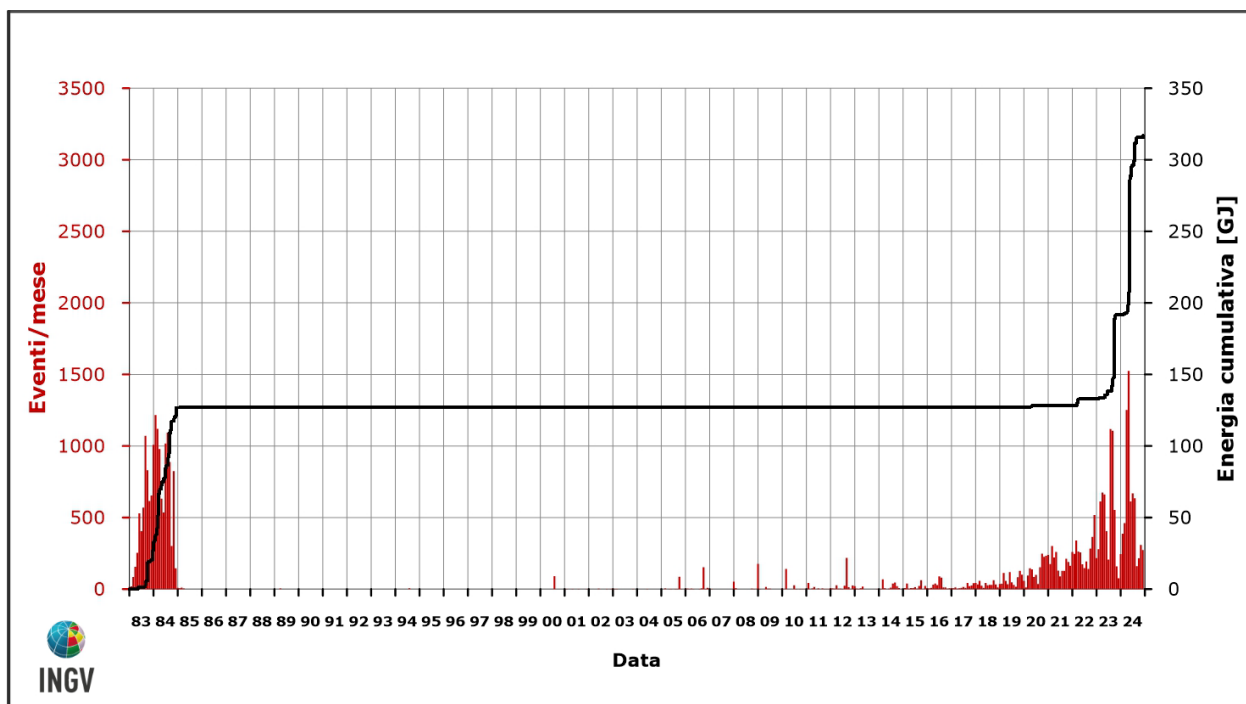


Figura 1.1.10 – Frequenza di accadimento dei terremoti registrati ai Campi Flegrei dal 1983. La linea nera rappresenta l’energia cumulativa.

1.2 RETE SISMICA MOBILE

Nel 2024 è stata effettuata l’attività di controllo, manutenzione e prelievo dati delle stazioni in acquisizione locale installate ai Campi Flegrei. La rete sismica mobile, per quanto riguarda le stazioni in trasmissione, è stata registrata con codice di rete 2I e sono stati effettuati le seguenti variazioni: la stazione V0101 (azienda Bullongamma, Agnano) è stata rinominata CBUL; la stazione V0104 (Gauro) è stata rinominata CGAU ed è stato aggiunto un accelerometro Lunitek LTFB160 (fondoscala 2g); la stazione V0106 (Licola) è stata rinominata CLAC.

Inoltre, sono state installate due nuove stazioni sismiche in area flegrea: CREM (Residence Miramare) e CSOC (Soccavo). La stazione CREM (Residence Miramare) è equipaggiata con acquisitore Lunitek Atlas a 6 canali, sismometro Guralp CMG40T (60s) ed accelerometro Episensor Kinometrics FBA-EST (fondoscala 0.25 g); la stazione CSOC è costituita da un digitalizzatore Atlas a 6 canali, un sismometro Tellus Lunitek (1s) e un accelerometro Lunitek LTFB160 (fondoscala 2g). Entrambe le stazioni sono dotate di router UMTS per la trasmissione dei segnali. La stazione V0102 è stata disinstallata in quanto è stata ripristinata la stazione CPIS della rete permanente.

In sintesi, a tutto dicembre 2024 nell'area dei Campi Flegrei sono operative 13 stazioni con sismometro a larga banda o a corto periodo, 5 dotate di accelerometro e una di sensore infrasonico.

La configurazione delle stazioni operative è mostrata in Figura 1.2.1, mentre le caratteristiche tecniche sono riassunte nella Tabella 1.2.1.

Tutte le stazioni della Rete Mobile acquisiscono i dati in modalità continua su memoria locale rimovibile (card PCMCIA, flash card) ad eccezione delle stazioni CROS, CBUL, CREM, CGAU, V0105 e CLAC i cui segnali sono trasmessi via UMTS in tempo reale al centro di acquisizione dati dell'Osservatorio Vesuviano-INGV.

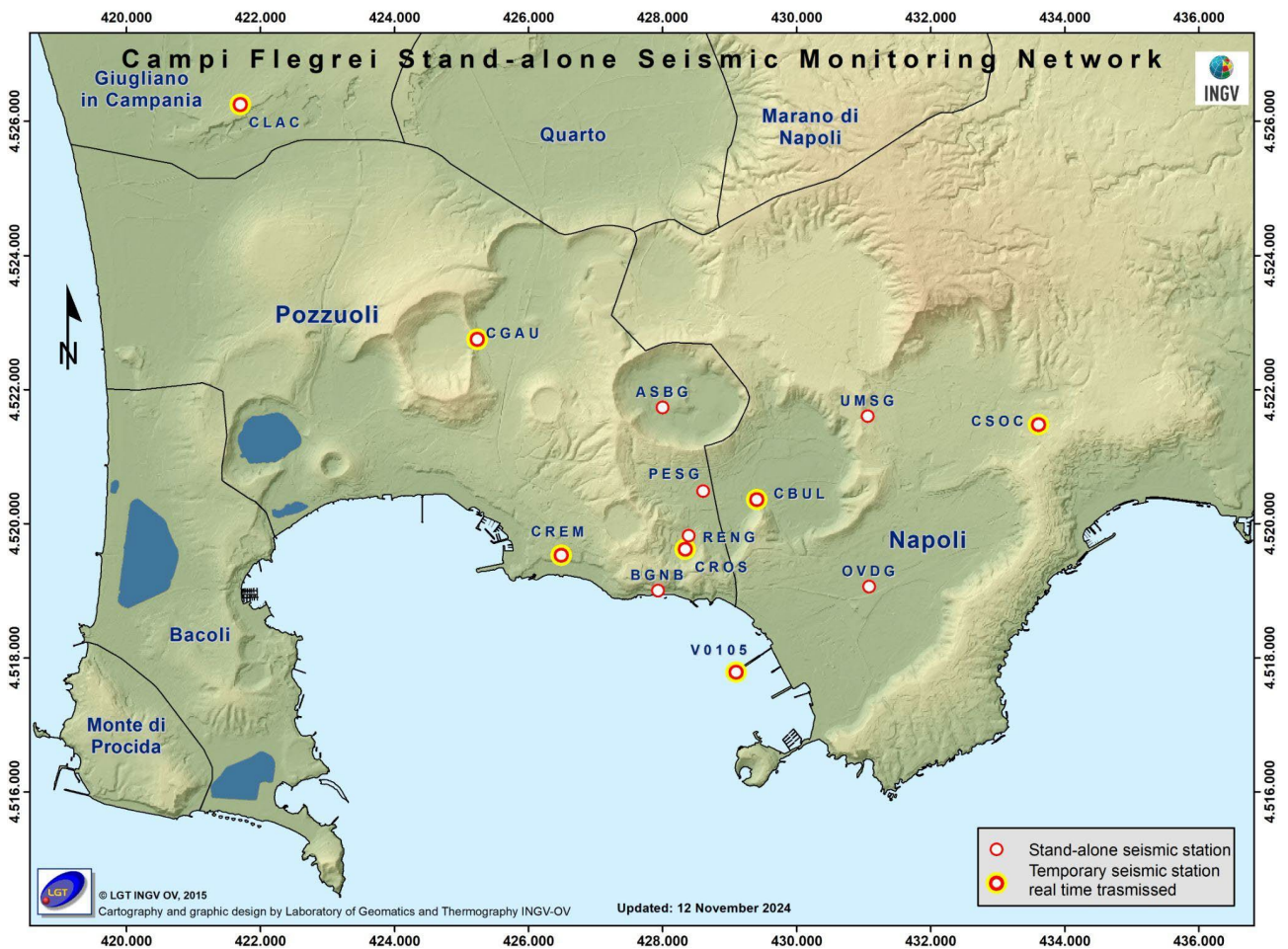


Figura 1.2.1 – Rete Sismica Mobile operativa ai Campi Flegrei. Mappa aggiornata a dicembre 2024.

Per le stazioni “stand-alone” periodicamente si provvede alla sostituzione dei supporti di acquisizione che vengono decodificati nel Laboratorio Rete Mobile. La maggior parte delle stazioni Rete Mobile ha acquisito con discreta continuità per l’anno 2024, con alcune interruzioni nei dati dovute alla mancanza di energia elettrica o guasti agli acquisitori e ai sensori sismici. Il data set per l’anno 2024 è costituito da rumore sismico, terremoti locali, regionali e telesismi.

Tabella 1.2.1 – Stato della Rete Sismica Mobile ai Campi Flegrei. Caratteristiche strumentali della Rete Sismica Mobile operativa nell’area dei Campi Flegrei a fine dicembre 2024. I segnali delle stazioni evidenziate in grassetto sono trasmessi in tempo reale.

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
CLAC	40.8836N 14.0706E 55 m	Licola	Gennaio 2011	Lennartz LE3D/20s	Lunitek Atlas C	LTE
ASBG	40.8435N 14.1459E 12 m	Astroni	Novembre 2004	Guralp CMG-40T	Marslite	Locale
BGNG BGNK	40.8189N 14.1454E 4 m	Bagnoli La Pietra	Ottobre 2005	Guralp CMG-40T Episensor FBA ES-T	Reftek 130	Locale
CBUL	40.8312N 14.1627E 18 m	Agnano Monte Spina	Febbraio 2010	Guralp CMG-40T AccelerometroL unitek LTFB	Lunitek Atlas F	LTE
CROS	40.8245N 14.1502E 57 m	Agnano	Giugno 2020	Guralp CMG-40T	Lunitek Atlas C	LTE
CGAU	40.8524N 14.1130E 100 m	Gauro	Agosto 2023	Lennartz LE3D/20s AccelerometroL unitek LTFB	Lunitek Atlas F	LTE
OVDG	40.8197N 14.1827E 14 m	Sede di Via Diocleziano	Aprile 2009	Geotech KS2000	Marslite	Locale
PESG	40.8323N 14.1532E 45 m	Agnano Pisciarelli	Febbraio 2011	Guralp CMG-40T	Marslite	Locale
V0105	40.8080N 14.1593E 10 m	Pontile Bagnoli	Gennaio 2023	Lennartz LE3D/20s	Gilda	LTE
RENG	40.8263N 14.1507E 55 m	Agnano	Gennaio 2011	Guralp CMG-40T	Marslite	Locale
UMSG	40.8426N 14.1822E 120 m	Università M. S. Angelo	Maggio 2013	Geotech KS2000	Reftek 130	Locale
CREM	40.8235N 14.1282E 77 m	Pozzuoli	Ottobre 2024	Guralp CMG-40T Episensor FBA ES-T	Lunitek Atlas C	LTE

CSOC	40.8417N 14.2124E 143 m	Soccavo	Giugno 2024	Lunitek Tellus 1s Accelerometro Lunitek LTFB	Lunitek Atlas C	LTE
------	-------------------------------	---------	-------------	--	--------------------	-----

È stato effettuato il calcolo dell'RMS (*Root Mean Square*) sulle tre componenti del moto per i segnali in continuo registrati dalla stazione BGNG. Il valore dell'RMS è stato calcolato in quattro bande di frequenza: 0.1-1.0 Hz, 1.0-2.0 Hz, 2.0-4.0 Hz, 4.0-8.0 Hz. I risultati ottenuti sono mostrati in Figura 2 e Figure 3 e sono riferiti al periodo gennaio 2024 – dicembre 2024. A parte la periodicità giornaliera ben evidente nelle 4 bande di frequenza considerate, non si notano variazioni considerevoli nell'arco del periodo analizzato.

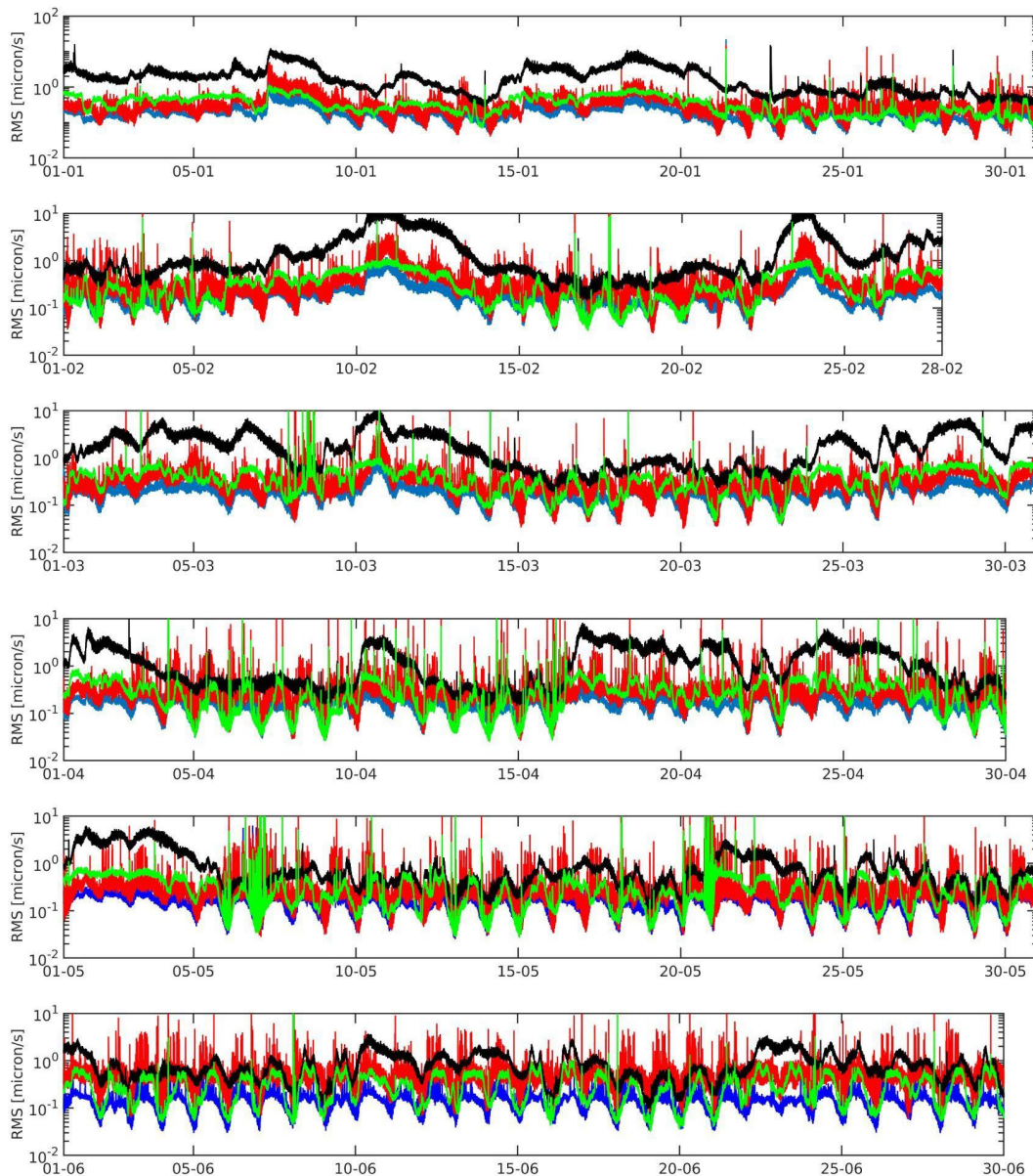


Figura 1.2.2 - RMS calcolato per i segnali della stazione sismica BGNG nel primo semestre del 2024 in quattro bande di frequenza: 0.1-1.0 Hz (nero), 1-2 Hz (verde), 2-4 Hz (rosso), 4-8 Hz (blu).

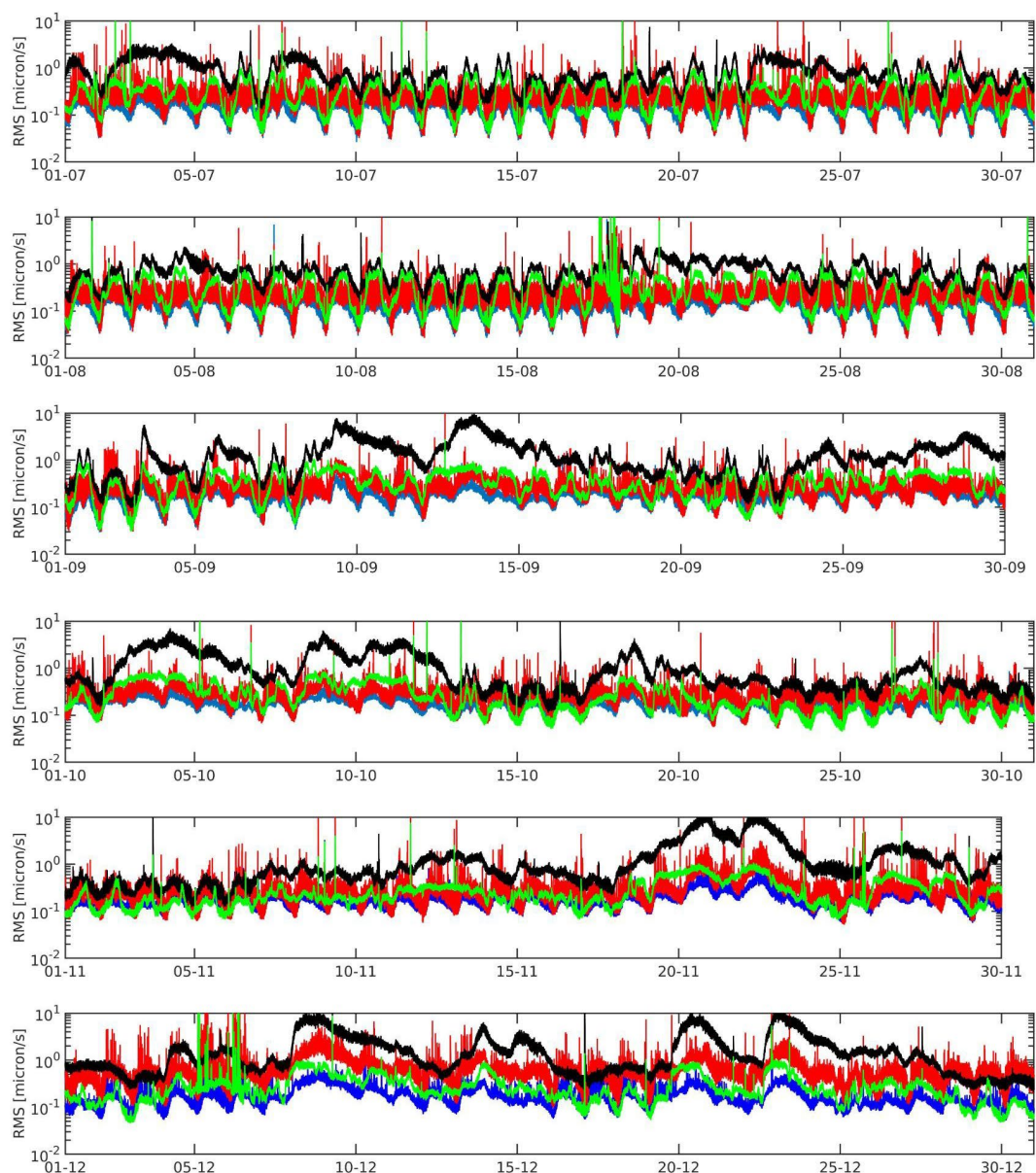


Figura 1.2.3 - RMS calcolato per i segnali della stazione sismica BGNG nel secondo semestre del 2024 in quattro bande di frequenza: 0.1-1.0 Hz (nero), 1-2 Hz (verde), 2-4 Hz (rosso), 4-8 Hz (blu).

2 - MONITORAGGIO GEODETICO

Durante il 2024 il monitoraggio geodetico dei Campi Flegrei è stato effettuato attraverso misure continue GNSS, tiltmetriche e dilatometriche, una campagna di misure gravimetriche ed elaborazioni di dati satellitari.

2.1 RETE GNSS

*P. De Martino¹, M. Dolce¹, G. Brandi¹, A. Iorio¹, G. Scarpato¹, A. Romeo¹,
S. Guardato¹, U. Tamarro¹*

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

La rete GNSS permanente operante nell'area dei Campi Flegrei è costituita da 35 stazioni terrestri e marine (Figura 2.1.1). L'infrastruttura marina permanente di monitoraggio e ricerca multi-parametrica sperimentale che opera nel Golfo di Pozzuoli, denominata MEDUSA (<http://medusa.ingv.it/>), è costituita da 4 boe geodetiche (CFBA, CFBB, CFBC e CFSB) ed altrettanti moduli sottomarini, equipaggiati con strumentazione geofisica, oceanografica e multiparametrica. La stazione CFSB non è stata operativa nel 2024 a causa del danneggiamento della boa sulla quale era installata.

Da febbraio 2024 è operativa una nuova stazione GNSS permanente nell'area, denominata ISPT (Istituto Petronio - Agnano) (Figure 2.1.1 e 2.1.2).

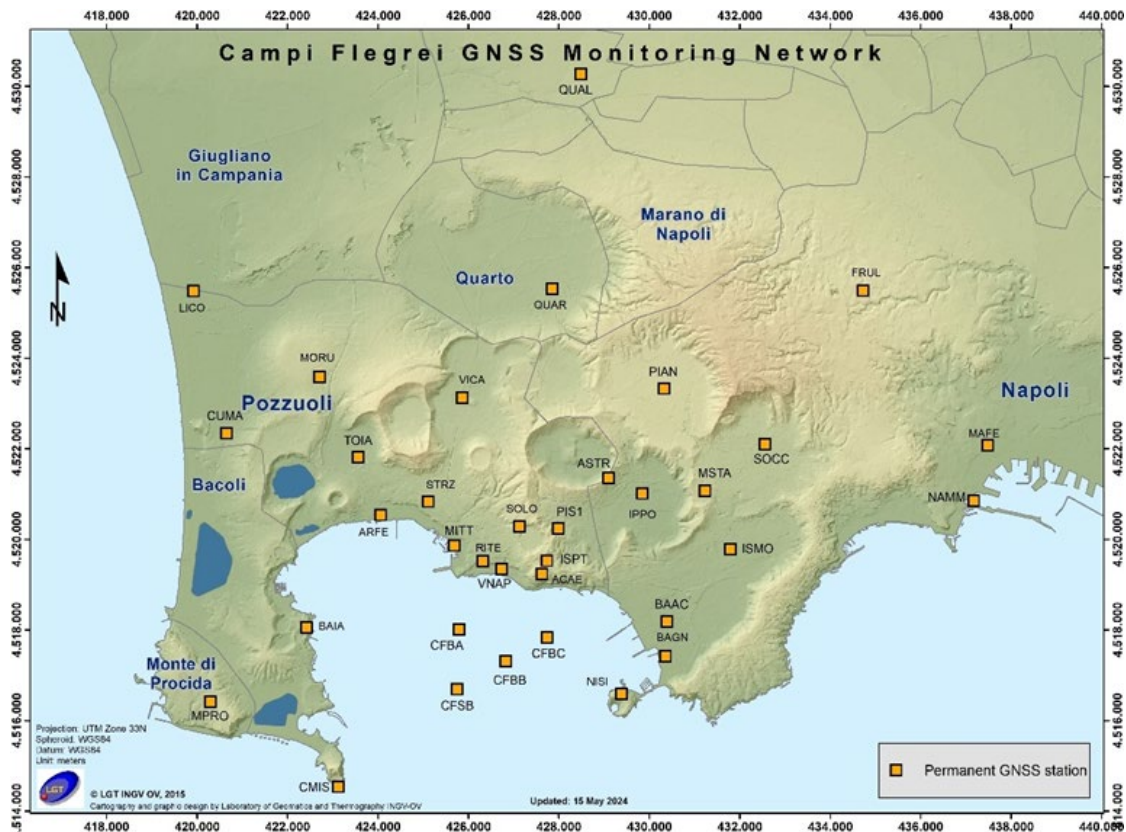


Figura 2.1.1 – Mappa della Rete GNSS dei Campi Flegrei.

In Tabella 2.1.1 sono riportati i nomi delle stazioni e le coordinate, le specifiche della strumentazione, gli intervalli di acquisizione dati ed i sistemi di trasmissione utilizzati.

Tabella 2.1.1 – Stato della Rete GNSS dei Campi Flegrei

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
ACAE	40.8209 N 14.1417 E	Accademia Aeronautica (Pozzuoli)	2000	Leica GR10 LEIAR25 LEIT	1sec	ADSL
ARFE	40.8323 N 14.0993 E	Arco Felice	2000	Leica GR10 LEIAR25 LEIT	1sec	ADSL
ASTR	40.8401 N 14.1590 E	Astroni	2016	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	LTE
BAAC	40.8115 N 14.1746 E	Italsider Bagnoli	2023	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1sec	Wi-Fi
BAGN	40.8048 N 14.1741 E	Città della Scienza Bagnoli	2012	Leica GR10 LEIAR25 LEIT	1sec	Wi-Fi
BAIA	40.8097 N 14.0802 E	Castello di Baia	1999	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	ADSL
CFBA	40.8097 N 14.1202 E	Meda A (Pozzuoli)	2016	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	UMTS
CFBB	40.8035 N 14.1326 E	Meda B (Pozzuoli)	2016	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	UMTS
CFBC	40.8057 N 14.1432 E	Meda C (Pozzuoli)	2016	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	UMTS
CFSB	40.7980 N 14.1198 E	Meda (Pozzuoli)	2016	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	UMTS
CMIS	40.7781 N 14.0889 E	Capo Miseno	2015	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	Wi-Fi
CUMA	40.8482 N 14.0586 E	Cuma	2017	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	LTE
FRUL	40.8779 N 14.2252 E	Frullone (Napoli)	2003	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	ADSL
IPPO	40.8371 N 14.1679 E	Ippodromo Agnano (Napoli)	1999	Leica GR10 LEIAR25 LEIT	1sec	ADSL

ISPT	40.8236 N 14.1425 E	Istituto Petronio Agnano	2024	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1 sec	Wi-Fi
ISMO	40.8262 N 14.1911 E	CNR - Istituto Motori	2016	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	ADSL
LICO	40.8764 N 14.0496 E	Licola	2003	Leica GR50 LEIAR25 LEIT	1sec	ADSL
MAFE	40.8474 N 14.2584 E	Università (Napoli)	2009	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1sec	ADSL
MITT	40.8263 N 14.1187 E	Mercato Ittico (Pozzuoli)	2023	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1sec	LTE
MORU	40.8596 N 14.0830 E	Monteruscello	2000	Leica GR50 LEIAT504 LEIS	1sec	ADSL
MPRO	40.7948 N 14.0552 E	Monte di Procida	2023	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1sec	LTE
MSTA	40.8378 N 14.1843 E	Monte S. Angelo Università (Napoli)	2023	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1sec	ADSL
NAMM	40.8363 N 14.2548 E	Porto di Napoli	2015	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	LTE
NISI	40.7972 N 14.1631 E	Nisida (Napoli)	2009	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	LTE
PIAN	40.8580 N 14.1733 E	Pianura (Napoli)	2023	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1sec	LTE
PIS1	40.8300 N 14.1460 E	Pisciarelli (Napoli)	2015	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	LTE
QUAL	40.9203 N 14.1507 E	Qualiano	2023	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1sec	LTE
QUAR	40.8777 N 14.1437 E	Municipio di Quarto	1999	Leica GR10 LEIAR25 LEIT	1sec	ADSL
RITE	40.8233 N 14.1262 E	Rione Terra (Pozzuoli)	2001	Leica GR10 LEIAR25 LEIT	1sec	Wi-Fi
SOCC	40.8472 N 14.1998 E	Soccavo (Napoli)	2023	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1sec	LTE
SOLO	40.8303 N 14.1357 E	Solfatara (Pozzuoli)	2006	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	LTE
STRZ	40.8351 N 14.1118 E	La Starza (Pozzuoli)	2006	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	Wi-Fi

TOIA	40.8437 N 14.0933 E	Rione Toiano (Pozzuoli)	2023	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1sec	LTE
VICA	40.8558 N 14.1205 E	Via Campana (Pozzuoli)	2008	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	ADSL
VNAP	40.82187 N 14.1311 E	Via Napoli (Pozzuoli)	2023	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1sec	LTE

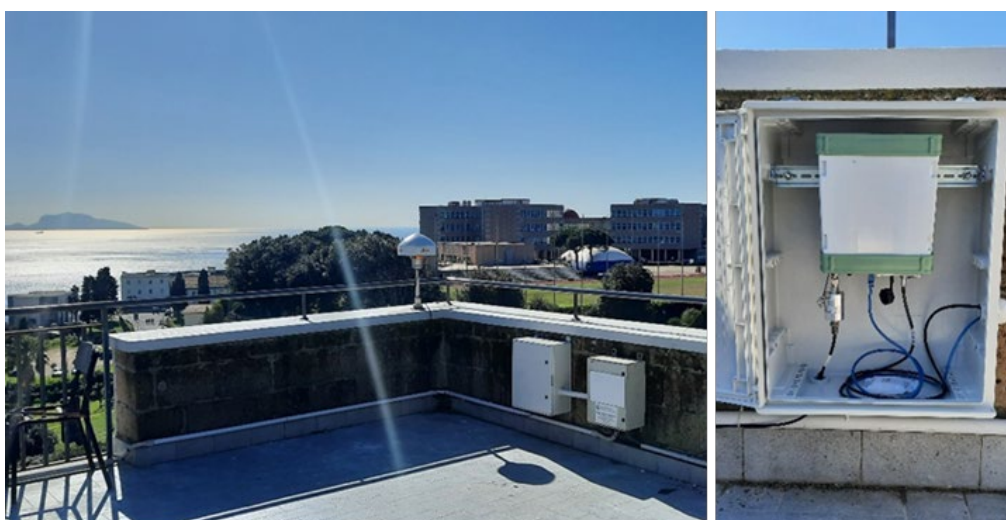


Figura 2.1.2 - Stazione GNSS ISPT (Istituto Petronio - Agnano) installata nel 2024.

Tutte le stazioni sono attrezzate con ricevitore GNSS di ultima generazione Leica GR10 e GR50 ed antenne di tipo Chock Ring Leica AR20 e AR25. Una sola stazione utilizza ancora un'antenna Leica AT504. Dodici stazioni trasmettono i dati acquisiti alla sala monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano di via Diocleziano attraverso linee ADSL, tredici utilizzano la connettività LTE, dieci utilizzano la rete Wi-Fi dell'Osservatorio Vesuviano. La maggior parte delle stazioni sono alimentate tramite rete elettrica e dotate di batteria tampone per estenderne l'operatività in caso di blackout. Otto stazioni (BAAC, BAGN, NAMM, NISI, PIAN, PIS1, RITE, SOCC) e le quattro ubicate sulle mede nel Golfo di Pozzuoli (CFBA, CFBB, CFBC, CFSB) sono alimentate da un pannello solare di circa 150W.

Tutte le stazioni GNSS sono programmate con una doppia acquisizione in locale (file giornaliero a 30 sec ed orario ad 1 sec) e flusso dati ad 1 sec in tempo reale verso la Sala di Monitoraggio OV.

La gestione remota delle stazioni, la programmazione e download dei dati, la ricezione e processamento del flusso dati in tempo reale vengono effettuati tramite il software Spider della Leica Geosystems. Procedure automatiche giornaliere provvedono alla verifica e validazione dei dati, all'archiviazione e al processamento dei dati GNSS, alla restituzione dei risultati (serie temporali delle variazioni lungo le componenti Nord, Est e Quota, campi di velocità e/o spostamento planimetrici e verticali)

Dal 2022 è operativo in Sala di Monitoraggio OV il sistema di processamento e visualizzazione in tempo reale dei dati ad alta frequenza (1 Hz) delle stazioni GNSS dell'area vulcanica napoletana (Figura 2.1.3) realizzato nell'ambito della Convenzione DPC-INGV 2019-2021 (Allegato B2, WP2-Task2).

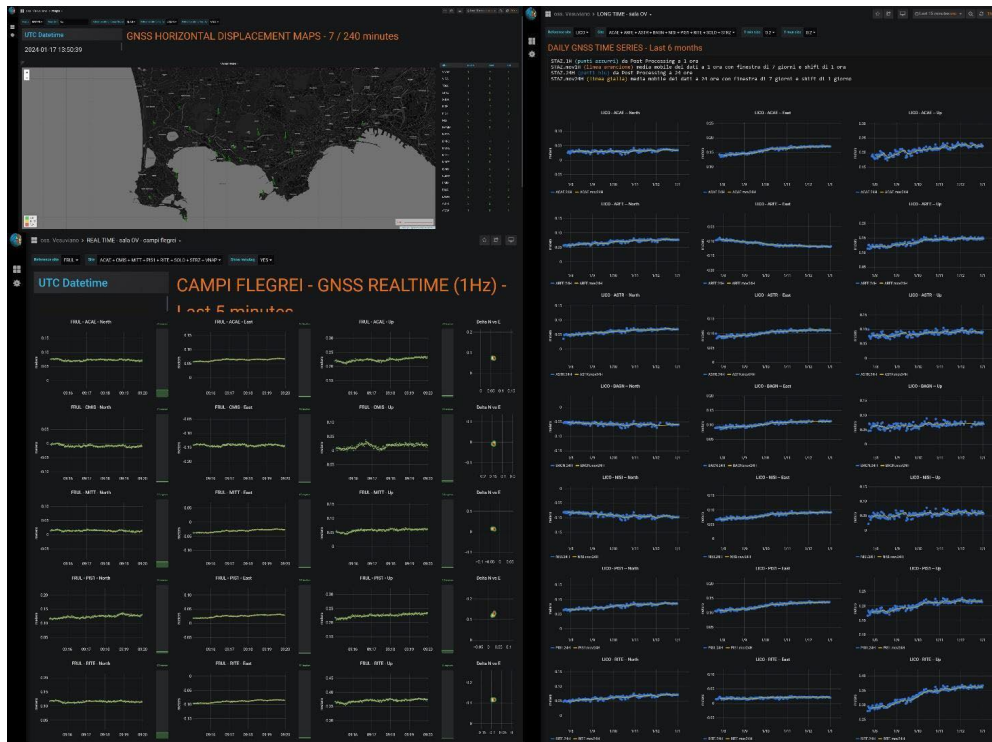


Figura 2.1.3 - (RTView_OV) Sistema di visualizzazione ed analisi in tempo reale dei dati GNSS ad alta frequenza (1 Hz) e giornalieri (24h) operativo in Sala di Monitoraggio per i Campi Flegrei.

Durante il 2024 la velocità massima di sollevamento del suolo è stata caratterizzata da variazioni evidenziate nella Figura 2.1.4. Dalla metà di aprile a luglio 2024 (fascia blu in Figura 2.1.4) il valore medio della velocità di sollevamento nell'area di massima deformazione è stato di circa 20 ± 3 mm/mese alla stazione GNSS di Rione Terra (RITE). Dagli inizi di agosto il valore medio della velocità di sollevamento nell'area di massima deformazione è stato di circa 10 ± 3 mm/mese alla stazione GNSS di RITE (fascia grigia in Figura 2.1.4).

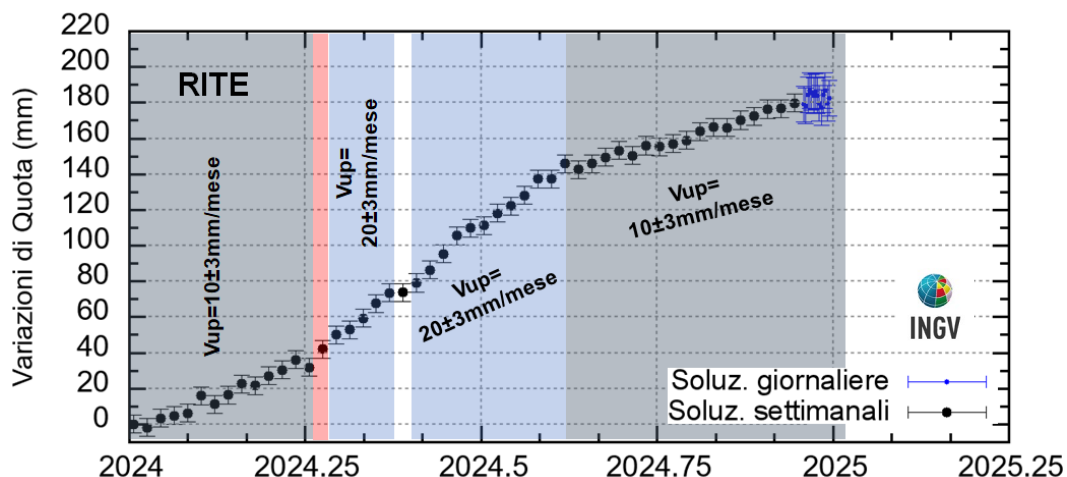


Figura 2.1.4 - Serie temporale delle variazioni in quota della stazione GNSS di RITE nel 2024. Elaborazione dati in modalità Precise Point Positioning con software PRIDE PPP-AR.

Il sollevamento totale registrato alla stazione GNSS di RITE (area di massima deformazione) è stato di circa 136.5 cm da novembre 2005, inizio dell'attuale fase di unrest (Figura 2.1.5), e di circa 18.5 cm nel 2024 (Figura 2.1.4).

La Figura 2.1.6 riporta le serie temporali delle variazioni in quota nel 2024 di alcune stazioni GNSS ubicate nella zona di massima deformazione dei Campi Flegrei.

STAZIONE GNSS RITE (Rione Terra - Pozzuoli)

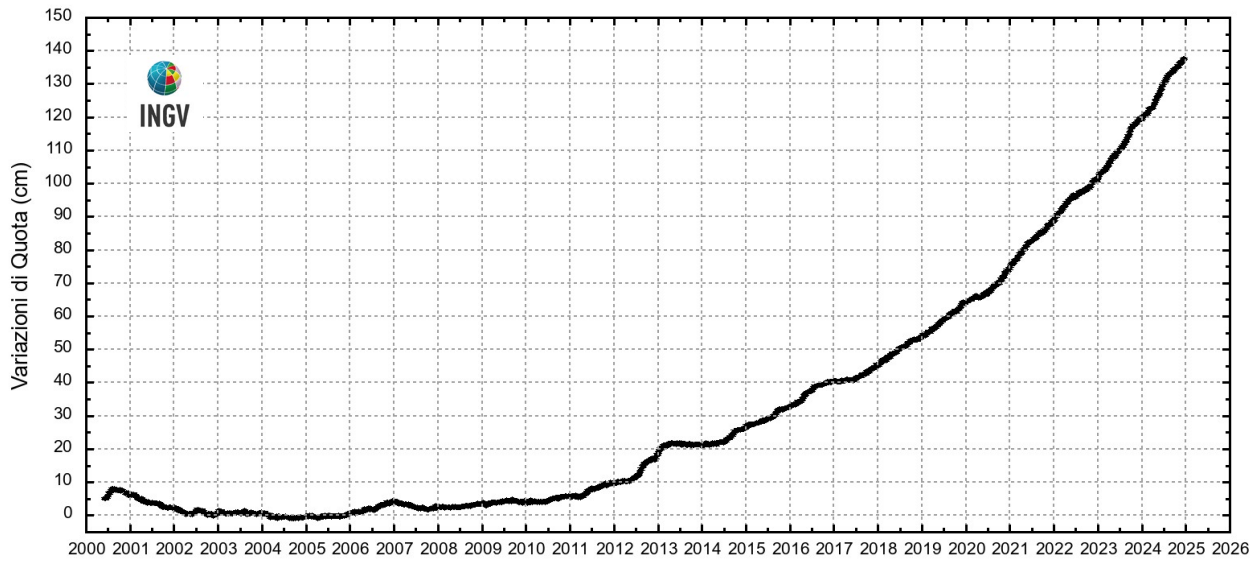


Figura 2.1.5 – Serie temporale delle variazioni in quota settimanali della stazione di RITE (Pozzuoli) dal 2000 a dicembre 2024.

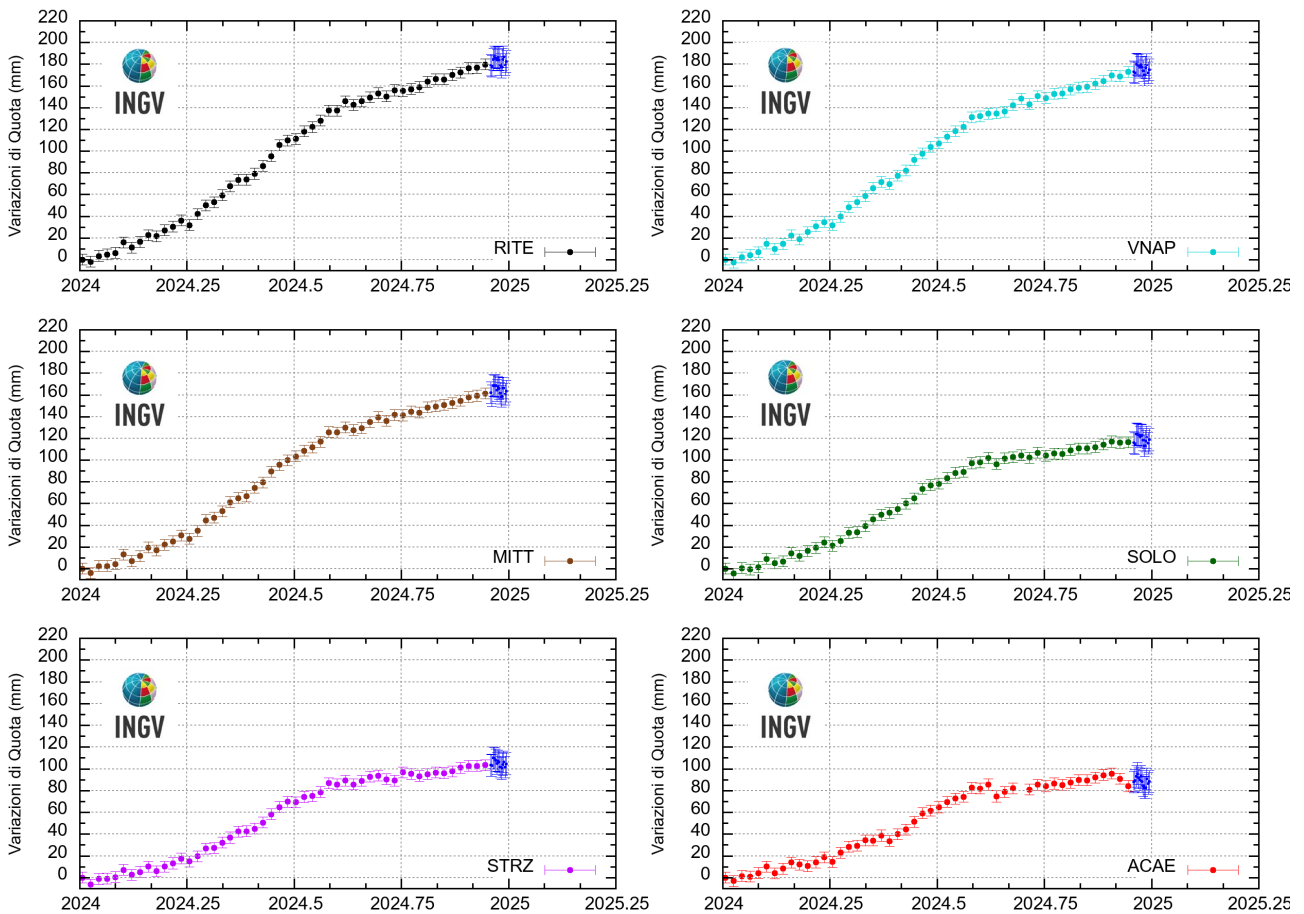


Figura 2.1.6 - Serie temporali delle variazioni in quota delle stazioni di RITE (Pozzuoli - Rione Terra), VNAP (Pozzuoli - Via Napoli), MITT (Pozzuoli - Porto), SOLO (Solfatara), STRZ (Pozzuoli - Cimitero) e ACAE (Accademia Aeronautica) nel 2024. Elaborazione dati in modalità Precise Point Positioning con software PRIDE PPP-AR.

In Figura 2.1.7 è riportata la mappa dei vettori degli spostamenti orizzontali (a) e delle deformazioni verticali (b) registrati alle stazioni GNSS ai Campi Flegrei dal 2023. Si conferma la forma radiale del campo di deformazione con la caratteristica forma a campana, simile a quelle già individuate nelle precedenti fasi del sollevamento, e la conseguente stabilità della posizione della sorgente di deformazione localizzata qualche centinaio di metri a sud della stazione RITE.

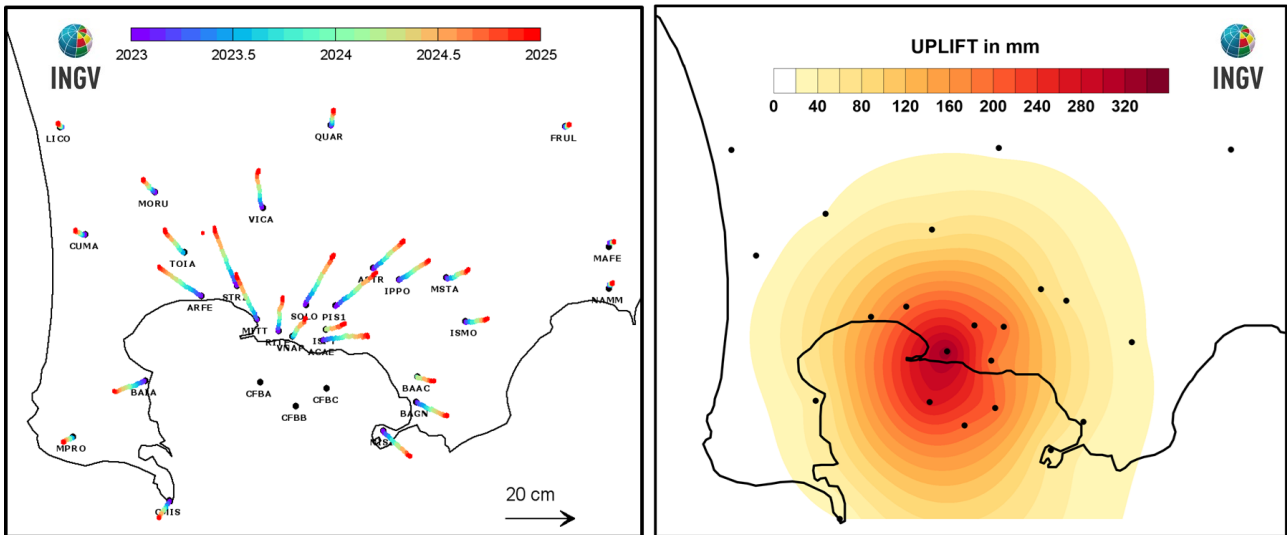


Figura 2.1.7 - Mappa degli spostamenti GNSS orizzontali (a) e verticali (b) registrati nell'area flegrea da gennaio 2023 a dicembre 2024.

Permane l'anomalia locale alla stazione GNSS di ACAE (Accademia Aeronautica), già riportata nei precedenti bollettini e relazioni. In concomitanza dello sciame sismico del 6 dicembre 2024, localizzato nell'area Accademia Aeronautica-Solfatara, la stazione GNSS di ACAE ha registrato uno spostamento di circa 5 mm verso Sud ed un abbassamento di circa 1 cm (Figura 2.1.8).

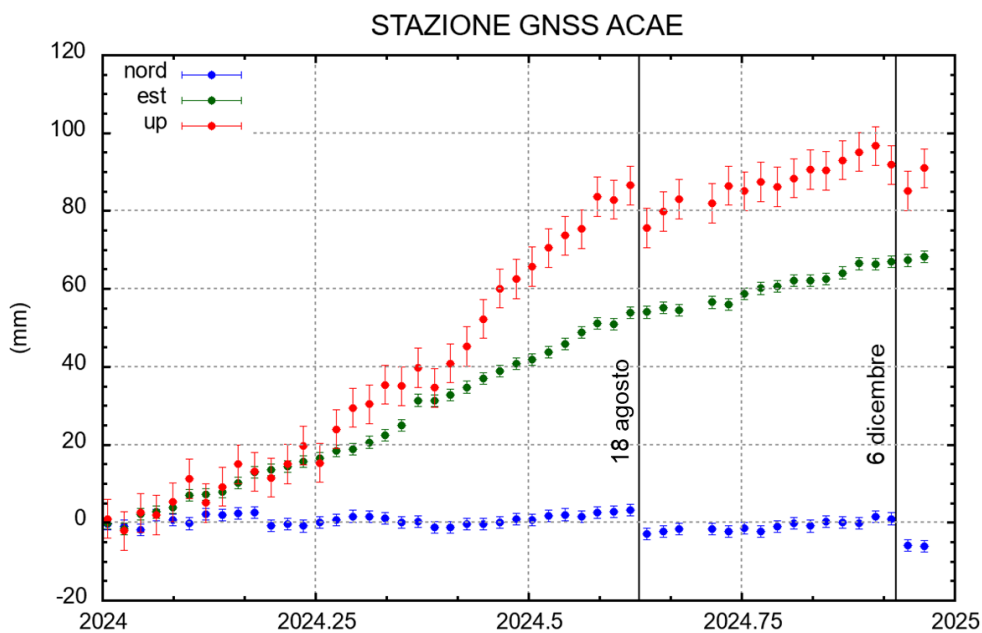


Figura 2.1.8 – Serie temporali delle variazioni settimanali lungo le componenti Nord, Est e Up della stazione GNSS di ACAE nel 2024.

Lo stesso fenomeno si era verificato in occasione dello sciame sismico del 17-18 agosto 2024 (vedi anche bollettino mensile Campi Flegrei di agosto 2024).

Le deformazioni verticali del fondale marino della caldera flegrea registrate dal sistema MEDUSA sono riportate in Figura 2.1.9.

Alla stazione CFBA il sollevamento dal 2023 è di circa 27 cm.

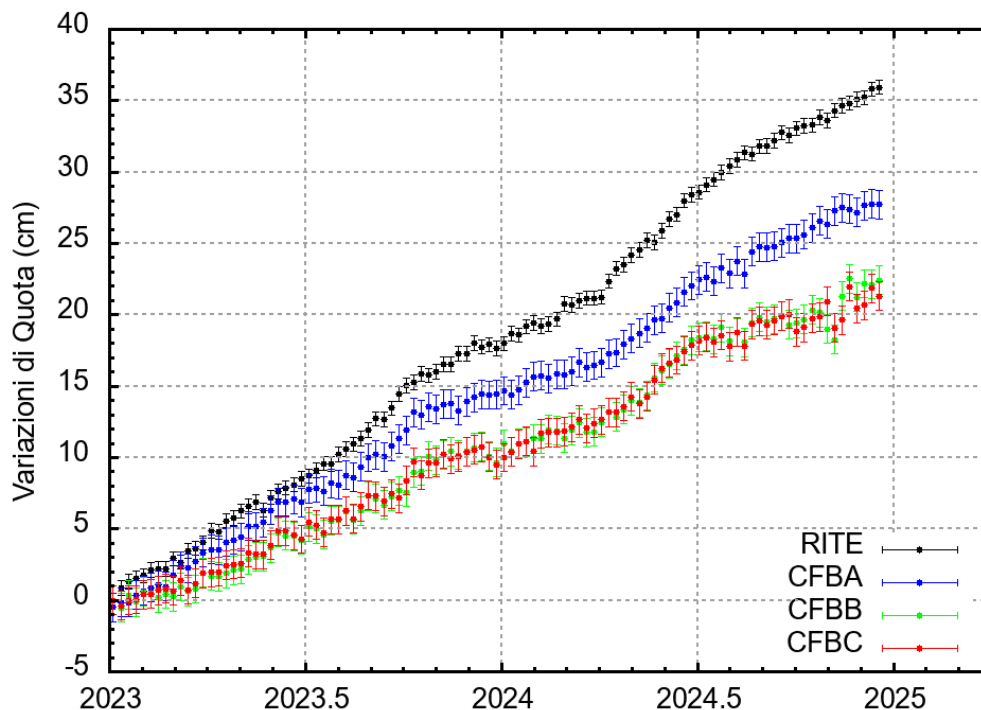


Figura 2.1.9 - Serie temporali delle variazioni settimanali in quota delle stazioni GNSS dell'infrastruttura marina MEDUSA nell'intervallo gennaio 2023 - dicembre 2024, confrontate con quella della stazione RITE.

2.2 RETE TILTMETRICA

I. Aquino¹, V. Augusti¹, F. De Cicco¹, M. Papaccio¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano – Napoli

La rete tiltmetrica operante nell'area dei Campi Flegrei è costituita da 13 siti di cui 4 attrezzati con sensori analogici di superficie, mod. 702 (Applied Geomechanics Instruments), 3 con sensori analogici borehole (da pozzo) mod. 722 (Applied Geomechanics Instruments), 3 con sensori digitali borehole (da pozzo) mod. Lily (Jewell Instrument) e 3 siti aggiuntivi da attrezzare con ulteriori sensori digitali da pozzo, mod. Lily (Jewell Instrument). La geometria della rete è mostrata in figura 2.2.1 e in Tabella 2.2.1 sono riportati i nomi delle stazioni, le coordinate, le specifiche della strumentazione, gli intervalli di acquisizione dati ed i sistemi di trasmissione utilizzati.

Il mod. 702 è un sensore analogico di superficie, il mod 722 è un sensore analogico borehole (dell'Applied Geomechanics Instruments); essi sono tiltmetri elettronici biassiali con trasduttori a bolla che misurano variazioni di inclinazione del suolo dell'ordine di 0.1 mrad, lungo direzioni ortogonali X e Y e sono corredati da un sensore termico. Il tiltmetro mod. Lily (della Jewell Instrument) è un sensore digitale borehole anch'esso biassiale e dotato di sensore termico con una risoluzione inferiore a 5 nanorads, inoltre è dotato di una bussola magnetica. Le stazioni tiltmetriche sono alimentate tramite rete elettrica dove è possibile oppure tramite pannello solare e dotate di batterie tampone. Tutte le stazioni acquisiscono 1 dato al minuto e i dati vengono archiviati in un datalogger e inviati al Centro di Monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano.

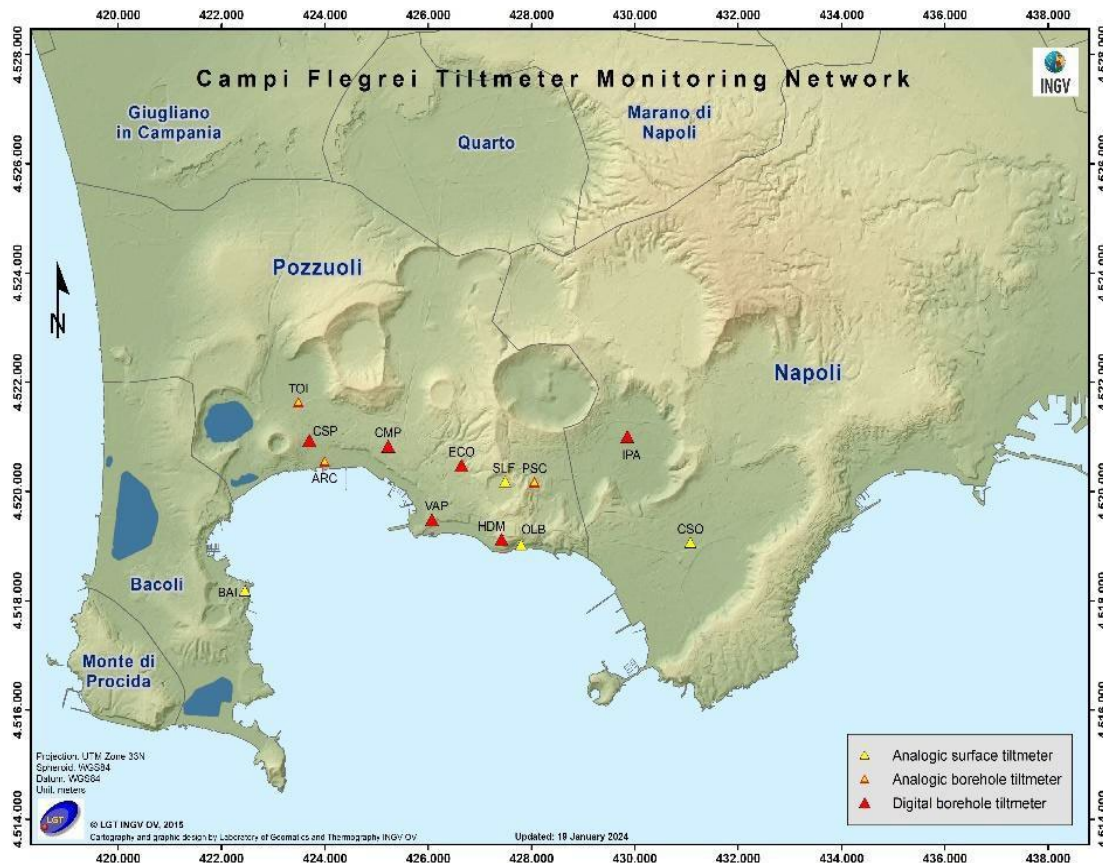


Figura 2.2.1 – Mappa della Rete Tiltmetrica dei Campi Flegrei.

I segnali registrati dalle stazioni tiltmetriche flegree consistono in serie temporali delle variazioni di inclinazione del suolo lungo due piani ortogonali (NS ed EW), di temperatura e declinazione magnetica (solo per i sensori digitali) e di pressione atmosferica (per i sensori analogici).

Tabella 2.2.1 – Rete Tiltmetrica dei Campi Flegrei

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Profondità	Acquisizione	Trasmissione
BAI	40.8109N 14.0807E 35 m. s.l.m	Bacoli Castello di Baia	22/05/1992	Applied Geomechanics mod. 702	Piano campagna	1'	Wi-Fi
SLF	40.8293N 14.1399E 104 m. s.l.m	Pozzuoli Solfatara	21/11/2011	Applied Geomechanics mod. 702	Piano campagna	1'	Wi-Fi
OLB	40.8188N 14.1435E 30 m. s.l.m	Pozzuoli M. Olibano	26/02/2006	Applied Geomechanics mod. 702	Piano campagna	1'	Wi-Fi
CSO	40.8197N 14.1826E 19 m. s.l.m	Napoli Sede OV	26/02/2006	Applied Geomechanics mod. 702	-5 metri	1'	Linea telefonica
TOI	40.8422N 14.0924E 25 m. s.l.m	Pozzuoli Rione Toiano	16/04/2002	Applied Geomechanics mod. 722	-8 metri	1'	GSM
ARC	40.8324N 14.0985E 3 m. s.l.m	Arco Felice S.M. Pergolesi	14/12/2003	Applied Geomechanics mod. 722	-6 metri	1'	GSM
PSC	40.8300N 14.1457E 79 m. s.l.m	Pozzuoli Pisciarelli	21/11/2013	Applied Geomechanics mod. 722	-1 metro	1'	GSM
CMP	40.8351N 14.1131E 61 m. s.l.m	Pozzuoli Cimitero Comunale	20/03/2015	Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri	1'	Wi-Fi
ECO	40.8320N 14.1300E 112 m. s.l.m	Pozzuoli Isola ecologica	27/03/2015	Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri	1'	Router UMTS
HDM	40.8199N 14.1394E 115 m. s.l.m	Pozzuoli Accademia Aeronautica	12/02/2015	Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri	1'	Router UMTS
CSP	40.8358N 14.0950E 27 m. s.l.m	Pozzuoli Campo Spostivo Domenico Conte		Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri		
VAP	40.8233N 14.1233E 31 m s.l.m.	Pozzuoli Servizio giardini di Villa Avellino		Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri		
IPA	40.8370N 14.1677E 14 m s.l.m.	Napoli Parcheggio mensa Ippodromo		Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri		

Le sequenze tiltmetriche considerate per il calcolo del campo di inclinazione del suolo derivano dai segnali originali registrati per le stazioni borehole e da quelli sottoposti ad un trattamento statistico di decorrelazione dagli effetti termici per le stazioni superficiali. L'alta risoluzione dei sensori tiltmetrici borehole consente di registrare variazioni di inclinazione del suolo anche associabili a variazioni locali dovute a migrazione di fluidi in aree ad elevata fratturazione che si sovrappongono alle variazioni dovute al campo di deformazione principale.

L'odografo di Fig. 2.2.2 riassume il tilting registrato dalle 3 stazioni digitali funzionanti, i cui segnali sono filtrati delle periodicità inferiori ad 1 giorno. In tale figura la deformazione relativa ad ogni sito-stazione è rappresentata con segmenti orientati di colore diverso che rappresentano la variazione progressiva registrata dal sensore. 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 la data di fine anno e 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.

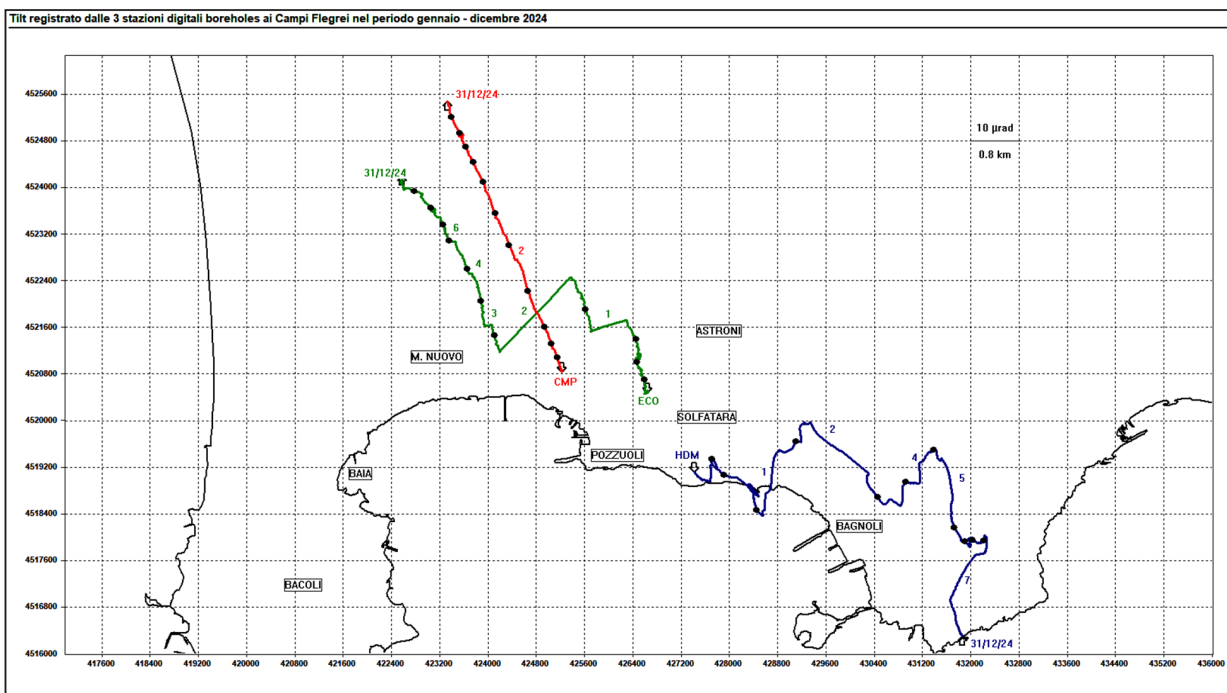


Figura 2.2.2 - Pattern tiltmetrico registrato ai Campi Flegrei nel 2024 dai sensori CMP (rosso), ECO (verde) e HDM (blu) ubicati a 25 m di profondità. Il lato di ogni maglia del reticolo equivale a 10 μradianti o 0.8 km. I pallini neri sovrapposti ai vettori tilt indicano intervalli di un mese. I numeri a lato dei segnali indicano le anomalie indotte dagli eventi sismici con $M_d \geq 2.8$

La variazione tiltmetrica che si osserva ai Campi Flegrei nel 2024 mostra una simmetria quasi radiale ed è caratterizzata da un pattern polarizzato lungo 2 direzioni, NNW per le stazioni CMP ed ECO e SE per HDM. In corrispondenza dei 7 eventi sismici più energetici (Tab. 2.2.2) si osservano anomalie sia ad ECO che ad HDM.

Tabella 2.2.2 – Eventi sismici più energetici registrati nel 2024

	Data	M_d	Profondità
1	14/4	3.7	2.6
2	20/5	4.4	2.6
3	8/6	3.7	2.3
4	26/7	4.0	4.2
5	18/8	2.8	0.4
6	30/8	3.7	2.7
7	6/12	3.4	0.5

Nel 2024 il pattern di deformazione registrato dalla rete tiltmetrica dei Campi Flegrei mostra un incremento dell'inclinazione del suolo cominciato nel luglio 2023 coincidente con l'incremento della sismicità.

I segnali registrati alla stazione CMP, situata a W del centroide di deformazione (Pozzuoli), mostrano, complessivamente, un'inclinazione del suolo in direzione NNW che segue una simmetria radiale correlata all'evoluzione temporale del campo di deformazione generato dalla fase di uplift che interessa l'area flegrea.

Il 20/05 in corrispondenza dei terremoti con magnitudo max 4.4, la componente EW ha registrato un tilt cosismico di 0.5 mrad in direzione W.

I segnali registrati alla stazione ECO, situata a N del centroide di deformazione (Pozzuoli), mostrano un generale abbassamento del suolo in direzione NW indotto dalla fase di uplift che interessa l'area flegrea. Su tale segnale sono stati individuati almeno 5 tilt cosismici permanenti generati dagli eventi sismici più energetici:

- (1)** il 14/4 l'evento sismico di $M_d=3.7$ ha generato un tilt cosismico di 7.3 mrad in direzione WSW
- (2)** il 20/5 l'evento sismico di $M_d=4.4$ ha generato un tilt cosismico di 21.3 mrad in direzione SW
- (3)** l'8/6 l'evento sismico di $M_d=3.7$ ha generato un tilt cosismico di 1.5 mrad in direzione W
- (4)** il 26/7 l'evento sismico di $M_d=4.0$ ha generato un tilt cosismico di 0.8 mrad in direzione W
- (6)** il 30/8 l'evento sismico di $M_d=3.4$ ha generato un tilt cosismico di 1.3 mrad in direzione W

I segnali registrati alla stazione HDM mostrano un generale abbassamento del suolo in direzione SE indotto dalla fase di uplift che interessa l'area flegrea. Questo andamento è modulato da inversioni di direzione dell'inclinazione del suolo generate dagli eventi sismici più energetici:

- (1)** il 14/4 l'evento sismico di $M_d=3.7$ ha generato un'inversione di direzione a NE
- (2)** il 20/5 l'evento sismico di $M_d=4.4$ ha generato un'inversione di direzione a SE
- (4)** il 26/7 l'evento sismico di $M_d=4.0$ ha generato un'inversione di direzione a N
- (5)** il 18/8 l'evento sismico di $M_d=2.8$ ha generato un'inversione di direzione a S
- (7)** il 6/12 l'evento sismico di $M_d=3.4$ ha generato un'inversione di direzione a SW

Nella Tabella 2.2.3 sono riportati, per le 3 stazioni digitali i valori cumulativi: della variazione di inclinazione del suolo in μ radianti, della variazione di temperatura registrata a fondo pozzo (≈ -25 m dal p.c.) e della direzione di tilting acquisite nel corso del 2024.

Tabella 2.2.3 - Tilt registrato, variazione termica e azimuth relativi alle stazioni digitali.

Stazione	Inclinazione	Temperatura	Azimuth
Stazione ECO (89 m s.l.m.)	68.9 μ radianti a NW	0.05 °C	312°
Stazione CMP (62 m s.l.m.)	60.4 μ radianti a NNW	0.03 °C	337°
Stazione HDM(112 m s.l.m.)	65.5 μ radianti a SE	-0.03 °C	122°

2.3 RETE MAREOGRAFICA

S. Guardato¹, R. Riccio¹, M. Dupuis¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano – Napoli

La Rete Mareometrica dei Campi Flegrei consiste di 5 stazioni (Figura 2.3.1, Tabella 2.3.1). Nel corso del 2024, il funzionamento della rete si è assestato ai valori di completezza dei dati pari al 100% (Tabella 2.3.2). I dati sono disponibili all'indirizzo web: <http://medusa.ingv.it/MAREO/index.php>.

Il monitoraggio del livello mareometrico è realizzato mediante sensori elettro-meccanici costituiti da una piccola catena in materiale plastico, di lunghezza fissa, alle cui estremità sono fissati – in controbilanciamento – un elemento di appesantimento ed un galleggiante; la catena è fatta passare su di una puleggia, costituente lo shaft-encoder analogico. Il sistema così costituito è installato all'interno di un opportuno tubo di calma metallico in accoppiamento diretto con il mare. I segnali, campionati ogni minuto, sono acquisiti da un convertitore A/D, memorizzati in files locali e, quindi, trasmessi via modem GSM-UMTS alla sala di monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano. L'alimentazione di tutto il sistema avviene, per la maggior parte delle stazioni, mediante l'utilizzo di pannelli fotovoltaici, batterie tampone e regolatori di carica; alla stazione POPT è presente anche l'energia elettrica fornita dalla rete di distribuzione.

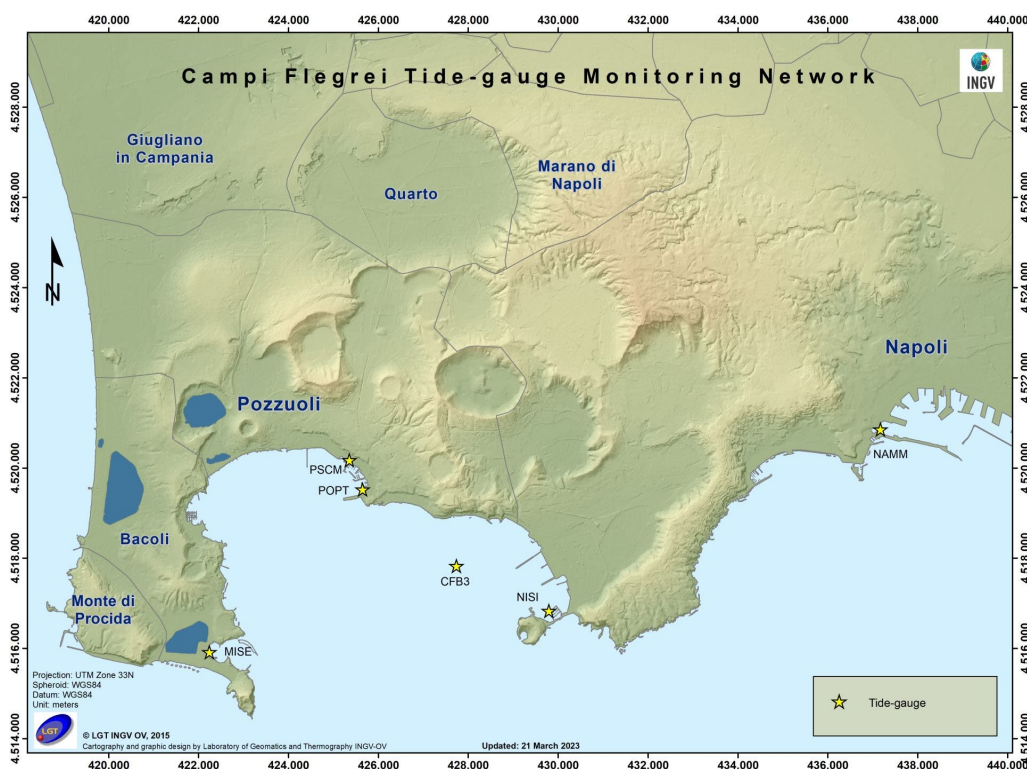


Figura 2.3.1 – Rete Mareometrica dei Campi Flegrei.

Le stazioni sono installate sulle banchine dei relativi moli in cabine metalliche o contenitori in vetroresina. L'ubicazione in ambiente marino condiziona notevolmente le strutture di alloggio e pertanto è indispensabile una loro frequente manutenzione. A tale scopo vengono effettuati periodicamente, da personale subacqueo specializzato di ditte esterne all'Ente, lavori di sturo e di sostituzione degli anodi sacrificali di zinco ai tubi di

calma, oltre ad eventuali operazioni di manutenzione straordinaria (es. presenza di oggetti che ostruiscono il tubo o altro). La stazione CFB3 della relativa boa dell'infrastruttura marina multi-parametrica permanente MEDUSA presente nel Golfo di Pozzuoli, e la stazione POPT sono provviste di un sensore di tipo radar (completamente digitale) con frequenza di campionamento di un campione al minuto e sistemi di acquisizione e trasmissione completamente digitali.

Tabella 2.3.1 – Stazioni della Rete Mareometrica dei Campi Flegrei.

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
MISE	40.7905N 14.0783E	Capo Miseno	10/10/2002	di livello con shaft-encoder	60sec	UMTS-GSM
PSCM	40.8292N 14.1147E	Pozzuoli, molo Sud, Cantieri "Maglietta"	12/05/2005	di livello con shaft-encoder	60sec	UMTS-GSM
POPT	40.8233N 14.1147E	Pozzuoli, Porto	10/10/2002	di livello con shaft-encoder + radar	60sec	UMTS-GSM
CFB3	40.8090N 14.1433E	Boa CFB3 (MEDUSA) Golfo di Pozzuoli	15/11/2016	radar	60sec	UMTS-GSM
NISI	40.7994N 14.1678E	Nisida	19/12/2003	di livello con shaft-encoder	60sec	UMTS-GSM
Stazione mareografica di riferimento: Napoli, Molo S. Vincenzo						
NAMM	40.8364N 14.2547E	Napoli, Molo S. Vincenzo	06/10/2015	di livello con shaft-encoder	60sec	UMTS-GSM

Tabella 2.3.2 – Stato di funzionamento della Rete Mareometrica dei Campi Flegrei.

Stazione	Giorni di funzionamento	Giorni con mancanza di dati	Percentuale di funzionamento
MISE	366	nessuno	100%
PSCM	366	nessuno	100%
POPT	366	nessuno	100%
CFB3	366	nessuno	100%
NISI	366	nessuno	100%
NAMM	364	2	99.5%

La riorganizzazione dell'intera Rete Mareometrica, avvenuta nei primi mesi del 2023 ha permesso di ripristinare i segnali della rete mareografica, ferma da giugno 2021, e che nel corso del 2024 ha prodotto il 100% dei dati con continuità.

Nell'area vulcanica dei Campi Flegrei, le analisi dei dati (Figura 2.3.2) della stazione di Pozzuoli Porto (POPT), da gennaio 2006 alla fine del 2024, mostrano un sollevamento del suolo di circa 131.6 cm.

Nel solo periodo gennaio 2016 – dicembre 2024, il sollevamento del suolo registrato alla stazione POPT è stato di circa 99.1 cm (Figura 2.3.3).

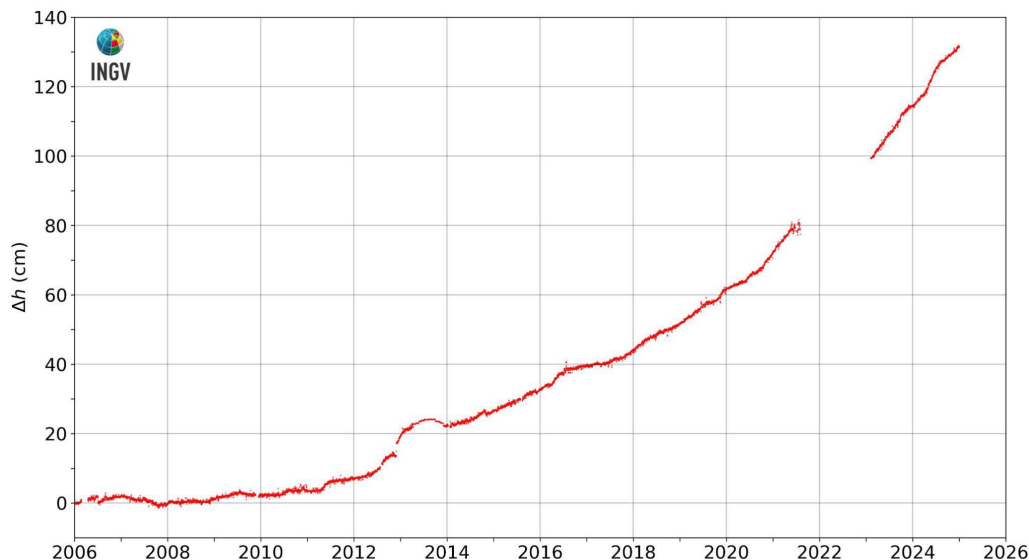


Figura 2.3.2 – Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2006 - dicembre 2024, ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti alla stazione mareografica di Pozzuoli Porto (POPT) (area centrale della caldera flegrea). Le variazioni riportate rappresentano le medie giornaliere e sono riferite alla stazione di Napoli, Molo S. Vincenzo (NAMM).

Nel corso di tutto il 2024 alla stazione POPT è stato registrato un sollevamento del suolo pari a 17 cm (parte più a destra della Figura 2.3.3), consolidando il trend di uplift osservato nel medesimo periodo temporale.

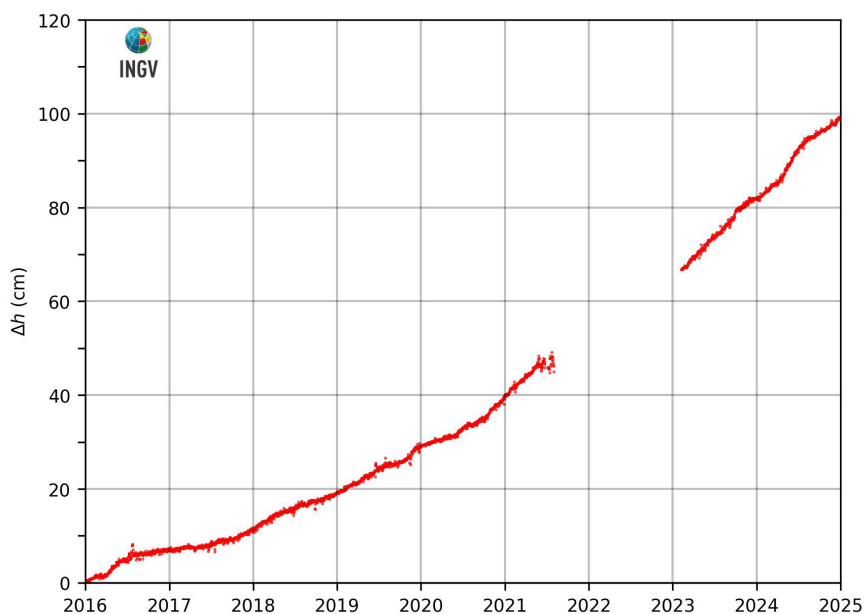


Figura 2.3.3 – Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2016 - dicembre 2024, ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti alla stazione mareografica di Pozzuoli Porto (POPT) (area centrale della caldera flegrea). Le variazioni riportate rappresentano le medie giornaliere e sono riferite alla stazione di Napoli, Molo S. Vincenzo (NAMM).

Nel corso del 2025, non appena saranno disponibili le risorse finanziarie necessarie, si prevede di munire tutte le stazioni mareometriche anche del sensore digitale radar, in funzionamento parallelo a quello esistente e per un periodo di prova di almeno 6 mesi, per poi passare definitivamente alla soppressione delle ormai obsolete stazioni elettromeccaniche con quelle totalmente digitali. Si prevede anche di ammodernare i sistemi relativi all'energizzazione delle stazioni.

In previsione del potenziamento suddetto, dal 20/06/2024 alla stazione POPT (Pozzuoli Porto) sono stati installati un sensore radar digitale ed una stazione meteorologica (Figura 2.3.4). I dati registrati dai due sensori della stazione sono disponibili ai seguenti indirizzi web:

<http://medusa.ingv.it/POPT/tidegauge/index.php>

<http://medusa.ingv.it/POPT/meteo/index.php>

Nella Figura 2.3.5 vengono mostrati i dati dei due sensori disponibili alla stazione POPT, da cui si evince, per il periodo 20/06/2024 al 31/12/2024, una similitudine dei dati registrati con un indice di correlazione del 99%.



Figura 2.3.4 – Il nuovo sensore digitale radar e la stazione meteorologica installati alla stazione di Pozzuoli Porto (POPT).

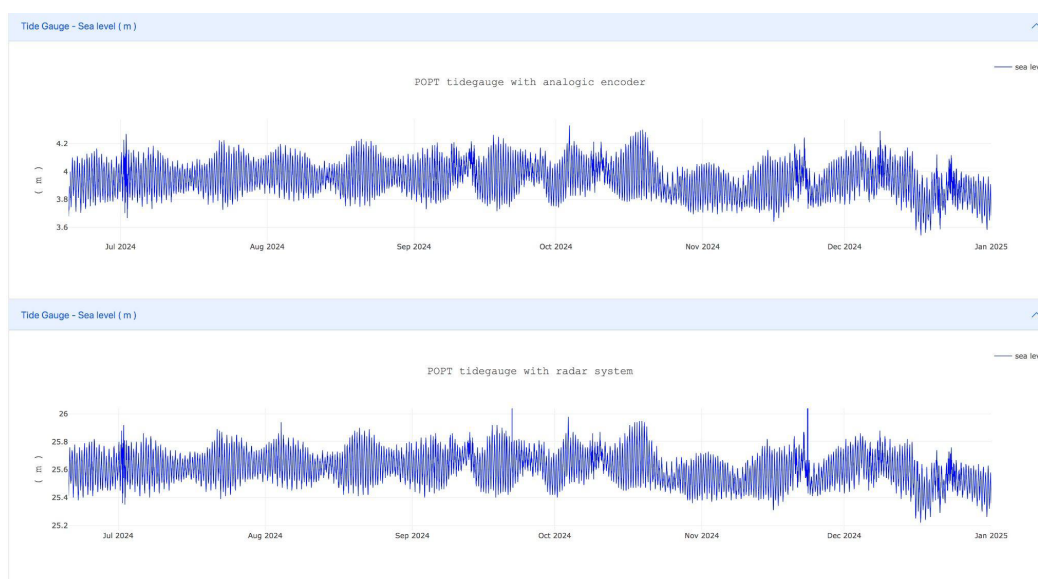


Figura 2.3.5 - Confronto dei dati registrati dai due sensori (encoder e radar) alla stazione di Pozzuoli Porto (POPT) nel periodo 20/06/2024 al 31/12/2024.

Nelle figure seguenti vengono mostrati, a completamento, i dati registrati da tutte le 5 stazioni mareometriche dell'area dei campi Flegrei per i periodi gennaio 2006 – dicembre 2024 (Figura 2.3.6) e gennaio 2016 – dicembre 2024 (Figura 2.3.7), sempre riferiti alla stazione NAMM posta fuori l'area di deformazione.

Anche l'analisi dei dati registrati da tutte le altre stazioni mareometriche dei Campi Flegrei mostra un trend in uplift della deformazione, in accordo con la fenomenologia in atto nell'area, anche se i valori di deformazione misurati (riferiti tutti alla stazione NAMM) sono di entità minore (Tabella 2.3.3) se si considera che, a partire dalla curva mostrata più in alto dai relativi grafici, l'ubicazione delle stazioni riportate è via via più lontana dall'area di massima deformazione.

Tabella 2.3.3 – Riepilogo delle deformazioni verticali registrate (valori in cm) dalle stazioni della Rete Mareometrica dei Campi Flegrei riferite alla stazione NAMM di Napoli, Molo S. Vincenzo.

Stazione	Periodo di riferimento		
	dal 2006 al 2024	dal 2016 al 2024	2024
POPT	131.6	99.1	17.0
PSCM	115.5	87.0	14.2
CFB3	84.9	63.9	12.0
NISI	28.8	18.8	3.3
MISE	11.5	7.5	1.4

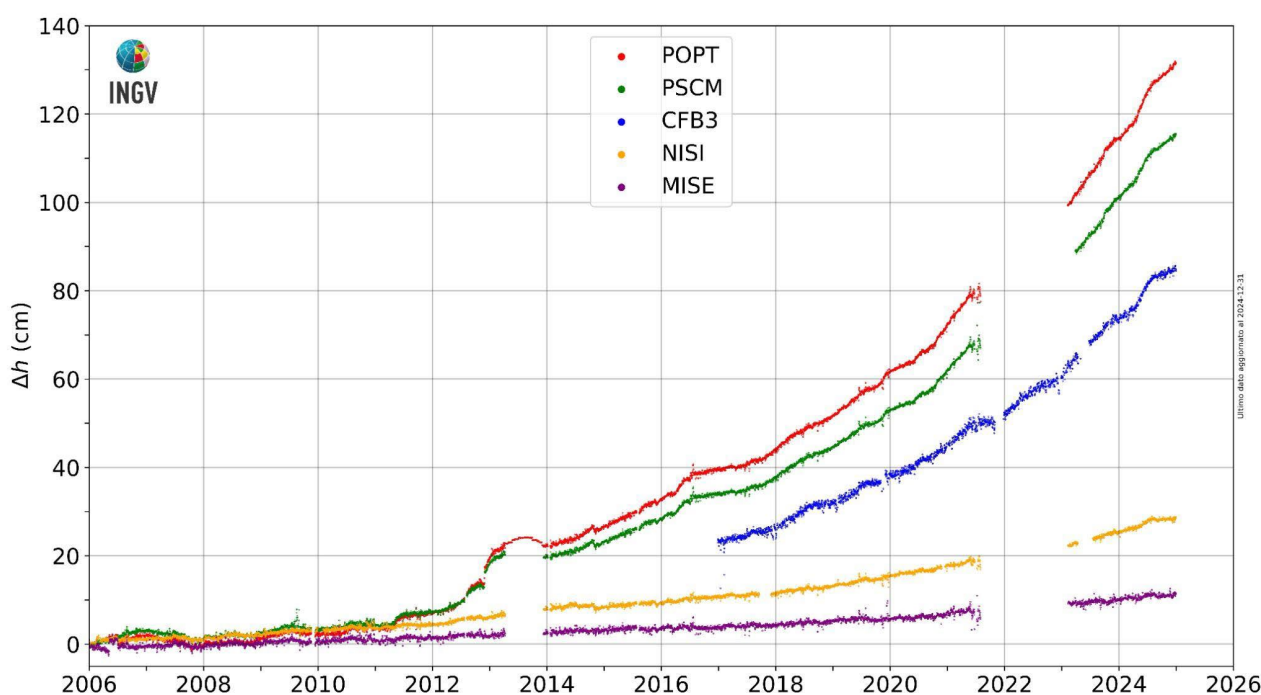


Figura 2.3.6 - Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2006 - dicembre 2024, ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti da tutte le stazioni mareografiche dell'area dei Campi Flegrei. Le variazioni riportate rappresentano le medie giornaliere e sono riferite alla stazione di Napoli, Molo S. Vincenzo (NAMM).

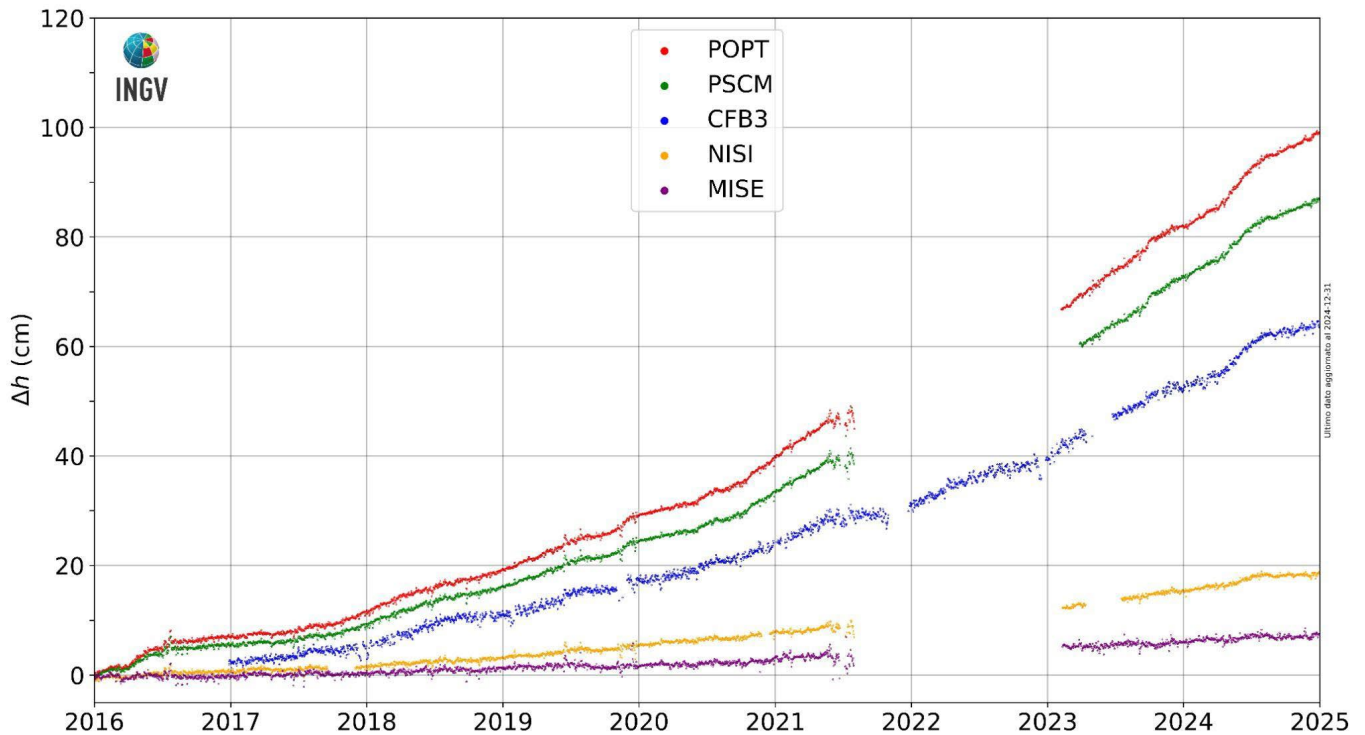


Figura 2.3.7 – Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2016 - dicembre 2024, ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti da tutte le stazioni mareografiche dell'area dei Campi Flegrei. Le variazioni riportate rappresentano le medie giornaliere e sono riferite alla stazione di Napoli, Molo S. Vincenzo (NAMM).

2.4 RETE GRAVIMETRICA

S. Carlino¹, T. Pivetta¹, G. Ricciardi¹, A. Fedele¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

2.4.1 CAMPAGNE PERIODICHE

La Rete Gravimetrica dei Campi Flegrei è attualmente composta da 36 stazioni di misura relativa (Figura 2.4.1) collegate alla stazione gravimetrica assoluta di Napoli (Largo San Marcellino), assunta come riferimento (per un totale di 37 stazioni). Questo numero comprende due nuove stazioni che sono state aggiunte nel corso del 2023 nel settore a ovest di Pozzuoli, denominate Diocesi e Lucrino. La revisione della rete gravimetrica è eseguita con l'obiettivo di rendere più omogenea la distribuzione dei punti di misura ad est e a ovest di Pozzuoli, in particolare lungo il settore costiero.

(Figura 2.4.1).

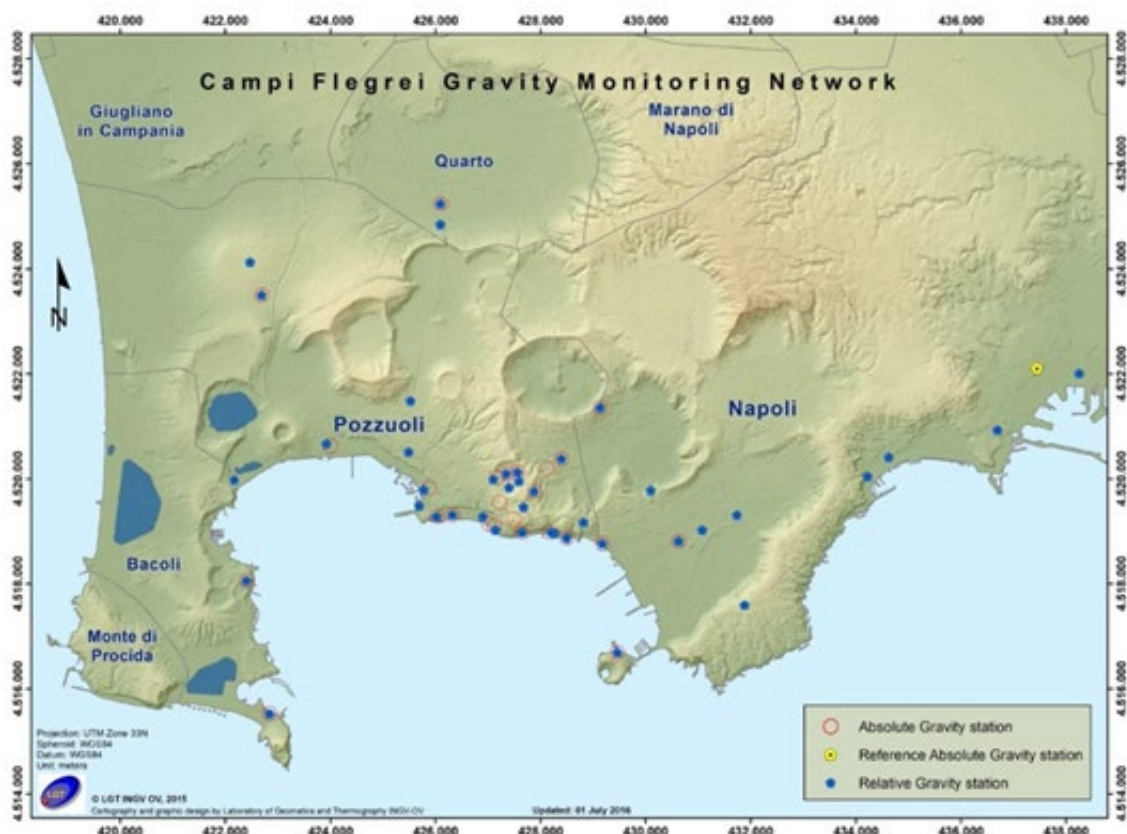


Figura 2.4.1 - Vertici della rete gravimetrica dell'OV-INGV (www.ov.ingv.it). Il punto giallo, che rappresenta il caposaldo assoluto di riferimento, è localizzato presso il complesso monumentale di Largo San Marcellino (Napoli).

Nel mese di ottobre 2024 è stata condotta una campagna di misure gravimetriche relative, nell'area dei Campi Flegrei. Le misure sono state eseguite sui 39 vertici dell'intera rete (Figura 2.4.1), collegati alla stazione gravimetrica assoluta di Napoli (Largo San Marcellino), assunta come riferimento. Le misure gravimetriche relative sono state eseguite con il gravimetro Scintrex CG6 e corrette per gli effetti di variazione

della marea della Terra solida, della pressione atmosferica e della deriva strumentale. La successiva compensazione degli errori di chiusura è stata eseguita su un numero di sei circuiti concatenati dell'intera rete avvalendosi del codice GSadjust (Kennedy, 2020), ottenendo un errore medio sulla rete pari a $\pm 6 \mu\text{Gal}$ ($1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2$, equivalente a 10^{-9} g). I valori sono stati confrontati con quelli ottenuti (con le medesime procedure di calcolo) nelle due precedenti campagne, quella di febbraio 2024, eseguita sullo stesso numero di vertici e quella di maggio 2024 eseguita sul circuito centrale della caldera su un numero di 25 vertici. Il campo dei residui gravimetrici (Δg), ottenuto sottraendo ai Δg osservati nei diversi vertici le rispettive variazioni di gravità dovute al sollevamento del suolo nel periodo maggio-ottobre 2024 e febbraio-ottobre 2024, è indicativo di possibili variazioni di massa e/o densità nel sottosuolo (Figura 2.4.2a-b). Il valore di FAG (Free Air Gradient), utilizzato per modellare l'effetto dovuto al sollevamento del suolo e il conseguente calcolo dei residui gravimetrici, è quello ottenuto da Berrino et al., (1992) per i Campi Flegrei, pari a $-289 \mu\text{Gal/m}$.

Nel periodo febbraio-ottobre 2024 (Figura 2.4.2a) si osservano variazioni positive dei residui gravimetrici nel settore centro-occidentale della caldera, con i valori massimi, intorno a $20 \div 30 \mu\text{Gal}$, distribuiti tra il centro di Pozzuoli (Rione Terra) e il bordo ovest della Solfatara. Variazioni negative (al limite della significatività statistica, circa $-10 \mu\text{Gal}$) si osservano nel settore della piana di Bagnoli. La figura 2.4.2b mostra i residui di gravità ottenuti tra maggio e ottobre 2024 su 25 vertici del settore centrale della caldera. In questo caso, le variazioni sono al limite della significatività statistica con valori positivi intorno a $+10 \mu\text{Gal}$ nella zona del lungomare ad est di Pozzuoli e valori simili, ma negativi, nel settore compreso tra Astroni e Solfatara.

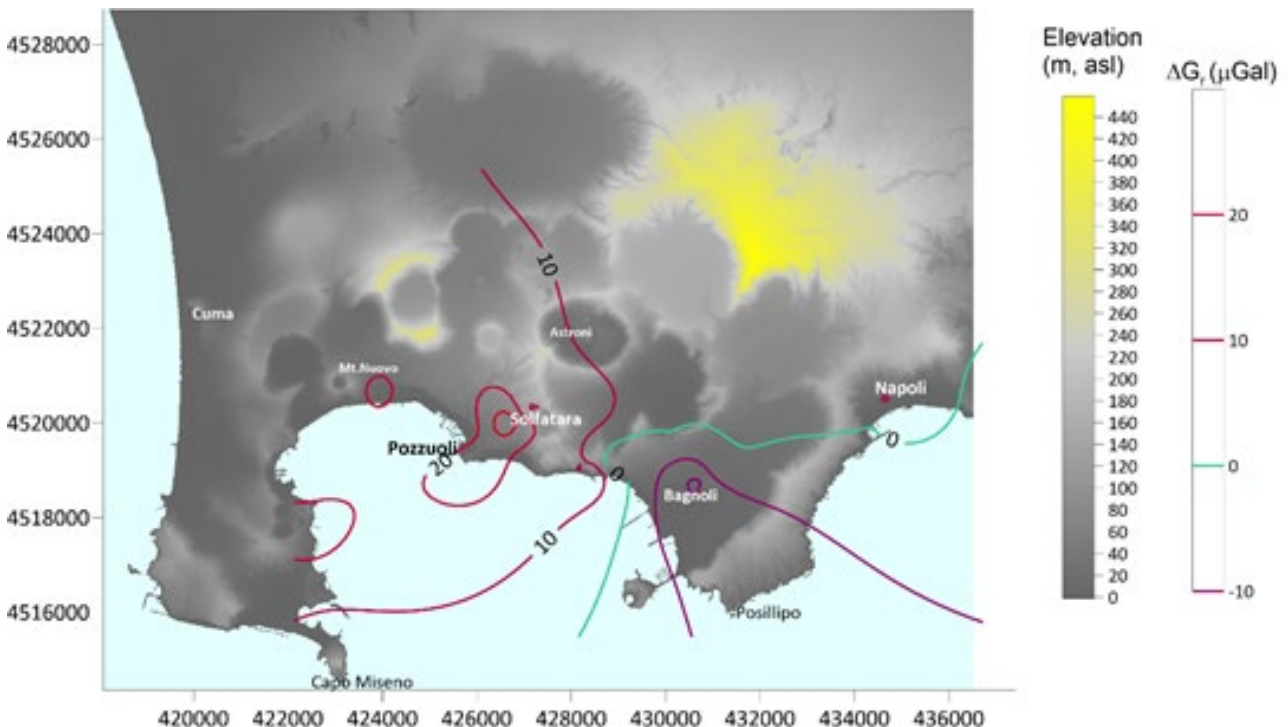


Figura 2.4.2a - Mappa dei residui Δg ottenuti dopo aver eliminato l'effetto di variazione di g dovuto al sollevamento della caldera misurato tra febbraio e ottobre 2024. La correzione FAG utilizzata è di $-289 \mu\text{Gal/m}$ (Berrino et al., 1992).

In generale, variazioni intorno ai $\pm 10 \mu\text{Gal}$, come osservate nella piana di Bagnoli, possono essere correlate agli effetti delle oscillazioni stagionali della falda acquifera. Nell'area Solfatara-Pisciarelli, si osservano differenze temporali di gravità di maggiore ampiezza ($20 \div 30 \mu\text{Gal}$), verosimilmente legate al contributo della circolazione dei fluidi del sistema idrotermale. Questa osservazione emerge dal confronto tra le due mappe dove, nell'area di Solfatara-Pisciarelli, si evince un pattern oscillante tra una variazione positiva (febbraio-ottobre) e una negativa tra maggio e ottobre.

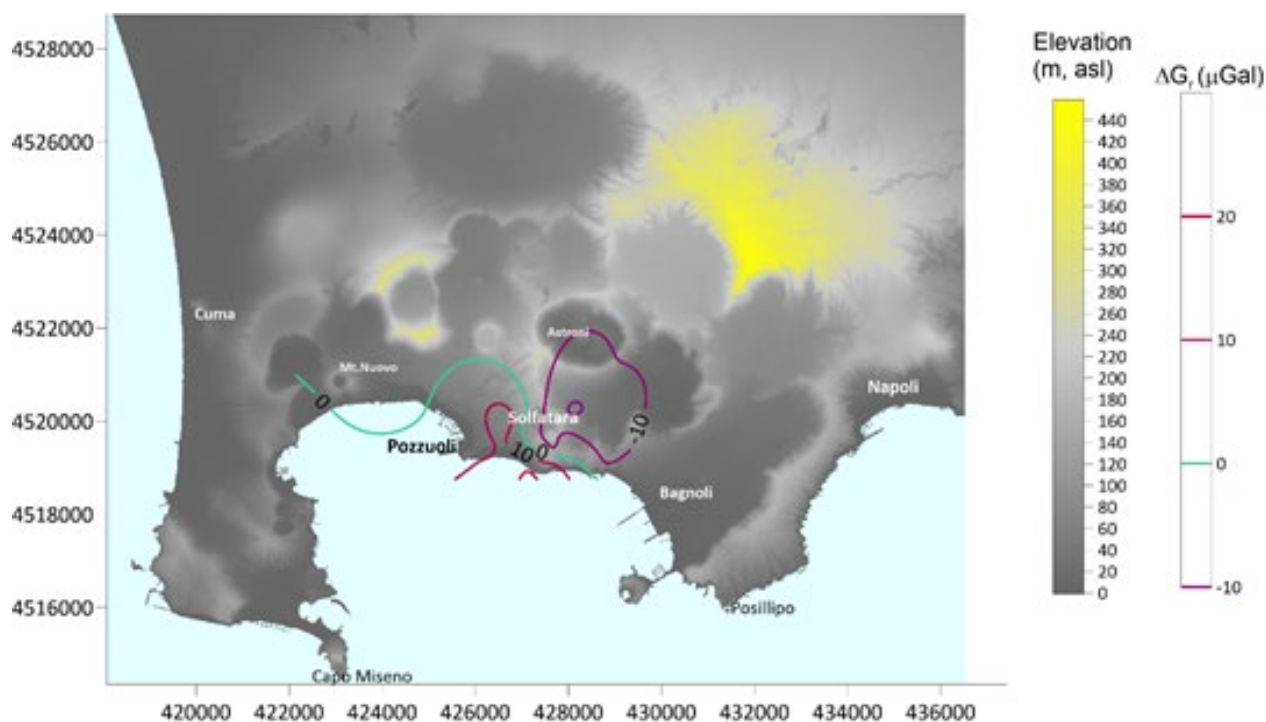


Figura 2.4.2b – Mappa dei residui Δg_r ottenuti dopo aver eliminato l'effetto di variazione di g dovuto al sollevamento della caldera misurato tra maggio e ottobre 2024. La correzione FAG utilizzata è di $-289 \mu\text{Gal}/\text{m}$ (Berrino et al., 1992)

2.4.2 MISURE GRAVIMETRICHE IN CONTINUO

Si riporta di seguito la serie temporale delle misure gravimetriche in continuo, a partire da gennaio 2024, eseguite con il gravimetro gPhoneX (#116) installato presso l'Oasi Naturale WWF di Astroni. I dati "raw" acquisiti vengono processati per rimuovere i contributi gravimetrici legati alle maree, gli effetti di tilt, atmosferici, dei terremoti e la deriva strumentale. La serie temporale "raw" di gravità fino al 31 dicembre 2024 e la serie temporale residua sono riportate rispettivamente in Figura 2.4.3a-b. Si riportano anche gli eventi sismici avvenuti in area flegrea nello stesso periodo (catalogo GOSSIP INGV-OV) (Figura 2.4.3c). Nella serie raw, oltre agli effetti mareali e atmosferici, si osservano alcune variazioni ad alta frequenza ascrivibili a diverse cause. Alcuni disturbi, che causano transienti di gravità con ampiezze limitate a qualche μGal , sono imputabili ai movimenti di carichi e vibrazioni indotti dai lavori di manutenzione in corso presso l'Oasi di Astroni (vedi frecce rosse). La serie temporale residua mostra inoltre transienti gravimetrici legati alle componenti meteorologiche (aumento ampiezza e frequenza del

segnale evidenziati nei riquadri azzurri in Figura 2.4.3b). Variazioni positive di gravità si osservano dopo lo sciame sismico avvenuto tra il 20 e il 21 maggio del 2024, con magnitudo massima pari Md 4.4. Ulteriori variazioni positive sono state registrate prima dei due eventi (Md 3.6 e 3.7) avvenuti a metà luglio e alla fine di agosto del 2024. In seguito a questi eventi si registra una brusca diminuzione della gravità (dell'ordine dei 10 μGal) probabilmente correlabile a effetti di deriva strumentale dopo lo scuotimento sismico (Riccardi et al., 2024). In generale le variazioni residue massime osservate in tutto il periodo considerato sono dell'ordine dei $\pm 20 \mu\text{Gal}$. In figura 2.4.3b vengono mostrate anche le misure time-lapse eseguite sulla stazione della rete gravimetrica collocata con quella del gPhone. I dati della campagna di febbraio e di ottobre mostrano un buon accordo con il dato in continuo. In generale questi dati non evidenziano trend di lungo periodo nel corso del 2024.

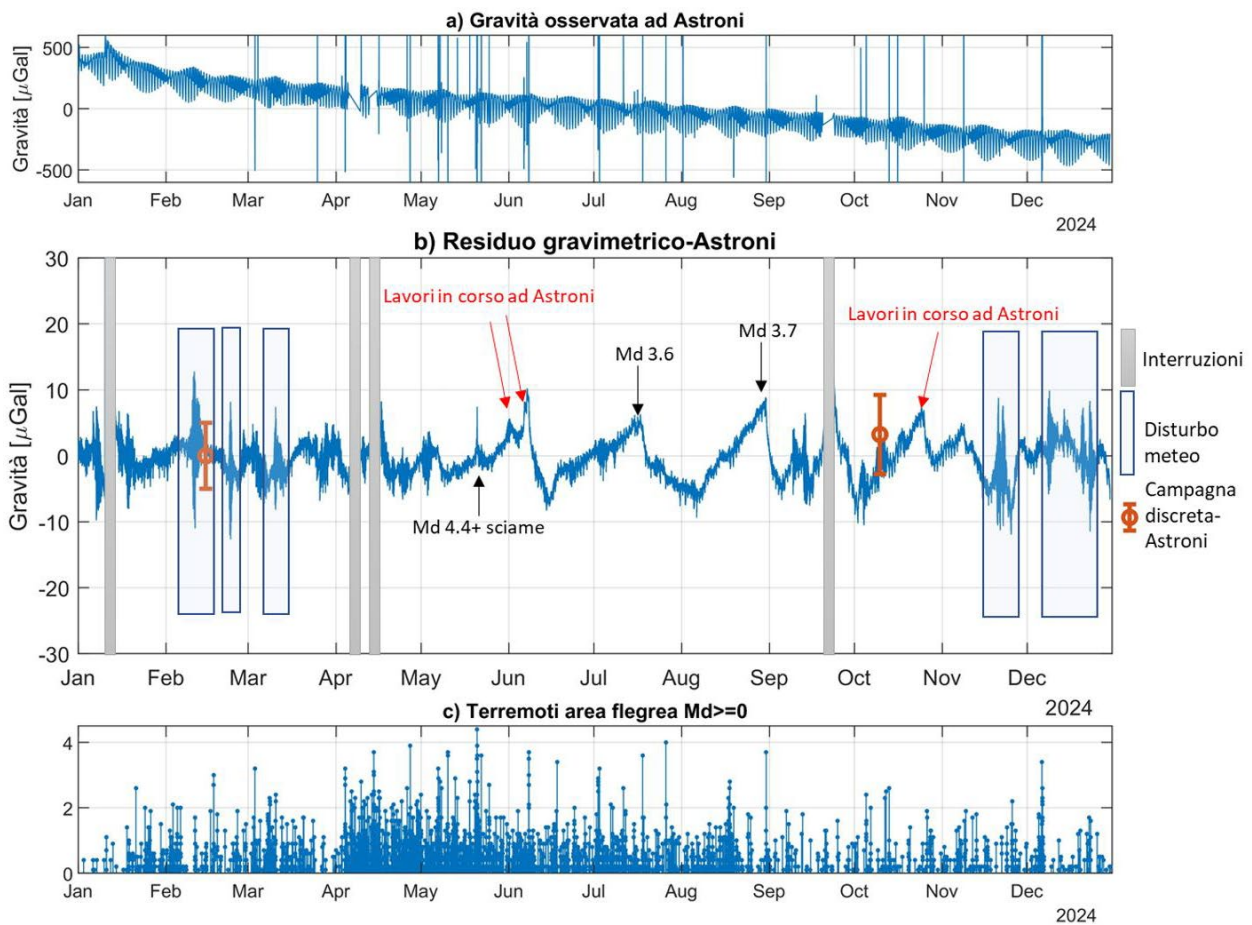


Figura 2.4.3 - a: serie temporale (risoluzione temporale 1 minuto) raw registrata dal gPhone. Si osserva il contributo dominante delle maree e dei terremoti avvenuti nell'area flegrea nel periodo considerato; **b:** serie residua di gravità (sono mostrati anche i dati delle campagne relative time-lapse alla stazione Astroni co-localata con quella del gPhone); **c:** sismicità registrata nel periodo gennaio-dicembre 2024 ($M_d \geq 0$).

2.5 RETE DILATOMETRICA

B. Di Lieto¹, P. Romano¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano – Napoli

La rete dilatometrica installata ai Campi Flegrei consta di 4 siti d'acquisizione (Figura 2.5.1), equipaggiati con dilatometri Sacks-Evertson installati a partire dal 2004 grazie al progetto DINEV (siti Quarto, Monterusciello e Rione Toiano) e VULCAMED (sito Pozzuoli), in collaborazione con il gruppo di ricerca della Carnegie Institution of Washington DC (USA). Attualmente il solo dilatometro di Quarto è in acquisizione, tramite il proprio datalogger SHOE-box, gli altri saranno ripristinati a breve nell'ambito delle attività di riorganizzazione della rete Dilatometrica

I dilatometri di Sacks-Evertson hanno precisioni nominali dell'ordine di 10^{-12} , rispetto ad ampi intervalli di frequenze (da 10^{-7} fino a 10^2 Hz), e sono caratterizzati da un'elevata dinamica (140 dB). I dilatometri sono installati in pozzi di profondità compresa tra 120 e 180 m per minimizzare l'effetto delle variazioni termiche in superficie e delle attività antropiche sulla registrazione dei dati. Essi misurano le variazioni del campo di strain locale: il dato così acquisito è espresso come una grandezza adimensionale, e rappresenta la variazione relativa della dimensione del volume monitorato.

Le principali informazioni relative ai siti di installazione sono riportate in tabella 2.5.1.

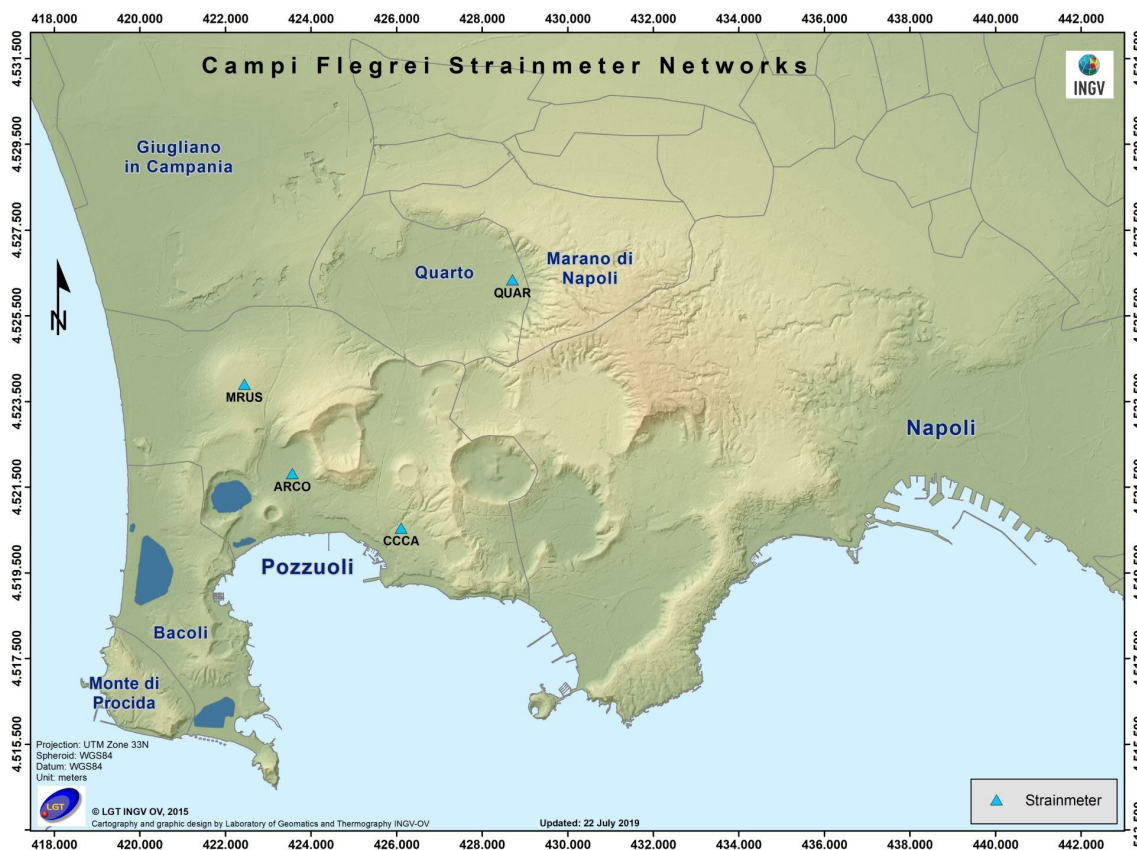


Figura 2.5.1 - Mappa della Rete Dilatometrica dei Campi Flegrei.

Tabella 2.5.1 - Stato della Rete Dilatometrica dei Campi Flegrei.

Stazione	Località	Coordinate	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
ARCO	Arco Felice	40.8437N 14.0935E 22 m	2005	Sacks Evertson		
CELL	Pozzuoli	40.8327N 14.1230E 70 m	2005	Sacks Evertson		
MRUS	Monterusciello	40.8622N 14.0799E 104 m	2005	Sacks Evertson	SOC-box + Affinity	UMTS
QUAR	Quarto	40.8853N 14.1556E 50 m	2005	Sacks Evertson	SHOE-box	ADSL

Attualmente è in acquisizione il solo dilatometro di Quarto, tramite il proprio datalogger SHOE-box. I dati vengono acquisiti localmente e, negli ultimi mesi del 2023, si è provveduto a ripristinare la connessione ADSL: in questa maniera è possibile l’acquisizione da remoto dei dati. Con una serie di script e programmi sviluppati appositamente, il dataset è automaticamente e periodicamente aggiornato e analizzato. Il dilatometro di Monterusciello è in una fase di test: i dati saranno presto disponibili. Gli altri dilatometri manifestano problemi elettronici tali da impedirne attualmente l’acquisizione.

Nel corso dell’anno 2024, il dilatometro di Quarto ha registrato quattro variazioni cosismiche significative in concomitanza degli eventi sismici registrati il 3/7/2024, 18/7/2024, 26/7/2024, 30/8/2024 di magnitudo, rispettivamente, 3.2, 3.6, 4 e 3.7 (Figura 2.5.3)

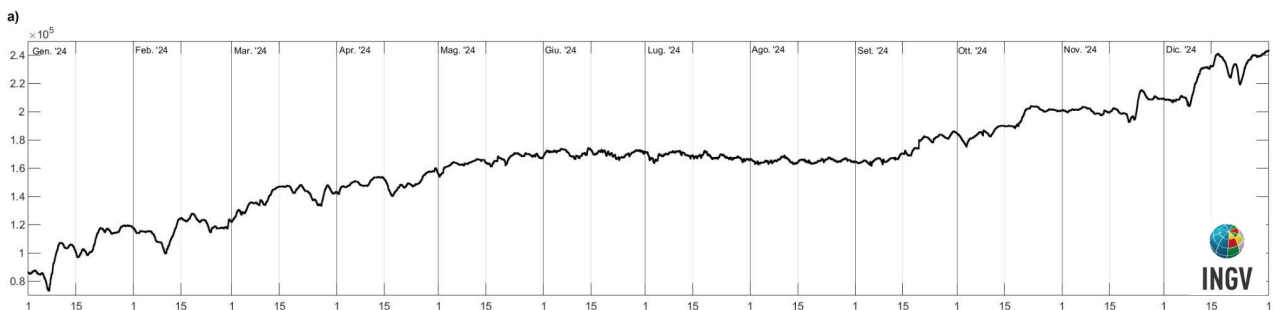


Figura 2.5.2 - - a) l’andamento dello strain, ripulito dalla componente mareale e dalle variazioni ascrivibili alla pressione atmosferica, nell’anno 2024.

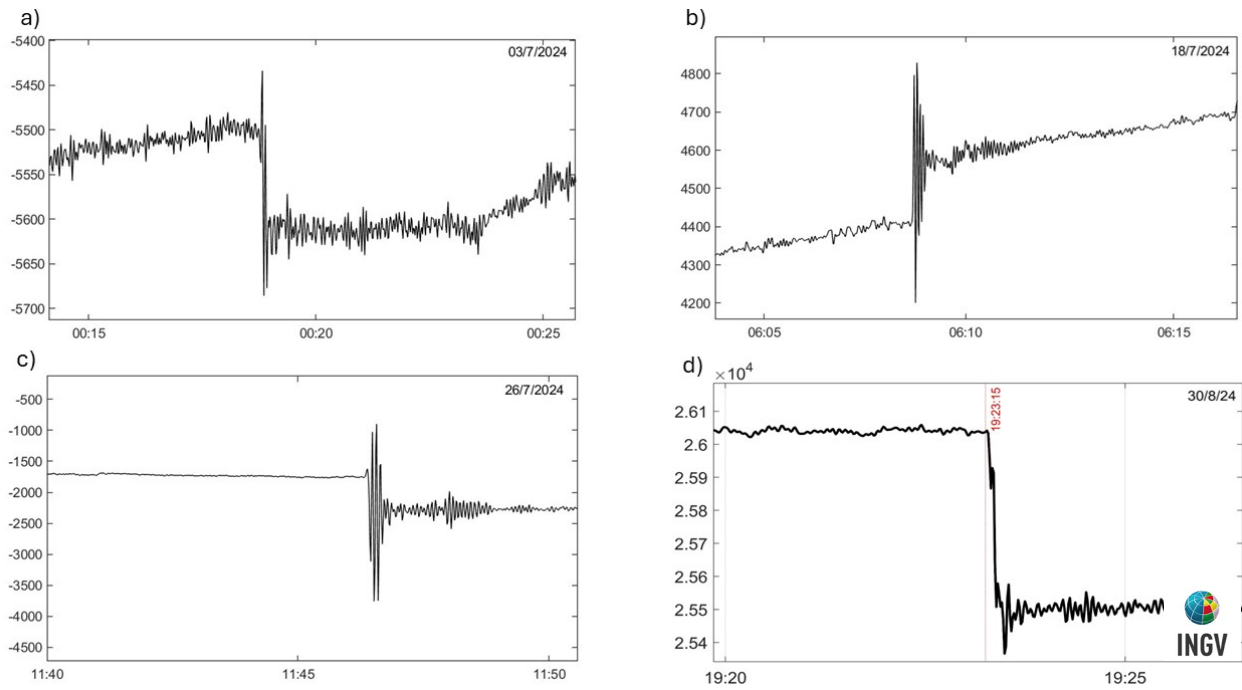


Figura 2.5.3 - a, b, c), d) Variazione dello strain in concomitanza di 4 eventi di magnitudo maggiori di 3 registrati nel 2024.

2.6 MONITORAGGIO SATELLITARE CON INTERFEROMETRIA SAR

S. Borgstrom¹, M. Polcari²

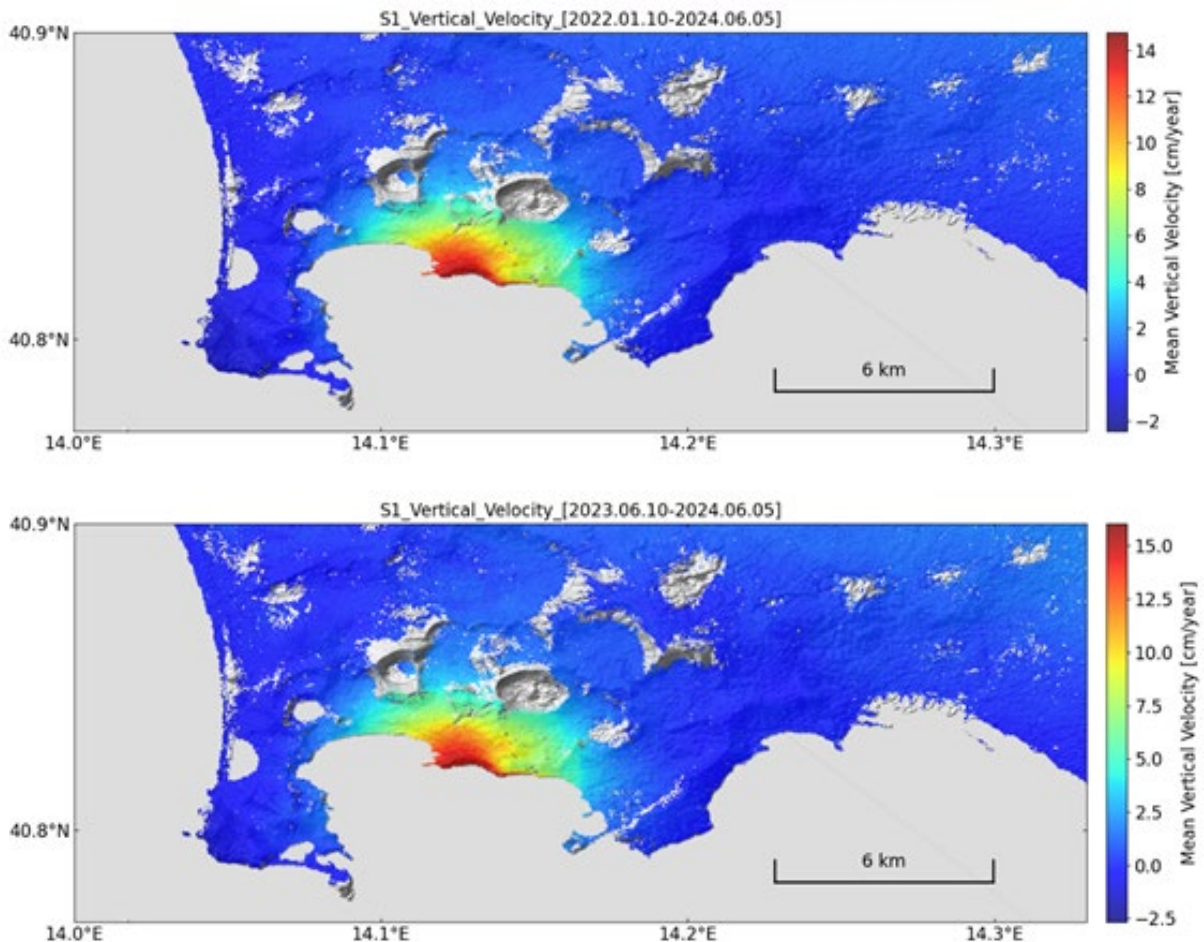
¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

² INGV Osservatorio Nazionale Terremoti – Roma

Il monitoraggio interferometrico delle deformazioni del suolo dei Campi Flegrei utilizza i dati Radar ad Apertura Sintetica (SAR) acquisiti dai principali sensori e/o costellazioni satellitari attualmente operative: Sentinel-1A (S-1A) del programma europeo Copernicus, gestito dall’Agenzia Spaziale Europea (ESA) e COSMO-SkyMed 1°/2° generazione (CSK/CSG) dell’Agenzia Spaziale Italiana (ASI).

2.6.1 LA CRISI SISMICA DEL 2023-2024

A partire dal secondo semestre 2023, nell’area Flegrea è stata registrata un’attività sismica anomala, con eventi superficiali di magnitudo fino a $M_d=4.4$, alcuni chiaramente avvertiti dai residenti dell’area e fino alla città di Napoli. Dall’analisi dei dati interferometrici del sensore Sentinel-1A (ESA), si osserva che tale incremento anomalo della sismicità è stato accompagnato anche da un aumento nella velocità massima di sollevamento fino a ~17 cm/anno come da fig.2.6.1, dove se ne rappresenta l’evoluzione temporale.



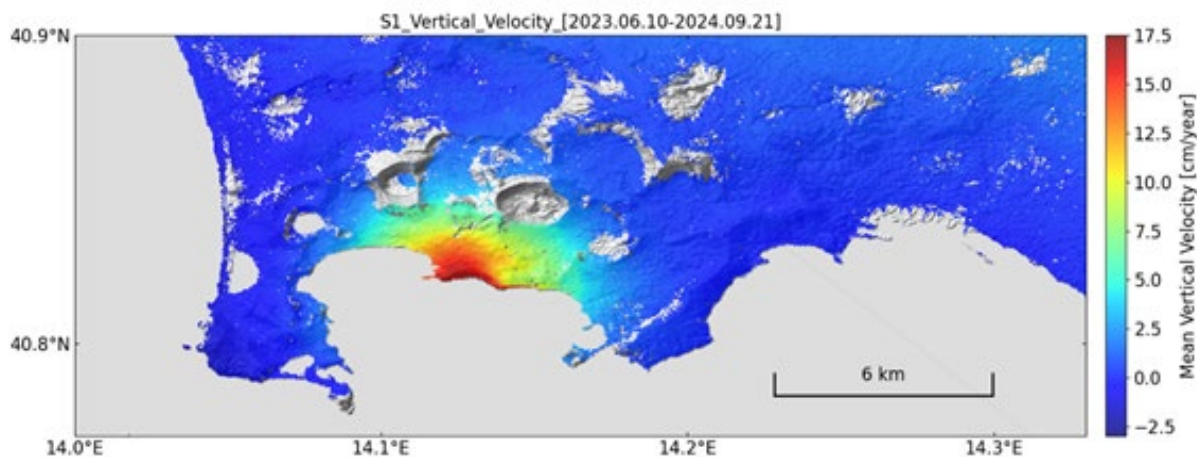
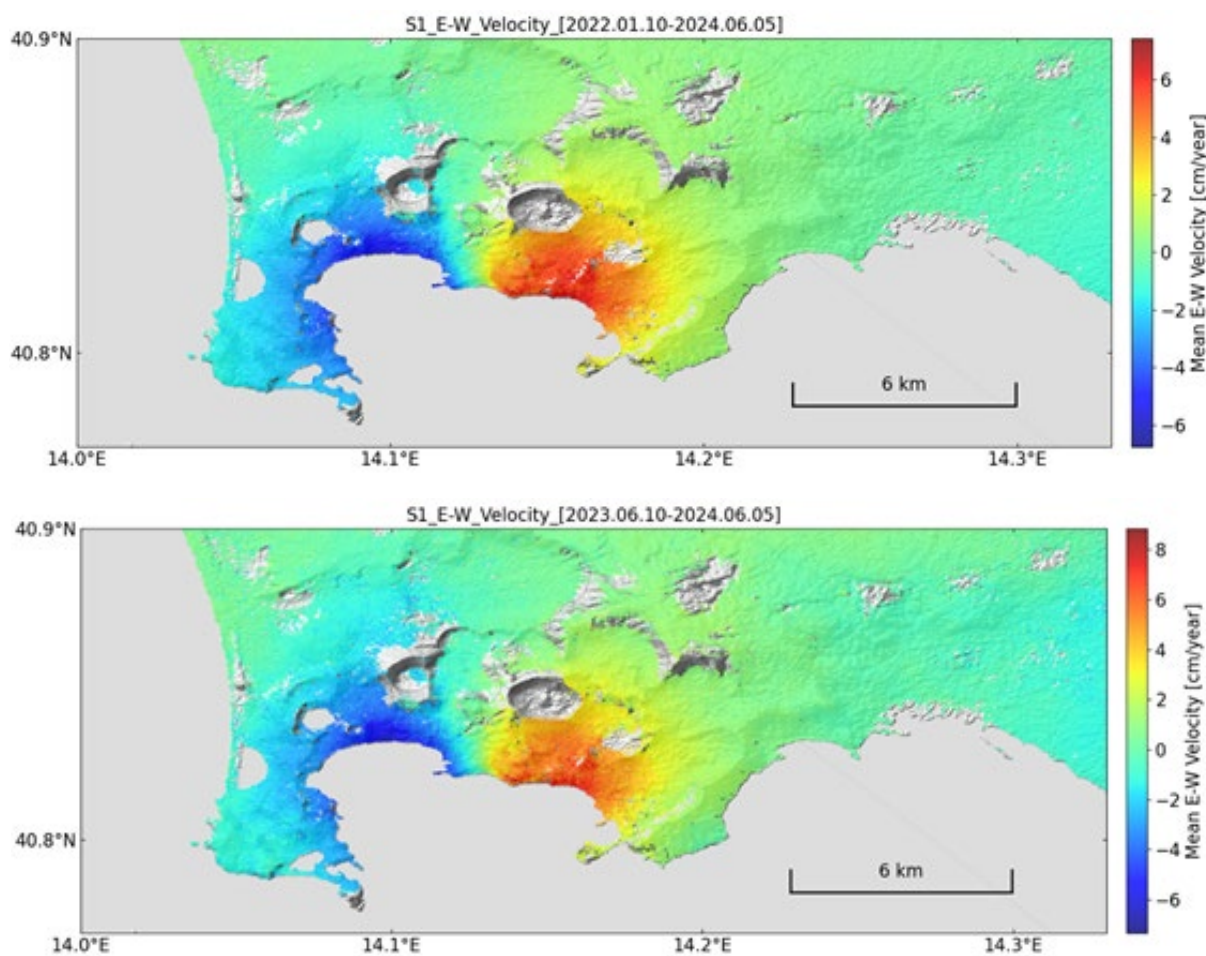


Figura 2.6.1 - Aumento della velocità massima di sollevamento (dati S--1A):
 2022.01.10 - 2024.06.05 (sopra): **> 14 cm/anno**
 2023.06.10 - 2024.06.05 (centro): **> 15 cm/anno**
 2023.06.10 - 2024.09.21 (sotto): **> 17 cm/anno**

Un analogo aumento viene rilevato anche nella velocità di deformazione orizzontale (E-W) fino a 10 cm/anno, più consistente in direzione est verso l'area di Bagnoli (fig.2.6.2).



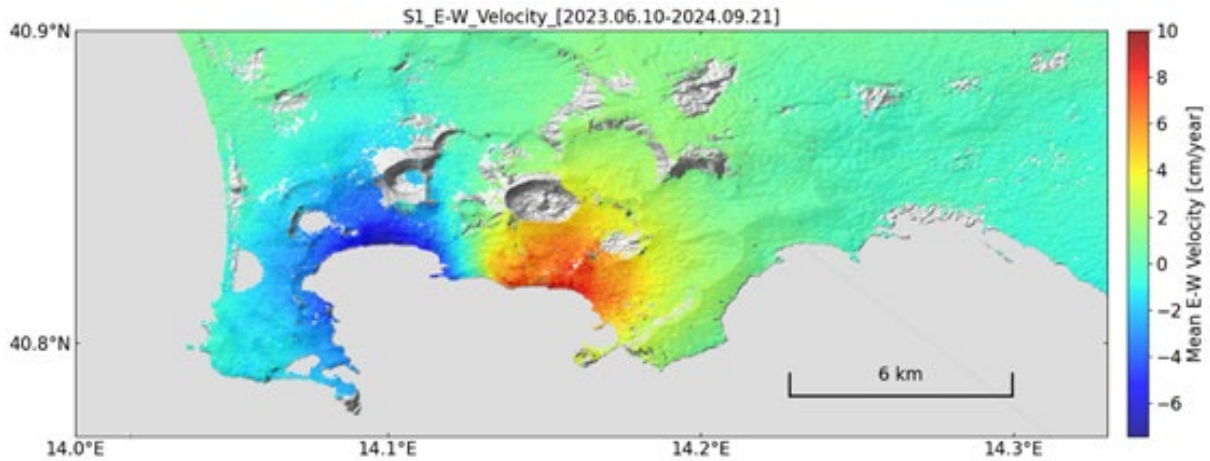


Figura 2.6.2 - Aumento della velocità di deformazione orizzontale (minore ad ovest, dati S-1A):

2022.01.10 - 2024.06.05 (sopra): > 6 cm/anno (-> ovest); > 6 cm/anno (-> est)
 2023.06.10 - 2024.06.05 (centro): > 6 cm/anno (-> ovest); > 8 cm/anno (-> est)
 2023.06.10 - 2024.09.21 (sotto): > 6 cm/anno (-> ovest); 10 cm/anno (-> est)

Inoltre, dall'esame dei dati in letteratura sul campo di deformazione in atto nell'area Flegrea, viene evidenziata dal 2021 un'anomalia estremamente localizzata posta ad est del campo stesso, in prossimità della linea costiera, chiaramente rilevabile dall'analisi della fase interferometrica (*wrapped phase*) in fig.2.6.3 (ovale nero in tratteggio).

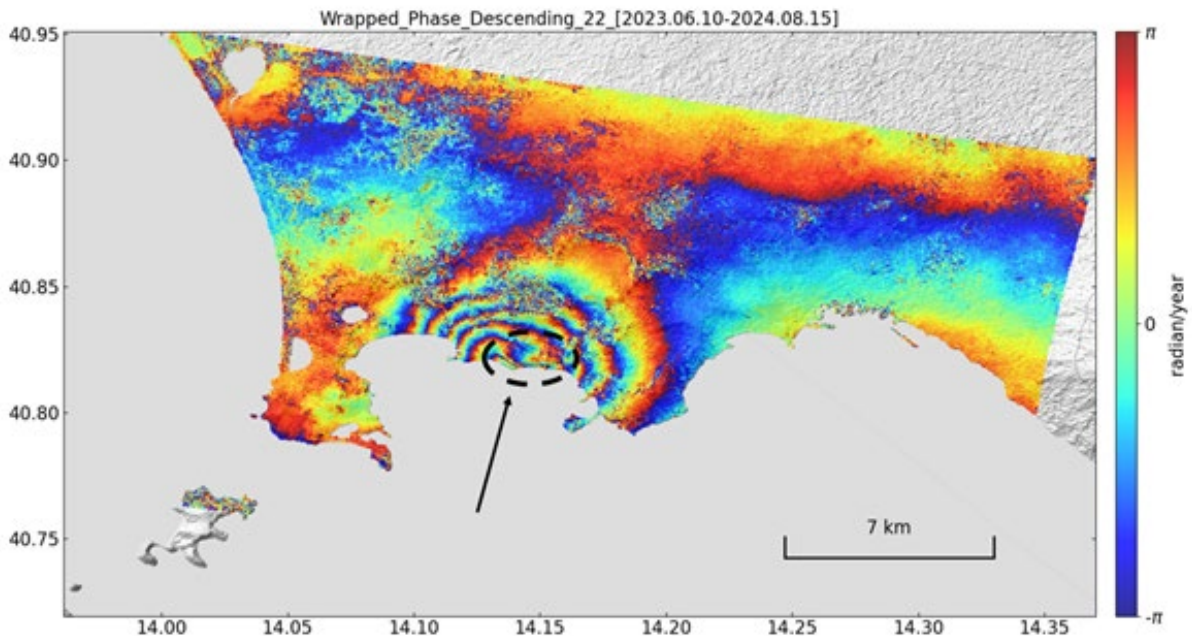


Figura 2.6.3 - Immagine di fase (*wrapped phase*) (radianti/anno), 2023.06.10 - 2024.08.15 Dati S1-A, orbita discendente (22). Nell'ovale nero in tratteggio è visibile un andamento anomalo delle frange interferometriche.

Dall'analisi degli ultimi dati elaborati, oggetto del presente rapporto, da almeno tre mesi a questa parte si registra una stabilizzazione nei valori della velocità massima di sollevamento, oltre a quelli della deformazione orizzontale in direzione E-W.

2.6.2 SENTINEL-1A (S-1A) - ANALISI MULTI-TEMPORALE

Per tale analisi sono stati utilizzati i dati in banda C del sensore Sentinel-1A dell'Agencia Spaziale Europea (ESA) disponibili in rete attraverso i canali web della stessa Agencia. L'analisi della deformazione in atto nella caldera dei Campi Flegrei è stata eseguita sfruttando l'algoritmo d'interferometria differenziale denominato SBAS (**S**mall **B**aseline **S**ubset), avvalendosi di codici *public domain* reperibili in rete sui siti dei rispettivi sviluppatori e utilizzati su piattaforma Linux/Mac OS XV.

La successiva elaborazione ha consentito di generare mappe della velocità media di deformazione del suolo e serie temporali di deformazione lungo la linea di vista del sensore (*LoS - Line of Sight*) per le orbite ascendenti (01.01.2024 - 26.12.2024) e discendenti (31.12.2023 - 25.12.2024), oltre alle mappe della velocità media di deformazione del suolo lungo la componente verticale (fig.2.6.4) ed orizzontale in direzione E-W (fig.2.6.5) ricavate dalla scomposizione del moto, resa possibile per la disponibilità dei *dataset* lungo le due orbite.

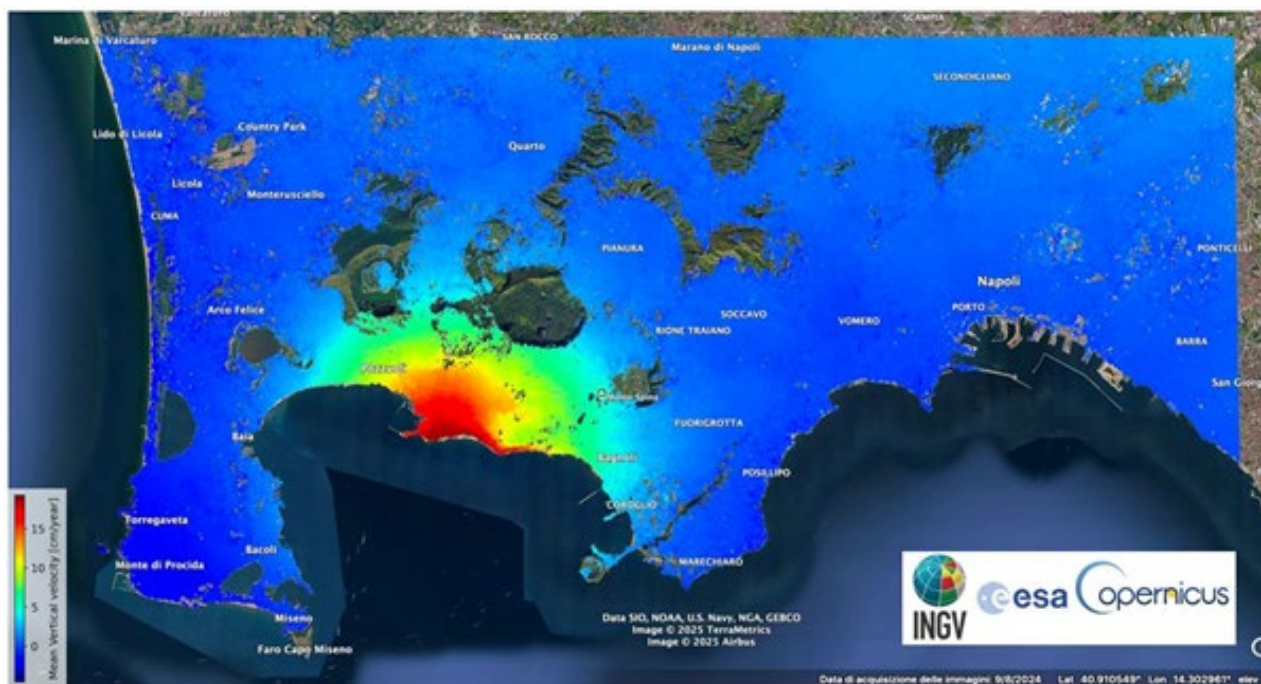


Figura 2.6.4 - Mappa della velocità media di deformazione del suolo lungo la componente verticale (Sentinel-1A, 31.12.2023 - 26.12.2024) per l'area Flegrea. Dati IWS - TOPS mode, orbite ascendenti (44) e discendenti (22)

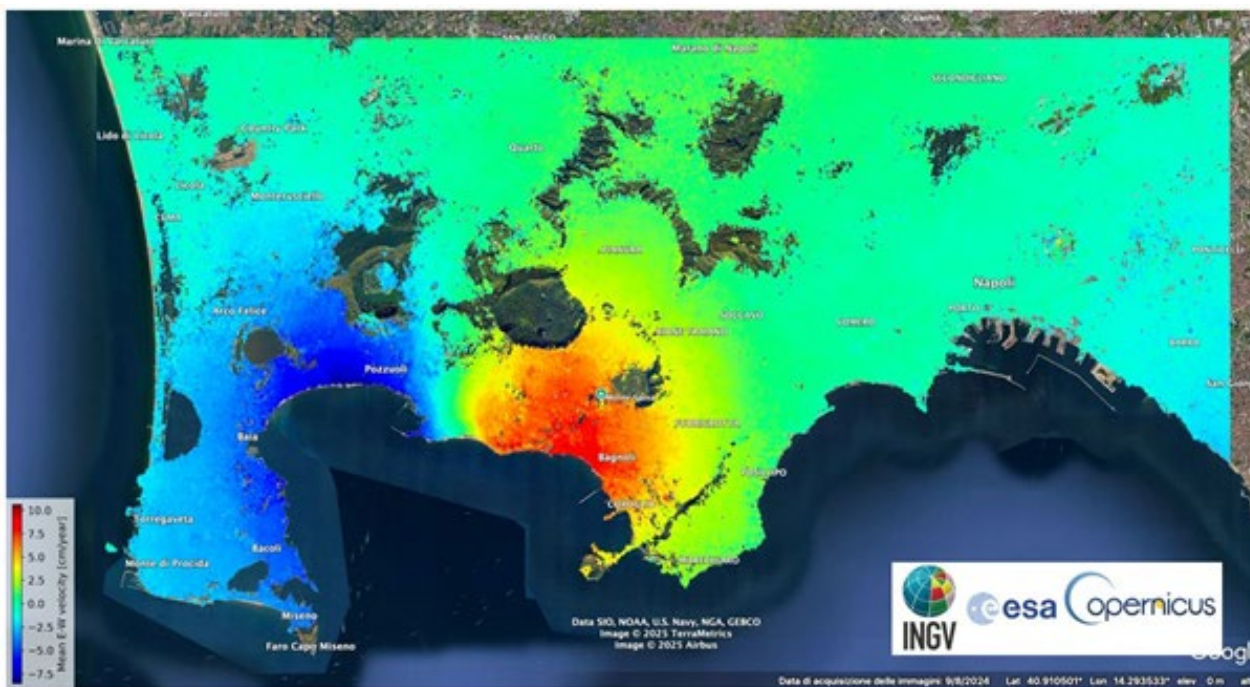


Figura 2.6.5 - Mappa della velocità media di deformazione del suolo lungo la componente orizzontale (E-W) (Sentinel-1A, 31.12.2023 - 26.12.2024) per l'area Flegrea. Dati IWS - TOPS mode, orbite ascendenti (44) e discendenti (22)

Nella tabella 2.6.1 vengono riassunte le caratteristiche principali dei *dataset* processati.

Tabella 2.6.1 - Dataset Sentinel-1A utilizzati per l'elaborazione interferometrica dell'area Flegrea

	ASCENDENTE	DISCENDENTE
Lunghezza d'onda [cm]	5.5	
Angolo medio d'incidenza [gradi]	39	
Modalità di acquisizione	Terrain Observation by Progressive Scan (TOPS)	
Risoluzione spaziale [m]	30 x 30	
Intervallo temporale	01.01.2024 - 26.12.2024	31.12.2023 - 25.12.2024
Immagine SLC	31	29
Interferogrammi [5 connessioni/scena]	140	130
Orbita	44	22

La correzione del ritardo atmosferico è stata effettuata avvalendosi del modello atmosferico globale ERA-5 dello *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF).

Le orbite precise e/o preliminari utilizzate per il processamento dei dati si sono rese disponibili sui canali web dell'ESA.

Per la rimozione del contributo topografico nella fase interferometrica è stato utilizzato un modello digitale del terreno ricavato da dati SRTMGL1 (*SRTM Global 1arcsec*) opportunamente ridotto all’ellissoide di riferimento WGS84.

Come si evince dall’analisi della Figura 2.6.4, l’area Flegrea è stata interessata nel 2024 da un fenomeno di inflazione con un valore massimo della deformazione del suolo di ~17 cm lungo la componente verticale del moto del suolo, in buon accordo con le variazioni di quota misurate nello stesso intervallo temporale presso la stazione cGNSS RITE (**RI**one **TE**rra), posta nell’area di massima deformazione.

La compresenza di una componente planimetrica (E-W) del moto del suolo, caratteristica dei Campi Flegrei e ben nota in letteratura, si evidenzia altresì dall’analisi della figura 2.6.5, con un valore massimo di deformazione di ~10 cm in direzione est (Bagnoli) e di ~7 cm in direzione ovest (Baia) nel periodo analizzato.

2.6.3 COSMO-SKYMED (1°/2° GENERAZIONE) CSK/CSG - ANALISI MULTI-TEMPORALE (ANNI 2011-2024)

Contestualmente all’analisi con i dati acquisiti da altre missioni, sono state aggiornate le serie temporali InSAR con dati Cosmo-SkyMed di prima (CSK) e seconda (CSG) generazione. In questa relazione sono mostrate le soluzioni in termini di velocità media di deformazione e serie temporali con immagini acquisite lungo entrambe le orbite fino a dicembre 2024. In Tabella 2.6.2 sono riassunte le principali informazioni relative ai dataset utilizzati.

Tabella 2.6.2 - Panoramica sui dataset CSK/CSG

Numero immagini	Orbita	Dimensione pixel [m]	Angolo di incidenza [°]	Heading [°]
742	Ascendente	30	49	13
197	Discendente	30	26	13

L’analisi InSAR è stata eseguita mediante l’approccio multi-temporale sviluppato nell’ambito del software GAMMA. È stata innanzitutto effettuata un’operazione di *multi-look* spaziale per ridurre il rumore di *speckle* tipico delle immagini SAR. Il contributo topografico è stato rimosso mediante il Modello Digitale di Elevazione (DEM) a 12m acquisito dalla missione TanDEM-X del Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR). La rete di interferogrammi è stata quindi calcolata applicando soglie tali da ottenere reti ben connesse di interferogrammi (fig.2.6.6).

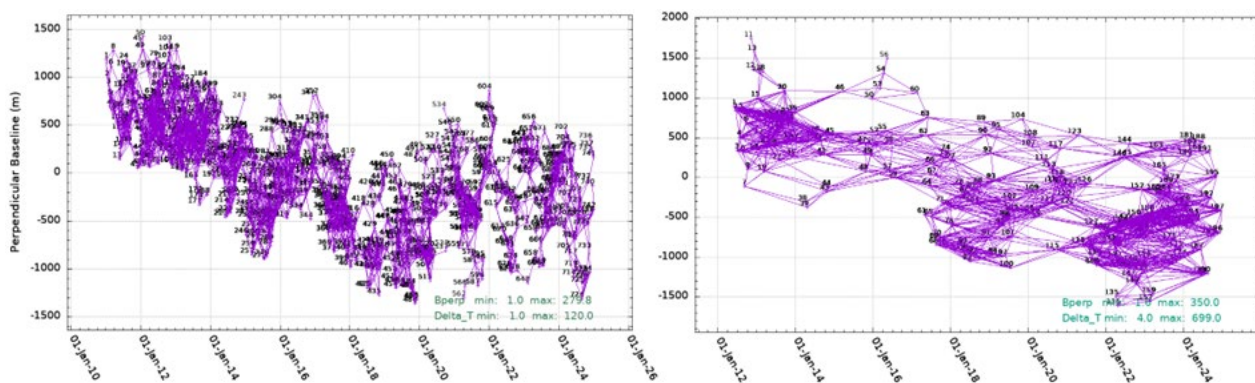


Figura 2.6.6 - Rete di interferogrammi ottenuta lungo orbita ascendente [A, sinistra] e discendente [B, destra]

Gli interferogrammi differenziali ottenuti sono stati quindi filtrati e srotolati e la soluzione è stata trovata tramite un'estensione del metodo della Decomposizione a Valori Singolari.

In Figura 2.6.7 è riportato l'andamento della velocità media di deformazione dell'area, calcolata lungo entrambe le orbite e relativa scomposizione nella componente verticale ed orizzontale. Non risultano differenze significative, nel *pattern* rilevato, rispetto alle precedenti elaborazioni. Va evidenziato come la velocità lineare sia stimata su un intervallo temporale molto ampio (2011-2024) per cui, eventuali cambiamenti non lineari rispetto al trend generale, sono difficili da rilevare.

In figura 2.6.8 è invece riportata la serie temporale 2011-2024 della componente verticale di deformazione del suolo di un punto nei pressi del Duomo di Pozzuoli e della stazione GNSS RITE.

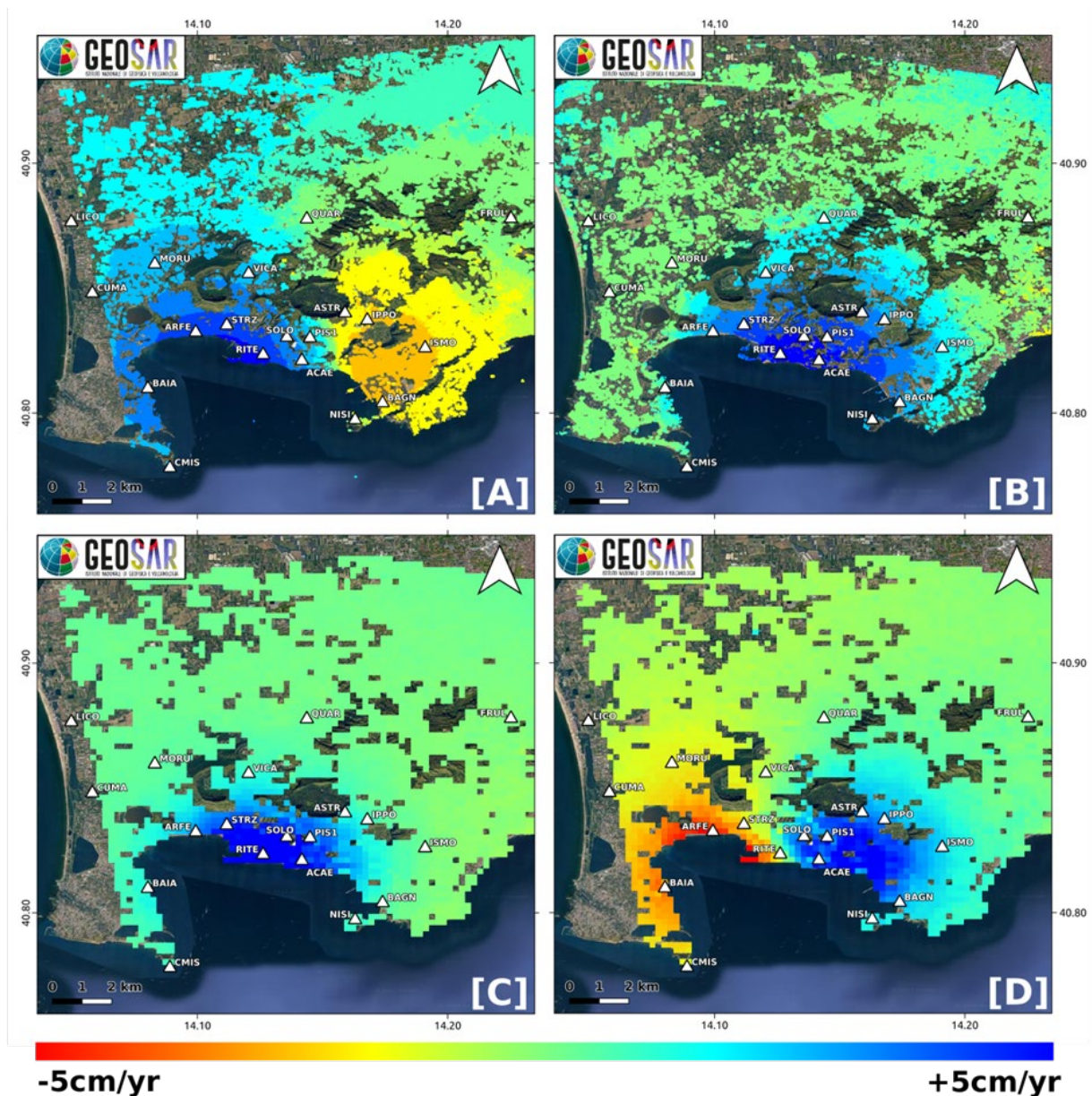


Figura 2.6.7 - Velocità media di deformazione dei Campi Flegrei stimata nel periodo 2011-2024 con dati CSK/CSG lungo orbita ascendente [A] e discendente [B] e scomposizione nella componente verticale [C] ed orizzontale [D]

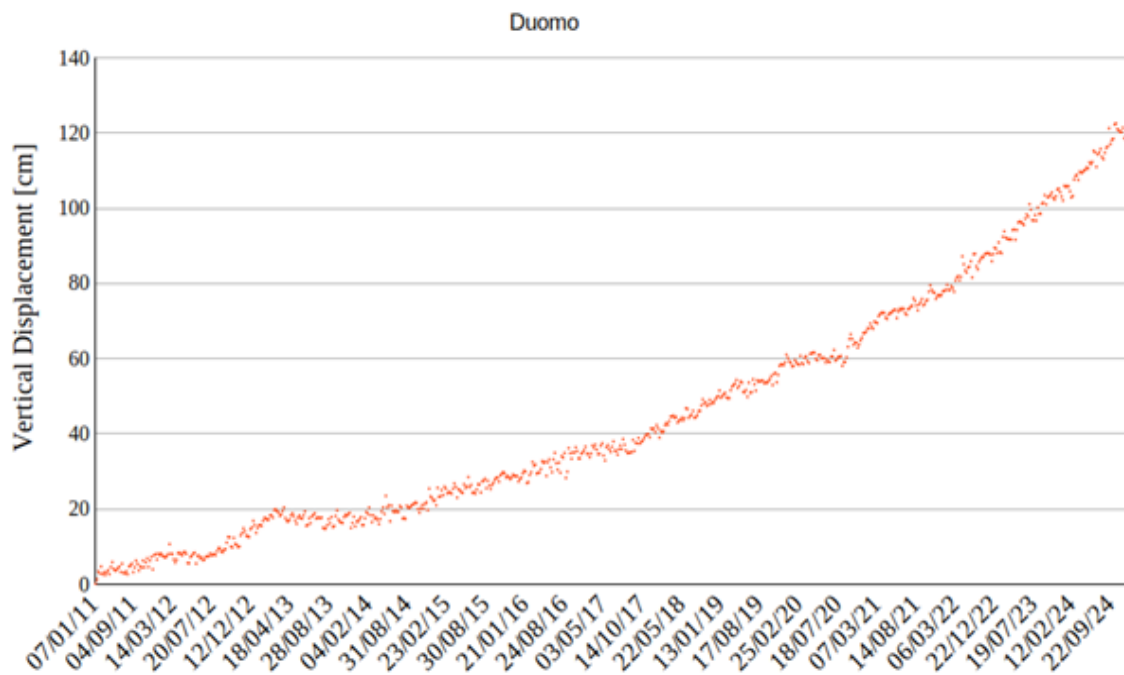


Figura 2.6.8 - Serie temporali CSK/CSG lungo la componente verticale di un punto nei pressi del Duomo per il periodo 2011-2024

3 - MONITORAGGIO VULCANOLOGICO

Le attività di monitoraggio vulcanologico vengono svolte dalla Sezione di Napoli “Osservatorio Vesuviano” con una Rete Permanente di Telecamere Termiche e con campagne di misure con Termocamera Mobile, Termocoppia e Drone, nonché dalla Sezione di Roma “Osservatorio Nazionale Terremoti” in collaborazione con l’Osservatorio Vesuviano mediante dati satellitari.

3.1 RETE PERMANENTE MONITORAGGIO TERMICO AD IMMAGINE

F. Sansivero¹, G. Vilardo¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano – Napoli

La Rete TIRNet (Thermal Infrared Imagery Monitoring Network - Sansivero & Vilardo, 2024) per la sorveglianza vulcanica continua a lungo termine dei Campi Flegrei tramite acquisizione di immagini all’infrarosso termico è attualmente costituita da 6 stazioni permanenti (Figura 3.1.1; Tabella 3.1.1).

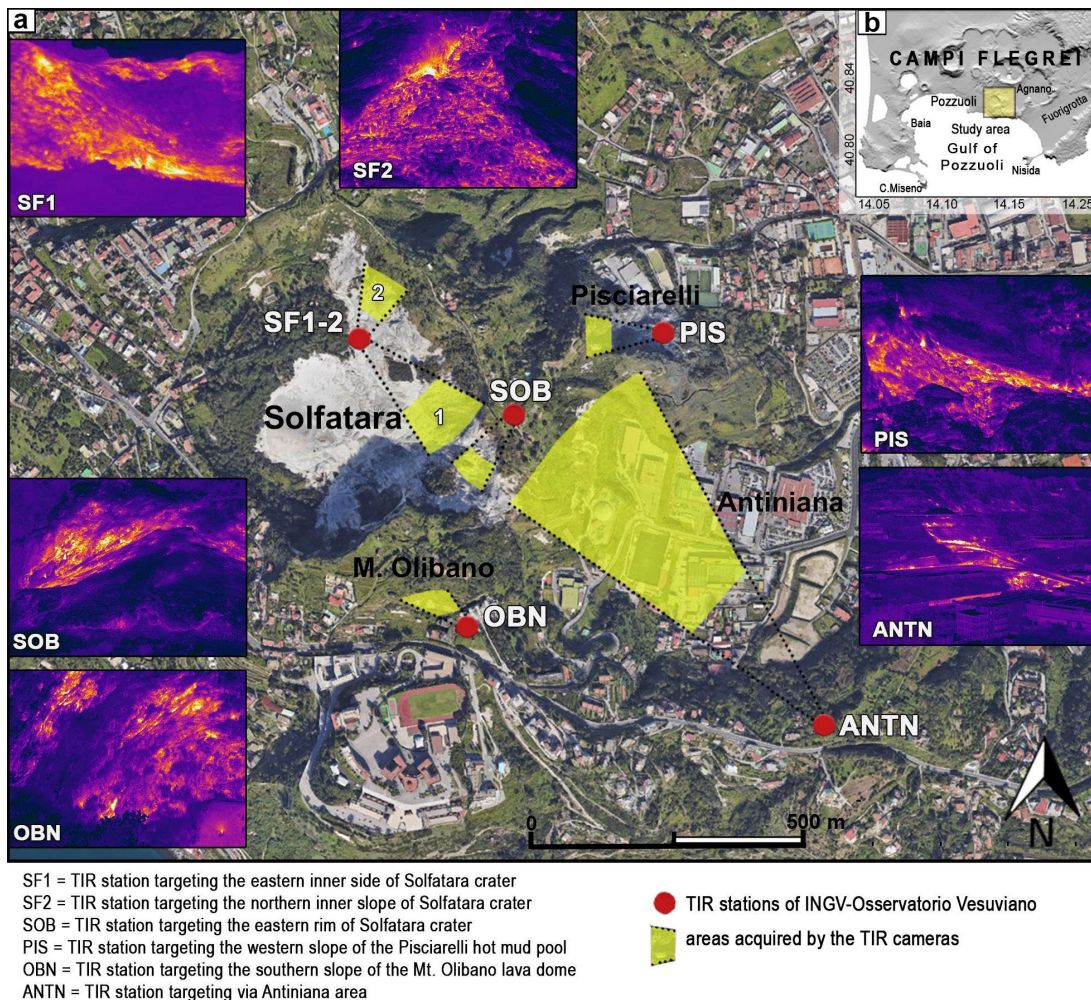


Figura 3.1.1 – Mappa della Rete Permanente di Monitoraggio Termico ad Immagine operante ai Campi Flegrei. I punti rossi indicano l’ubicazione delle stazioni TIRNet, le aree in giallo indicano le aree target indagate.

Nell'area della Solfatara sono installate n.3 stazioni: di cui due all'interno del cratere (SF1, SF2) e una sul bordo sud-orientale (IR-SOB). Una stazione è operativa in località Pisciarelli (PS1), una stazione è posizionata alla base del versante SE del duomo di monte Olibano (OBN) ed infine una stazione inquadra l'area di Via Antiniana e il versante esterno sud-orientale della Solfatara (ANTN).

Nel corso del 2024 tutte le stazioni sono state regolarmente operative, pertanto, sono state effettuate principalmente attività di manutenzione ordinaria che hanno riguardato la verifica in situ della funzionalità e dello stato della strumentazione con particolare attenzione al controllo della operatività ed efficienza dei sistemi di alimentazione e di trasmissione dati delle stazioni remote.

La Tabella 3.1.1 sintetizza lo stato attuale della rete permanente di monitoraggio termico ad immagine operante ai Campi Flegrei.

Tabella 3.1.1 – Stato attuale della Rete Permanente di Monitoraggio Termico ad Immagine operante ai Campi Flegrei.

Stazione	Coordinate UTM (m)	Località	Data installazione	Sensore	Trasmissione
SF1	40.8292N 14.1397E 92 m	Solfatara – Area Target: Area fumarole (BG, BN) versante interno sud-orientale del cratere della Solfatara	Settembre 2004	Termocamera FLIR A655SC (640 x 480) FoV: 25° x 19°	Wi-Fi
SF2	40.8292N 14.1397E 92 m	Solfatara – Area Target: Settore settentrionale del versante interno del cratere della Solfatara	Giugno 2013	Termocamera FLIR A645SC (640 x 480) FoV: 15° x 11.9°	Wi-Fi
PS1	40.8289N 14.1471E 90 m	Agnano Pisciarelli – Area Target: Parte alta del versante ad ovest della fumarola principale in località Pisciarelli	Ottobre 2006	Termocamera FLIR A645SC (640 x 480) FoV: 15° x 11.9°	LTE
OBN	40.8236N 14.1425E 150 m	Pozzuoli – Tetto Edificio Scolastico IPSAR “Lucio Petronio” – Area Target: Versante meridionale del Monte Olibano	Marzo 2015	Termocamera FLIR A645SC (640 x 480) FoV: 25° x 19°	Wi-Fi
IR-SOB	40.8268N 14.1439E 175 m	Bordo sud-orientale cratere Solfatara – Area Target: Bordo esterno sud-orientale cratere Solfatara	Giugno 2016	Termocamera FLIR A655SC (640 x 480) FoV: 25° x 19°	Wi-Fi
ANTN	40.8218N 14.1504E 121 m	Versante esterno sud-orientale del cratere della Solfatara e area di via Antiniana	Ottobre 2020	Termocamera FLIR A655SC (640 x 480) FoV: 25° x 19°	LTE

Di seguito sono riportate le serie temporali, aggiornate al 31.12.2024, delle temperature al suolo ottenute dalle elaborazioni delle acquisizioni IR effettuate dalle diverse stazioni operanti nell'area dei Campi Flegrei. Ai valori di temperatura massima delle serie temporali è stata rimossa la componente stagionale mediante processamento con l'algoritmo di destagionalizzazione analitica STL (Seasonal Trend Decomposition), implementato nel software A.S.I.R.A. di elaborazione dei dati IR della Rete TIRNet (Sansivero et al., 2019; Sansivero & Vilardo, 2024).

PISCIARELLI

La serie temporale dei valori di temperatura massima (Fig. 3.1.2) dal mese di febbraio 2024 evidenzia un aumento di circa 5° in media rispetto ai valori medi osservati nel 2023. In tutto l'anno 2024 le temperature massime, sebbene a volte interessate da sensibili oscillazioni, continuano a mostrare valori più elevati rispetto all'anno precedente sino al mese di novembre in cui si registra una diminuzione. A seguito di tale diminuzione, i valori registrati nel mese di dicembre ritornano in linea con i valori medi delle temperature del 2023. Il lieve aumento dei valori di temperatura massima che ha caratterizzato l'inizio del 2024 è evidenziato anche dal trend a lungo termine (linea rossa in figura 3.1.2).

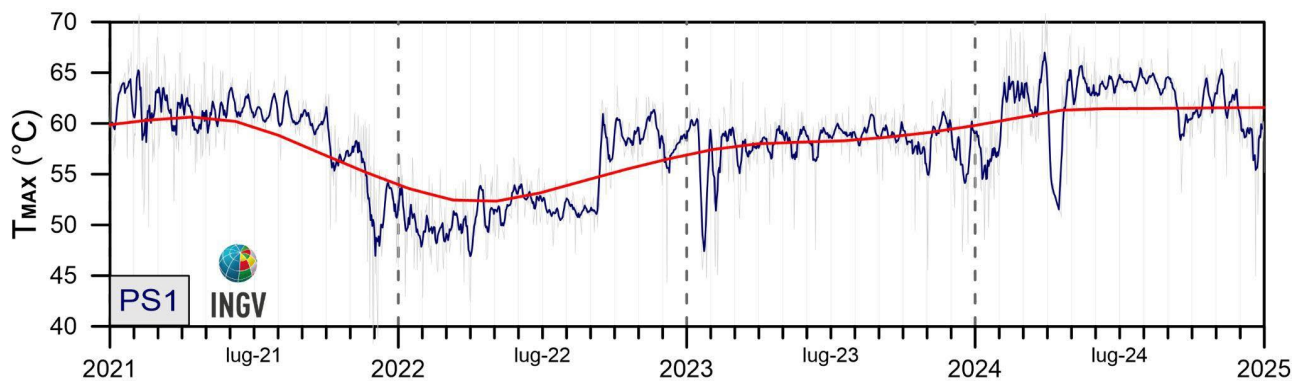


Figura 3.1.2 – Stazione Pisciarelli (PS1): Serie temporali dei valori di temperatura massima rilevati nelle immagini IR [Trend + Residuo (grigio); media settimanale (blu); trend a lungo termine (rosso)].

La serie temporale completa dal 2007 a dicembre 2025 del trend a lungo termine delle temperature massime relative alla stazione PS1 è mostrata in Figura 3.1.3.

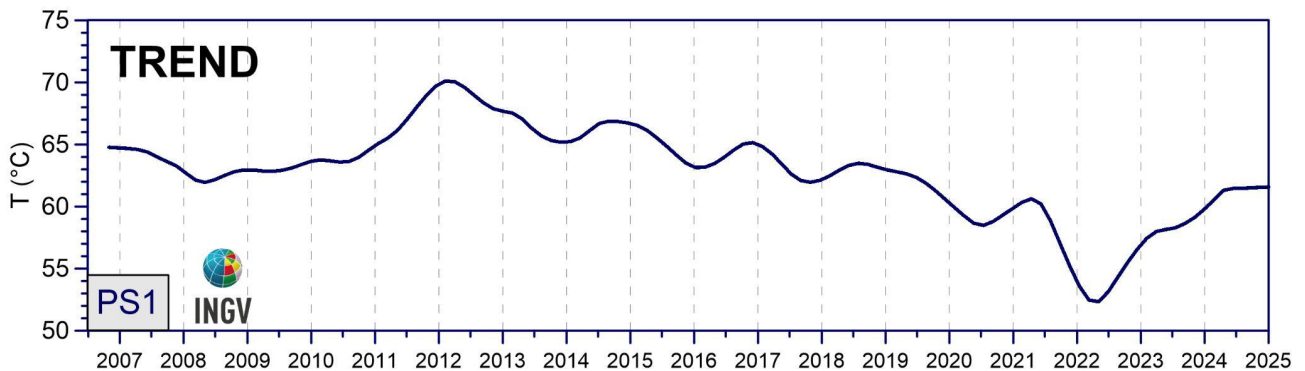


Figura 3.1.3 – Stazione Pisciarelli (PS1). Trend a lungo termine dei valori di temperatura massima rilevati nell'immagine IR ottenuto mediante applicazione dell'algoritmo STL.

Come si evince dal grafico in Figura 3.1.3, dopo un trend in costante diminuzione per circa 10 anni, da febbraio 2012 a febbraio 2022, i valori di temperatura massima hanno subito un aumento per tutto il 2022 sino a febbraio 2023. A partire da marzo 2023, sino a dicembre 2024, il trend a lungo termine mostra un andamento senza sensibili variazioni.

SOLFATARA

I cronogrammi relativi all’elaborazione delle serie temporali delle temperature massime al suolo rilevate dalle stazioni SF1 e SF2 (Fig. 3.1.4 e 3.1.5), nella prima metà del 2024 evidenziano andamenti comparabili e sostanzialmente stabili con variazioni poco rilevanti. Nella seconda metà del 2024, a partire dalla fine di agosto, la stazione SF1 registra un consistente aumento delle temperature massime con picchi che superano di circa 50°C i valori registrati nei mesi precedenti. Tale impennata dei valori si protrae, con sensibili oscillazioni, sino a tutto il mese di novembre 2024 per poi diminuire nel mese di dicembre ritornando a temperature paragonabili a quelle osservate nella prima metà del 2024. La stazione SF2 non mostra tali variazioni e l’andamento delle temperature massime registrate si mantiene fundamentalmente costante.

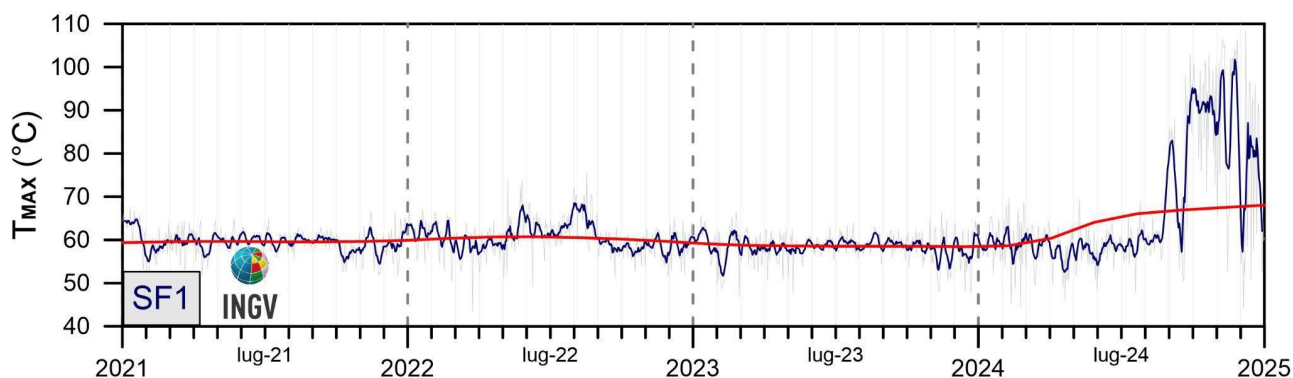


Figura 3.1.4 – Stazione Solfatarata 1 (SF1). Serie temporali dei valori di temperatura massima rilevati nelle immagini IR [Media settimanale del Trend + Residuo (blu); trend a lungo termine (rosso)].

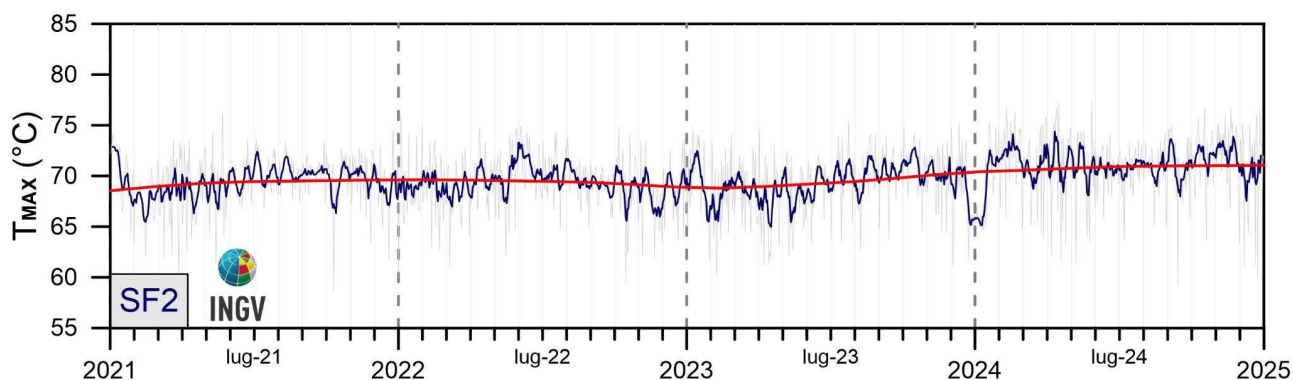


Figura 3.1.5 – Stazione Solfatarata 2 (SF2). Serie temporali dei valori di temperatura massima rilevati nelle immagini IR [Media settimanale del Trend + Residuo (blu); trend a lungo termine (rosso)].

La stazione IR-SOB (Fig. 3.1.6), situata sul bordo sud-orientale della Solfatarata, nel 2024 mostra un andamento delle temperature differente da quello osservato alle stazioni SF1 e SF2, che inquadrano aree all'interno del cratere. I valori registrati da IR-SOB nella prima metà del 2024 confermano l'aumento osservato nel mese di dicembre 2023 e mostrano sensibili oscillazioni, con picchi che superano in alcuni casi anche di 20°C i valori medi del 2023. Successivamente, a partire dal mese di giugno 2024 si registra un lieve calo delle temperature massime che, seppure con sensibili oscillazioni, si stabilizzano intorno a valori medi che superano di 10°C i valori osservati nel 2023.

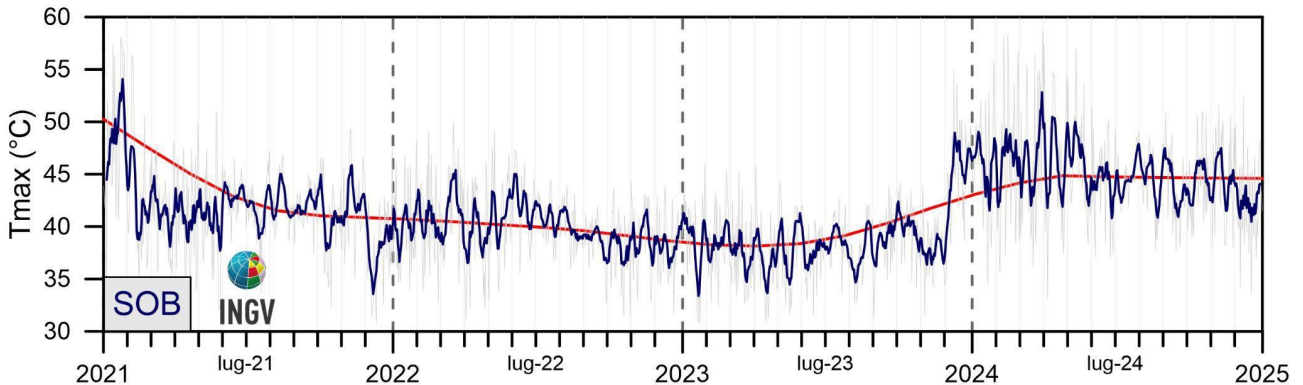


Figura 3.1.6 – Stazione IR-SOB. Serie temporali dei valori di temperatura massima rilevati nelle immagini IR [Media settimanale del Trend + Residuo (blu); trend a lungo termine (rosso)].

OLIBANO

La serie temporale delle temperature massime rilevate dalla stazione di Monte Olibano (OBN) nel 2024 mostra un trend in progressivo lieve aumento sino al mese di agosto, con una variazione positiva di circa 5°C (Fig. 3.1.7). Nel periodo agosto-dicembre 2024 le temperature non hanno registrato ulteriori aumenti e si sono stabilizzate, sebbene con alcune oscillazioni, più intense nel mese di dicembre.

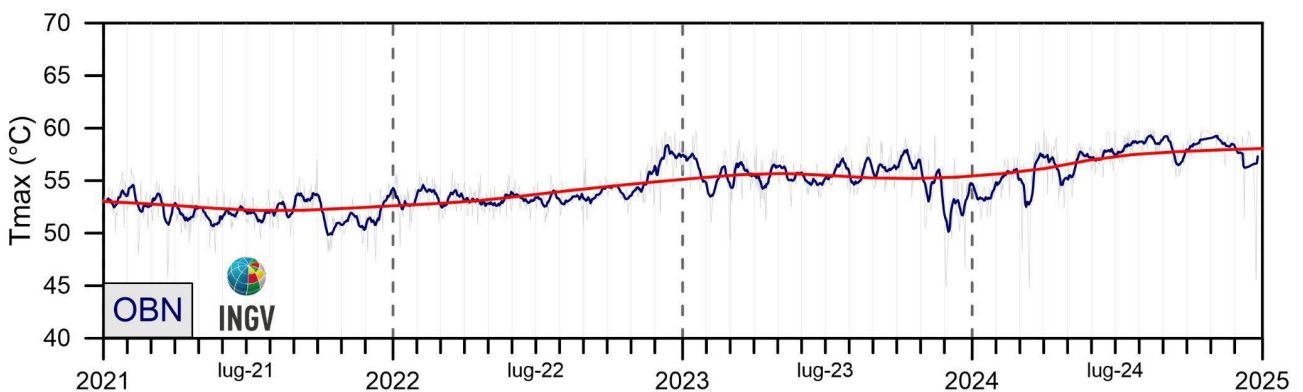


Figura 3.1.7 – Stazione Monte Olibano (OBN). Serie temporali dei valori di temperatura massima rilevati nelle immagini IR [Media settimanale del Trend + Residuo (blu); trend a lungo termine (rosso)].

ANTN

La serie temporale delle temperature massime al suolo misurate nel 2024 dalla stazione ANTN (Fig. 3.1.8) mostra un andamento fondamentale stabile, con frequenti oscillazioni, sino a tutto il mese di agosto. Nel periodo settembre-dicembre 2024 si registra invece una lieve tendenza alla diminuzione dei valori di temperatura.

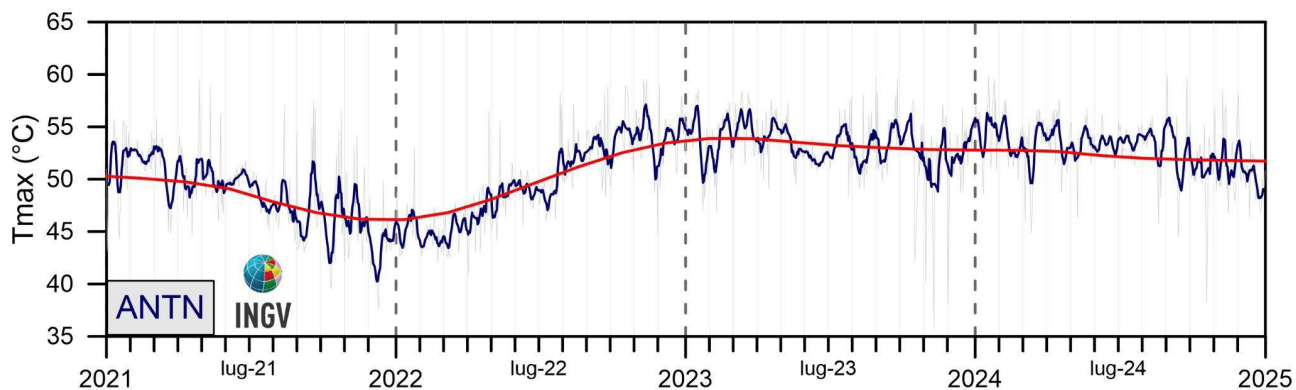


Figura 3.1.8 – Stazione ANTN. Serie temporale dei valori di temperatura massima giornaliera rilevata nelle immagini IR destagionalizzate mediante l'utilizzo dell'algoritmo di destagionalizzazione analitica STL (Seasonal Trend Decomposition).

3.2 MONITORAGGIO TERMICO CON TERMOCAMERA MOBILE, TERMOCOPPIA E DRONE

E. Marotta¹, R. Avino¹, G. Avvisati¹, P. Belviso¹, A. Carandente¹, R. Peluso¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano – Napoli

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 maggiore temperatura in modo da evidenziare eventuali modifiche nella distribuzione areale del campo fumarolico.

Le aree e i punti in cui vengono effettuate le misure termiche ai Campi Flegrei (Figura 3.2.1) sono distribuite in vari settori strutturali della caldera.

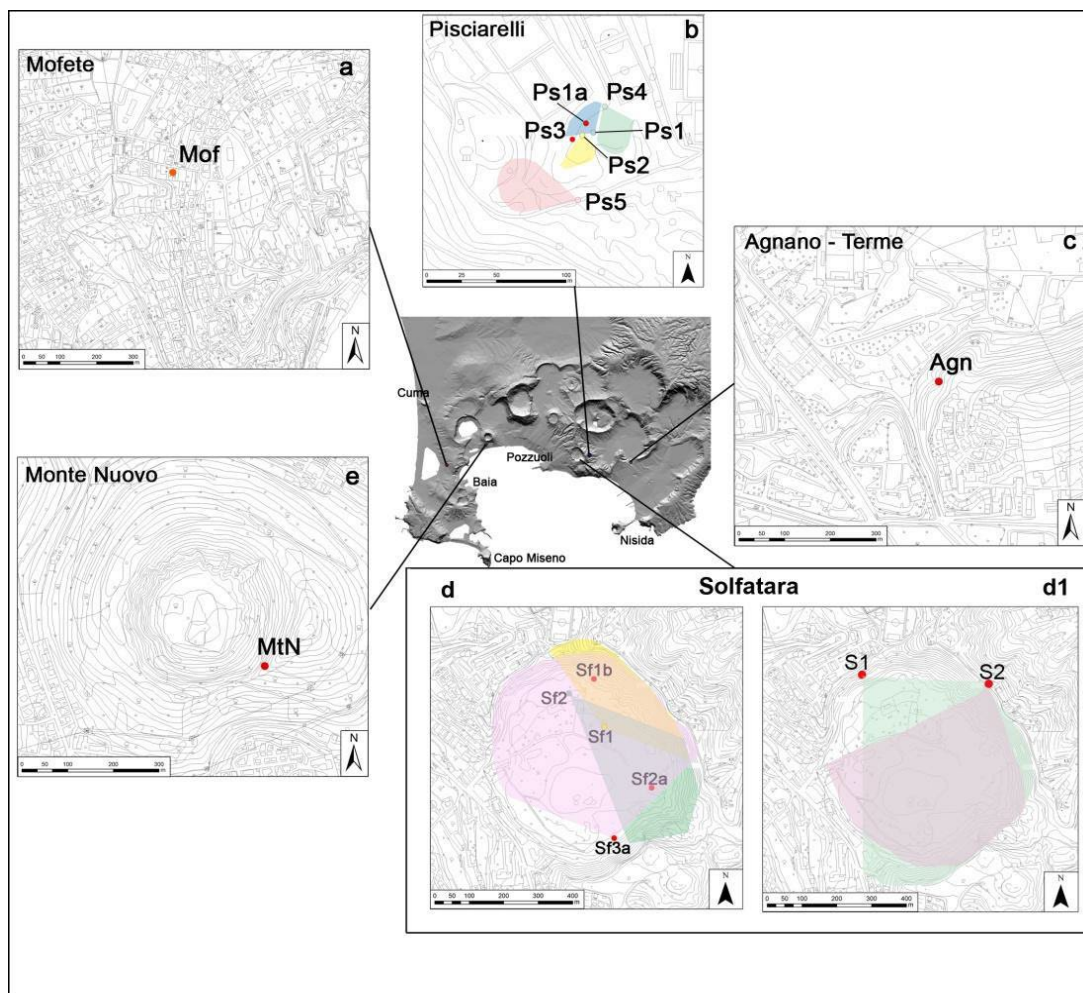


Figura 3.2.1 – Ubicazione dei punti di misura e dei settori indagati ai Campi Flegrei. I pallini rossi indicano i punti stazione dai quali sono stati effettuati rilievi con termocoppia rigida e telecamera termica. Nel riquadro b, le aree colorate in celeste, verde e rosa indicano i versanti rilevati con termocamera rispettivamente dalle stazioni Ps1; Ps4 e Ps5. Nel riquadro d, le aree colorate 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 termocamere e termocoppia. Nel riquadro d1, le aree colorate in rosa e verde indicano i versanti rilevati con termocamera rispettivamente dalle stazioni S1 e S2.

I rilievi sono eseguiti mensilmente essenzialmente di notte e comunque in condizioni di non irraggiamento solare, 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 $0,1^{\circ}\text{C}$ nell'intervallo $-200 \div 1260^{\circ}\text{C}$. Le misure ottenute con la termocamera sono confrontate, quando possibile, con quelle eseguite con termocoppia rigida. Da dicembre 2020 si utilizza una nuova termocamera FLIR T1020 a maggiore risoluzione (1024 x 768 pixel). Per circa un anno, contemporaneamente alla FLIR T1020 si è continuato ad utilizzare anche la FLIR SC640. La doppia misura ha consentito di calibrare i valori rilevati con la nuova termocamera. Da aprile 2019, in alcuni siti e quando le condizioni lo consentono, contestualmente alla FLIR T1020, le misure di temperatura possono essere rilevate anche con l'ausilio di un drone equipaggiato con una termocamera FLIR VUEPRO ad alta risoluzione (640x512 pixel) e precisione $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Dai rilievi effettuati nel 2024, in generale, non ci sono significative variazioni di temperatura massima e modifiche nella distribuzione areale del campo fumarolico nei diversi punti di misura ad eccezione del cratere de La Solfatara.

SOLFATARA

In figura 3.2.1d sono riportati i punti di misura nel cratere de La Solfatara come venivano eseguiti prima di settembre 2017. Da quella data, infatti, il cratere è sotto sequestro giudiziario e non è quindi possibile effettuare le misure termiche notturne in quanto la Procura concede l'accesso solo nelle ore diurne.

Pertanto, si riporta l'area ripresa da un nuovo punto di misura (S1 in Fig. 3.2.1d1) che inquadra il fondo craterico e il versante con la maggiore anomalia termica (Bocca Grande e Bocca Nuova incluse nel rettangolo blu di figura 3.2.2a ed indicate nella figura 3.2.3).

Il confronto delle immagini areali termiche ottenute nel 2024 (Fig. 3.2.2) mostra un aumento dell'area interessata dall'anomalia termica nei mesi di ottobre e novembre.

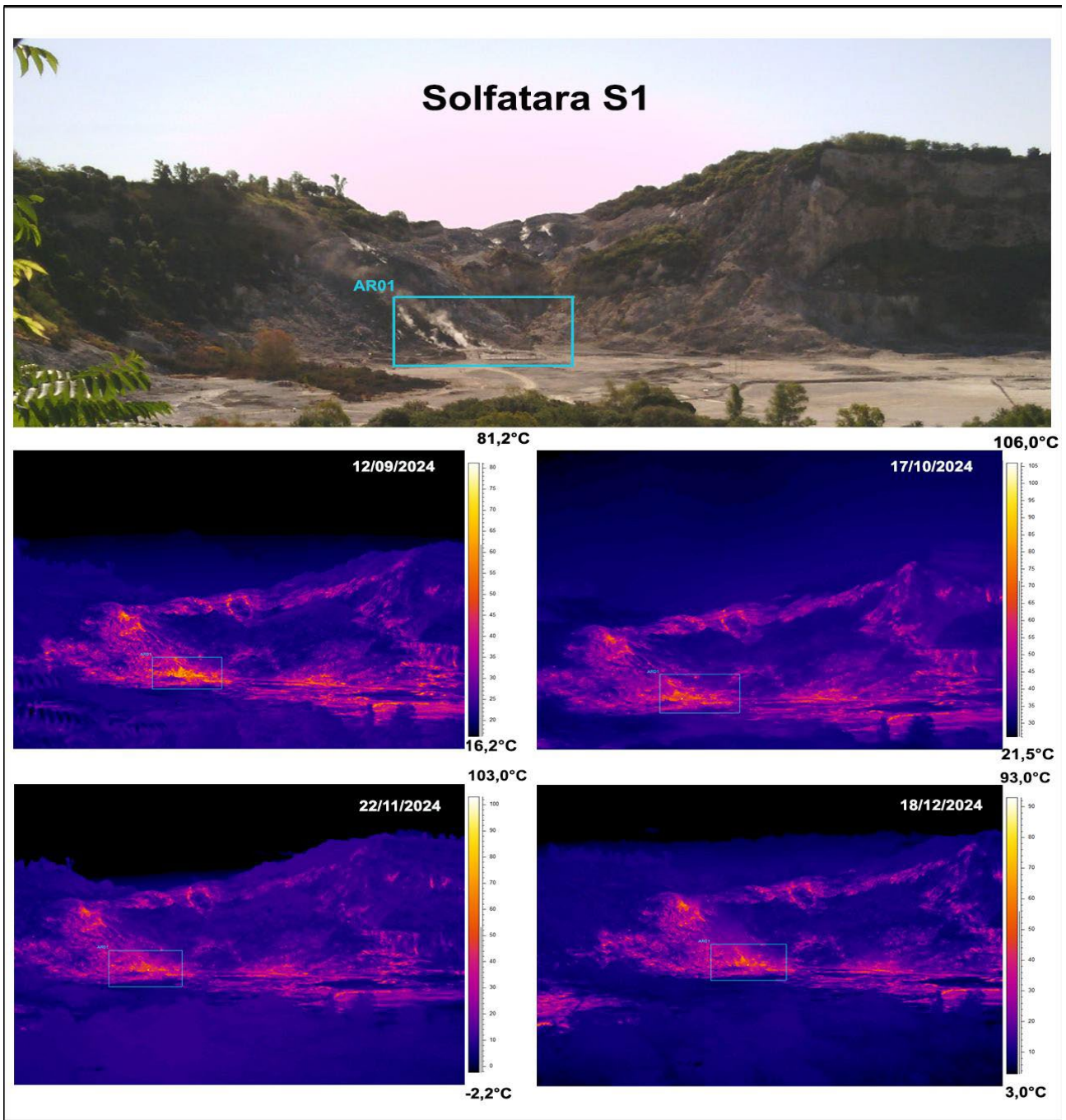


Figura 3.2.2 – Fotocomposizione di immagini termiche riprese dal punto stazione S1 di Figura 3.2.1d1, relative al 12/09/2024, 17/10/2024, 22/11/2024 e 18/12/2024.

In Figura 3.2.3 è mostrata una delle fotocomposizioni di immagini termiche rilevate da drone sul cratere de La Solfatara, in cui l'area a maggiore anomalia termica (Bocca Grande e Bocca Nuova) presenta una temperatura massima di circa 121°C. I voli sono stati eseguiti mantenendo un'altezza costante di 55 m dal suolo con una restituzione di pixel a terra di circa 10,4 cm.

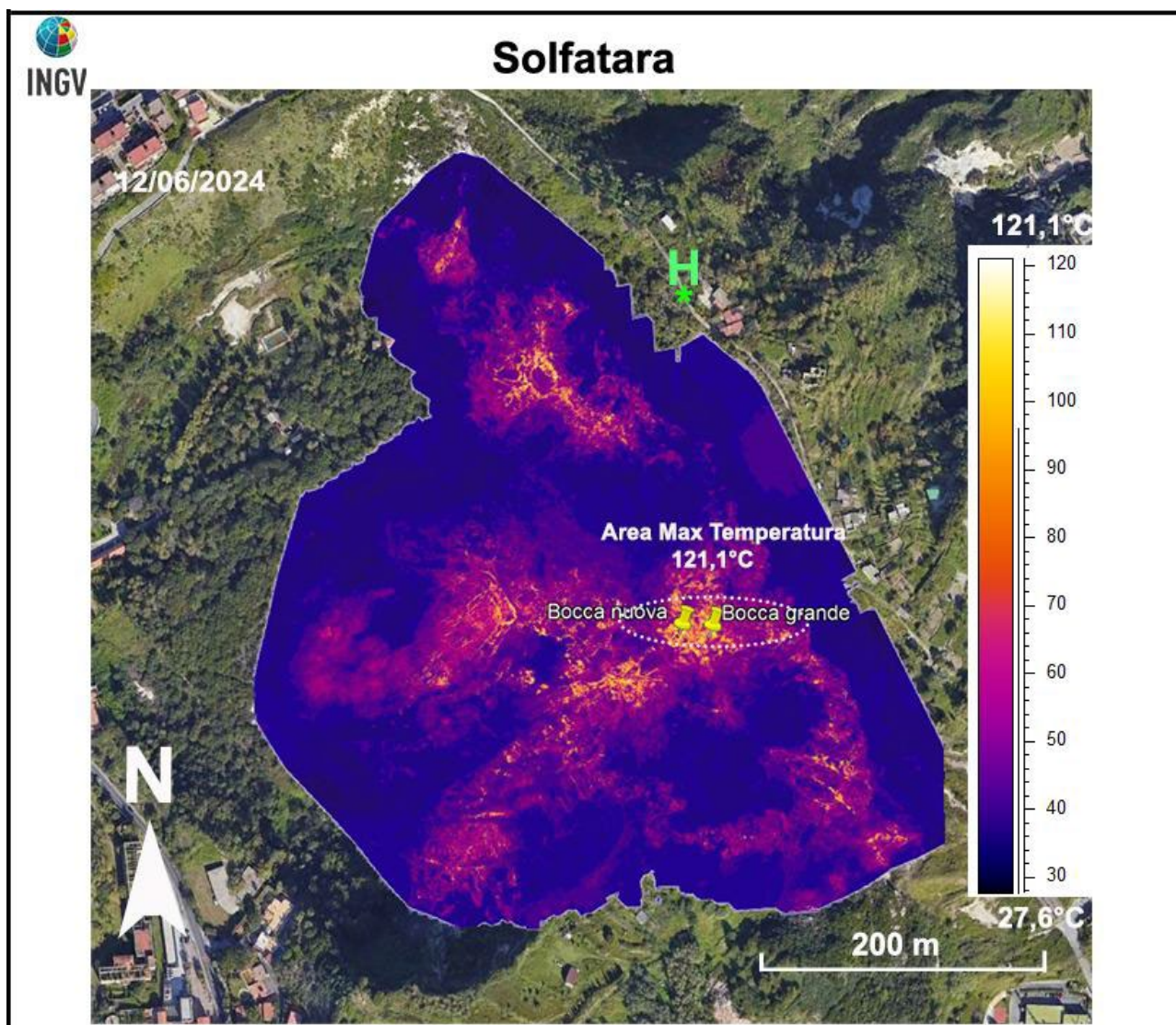


Figura 3.2.3 – Fotocomposizione di immagini termiche rilevate da drone nel mese di giugno 2024. H* indica il sito di decollo e di atterraggio del drone corrispondente al punto S2 di Fig.3.2.1.d1.

PISCIARELLI

A Pisciarelli l'allagamento dell'area della polla è continuato tanto da impedire l'accesso a tutti i siti (Fig. 3.2.1.b). Inoltre, il rispetto delle procedure di sicurezza non consente di effettuare le misure strumentali nell'area più prossima alla polla. Pertanto, dal mese di maggio 2019 i rilievi sono stati effettuati prevalentemente con l'ausilio di un drone. I voli sono stati eseguiti mantenendo un'altezza costante di 55 m dal suolo con una restituzione di pixel a terra di circa 10.4 cm.

La fotocomposizione termica evidenzia due aree con maggiore anomalia termica, denominate PsD1 e PsD2. L'area PsD1 racchiude i versanti che in passato venivano rilevati con termocamera a mano dalle stazioni Ps1 e Ps4, l'area PsD2 include il versante rilevato in passato dalla stazione Ps5 (Fig. 3.2.1d), in corrispondenza della telecamera termica fissa TIRNet dell'OV.

I valori di temperatura massima rilevati durante il 2024 non presentano significative variazioni rispetto ai mesi precedenti (Fig. 3.2.4). Da agosto ad ottobre non è stato possibile volare con il drone per motivi tecnici. Il lieve aumento dei valori di temperatura massima riscontrato nelle due aree nei mesi di maggio e giugno 2024, comparabili a quanto misurato nei mesi di agosto e settembre 2023, è dovuto probabilmente all'assenza di acqua nella polla.

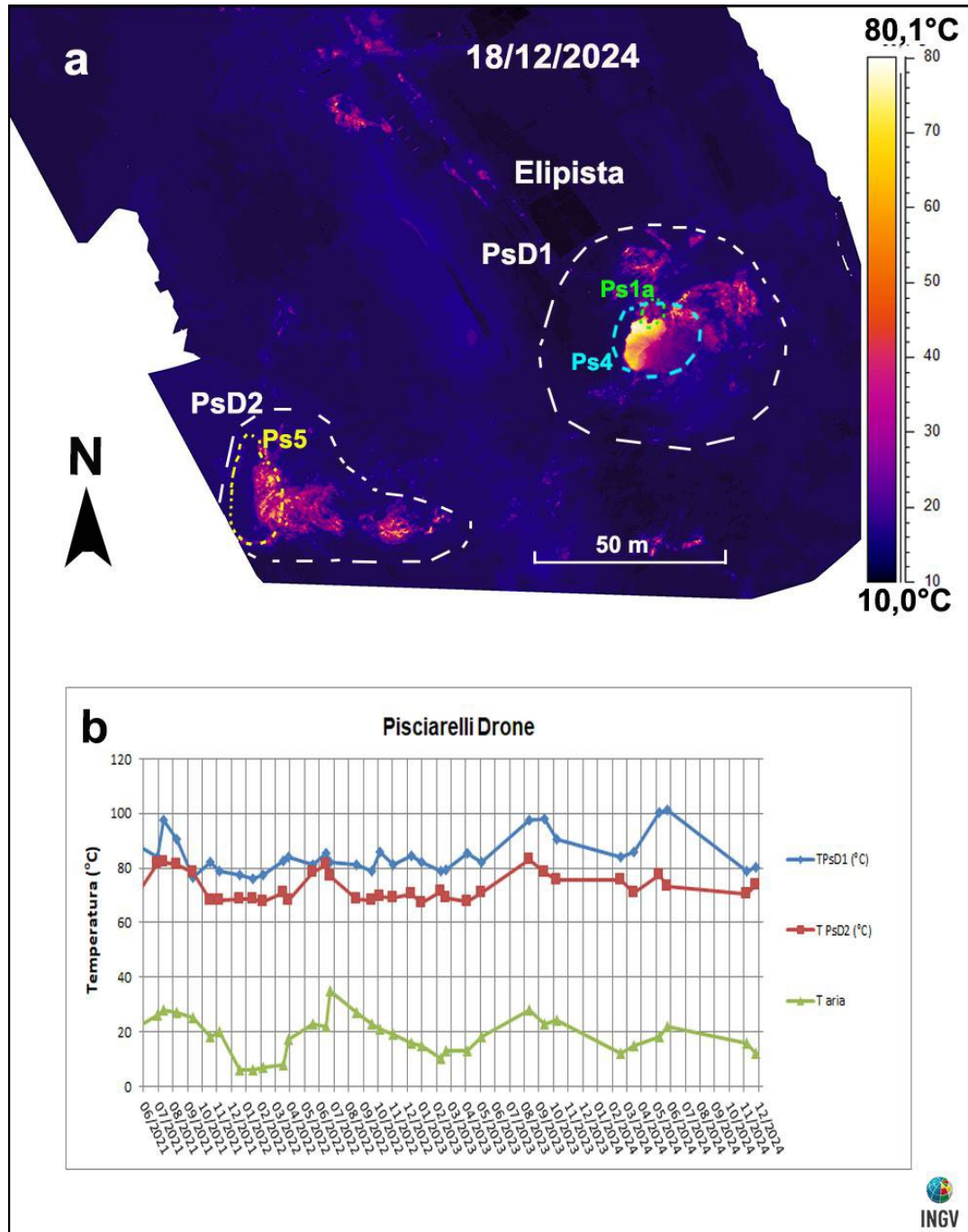


Figura 3.2.4 – Fotocomposizione di immagini termiche rilevate da drone nel mese di ottobre 2023 (a) e valori massimi di temperatura (T) delle aree a maggiore anomalia termica (PsD1 e PsD2), confrontati con la temperatura dell'aria misurata nel momento del rilievo termico, da giugno 2021 a dicembre 2024 (b). H* indica il sito di decollo e di atterraggio del drone.

MONTE NUOVO

Nel corso del 2024 sono state effettuate misure periodiche mensili lungo il versante meridionale dell'edificio di Monte Nuovo (Fig. 3.2.1e).

I rilievi termici effettuati con telecamera termica e termocoppia rigida (Fig. 3.2.5) mostrano valori di temperatura piuttosto stabili ad eccezione delle variazioni stagionali e simili a quelli misurati nell'anno precedente (Figura 3.2.5c).

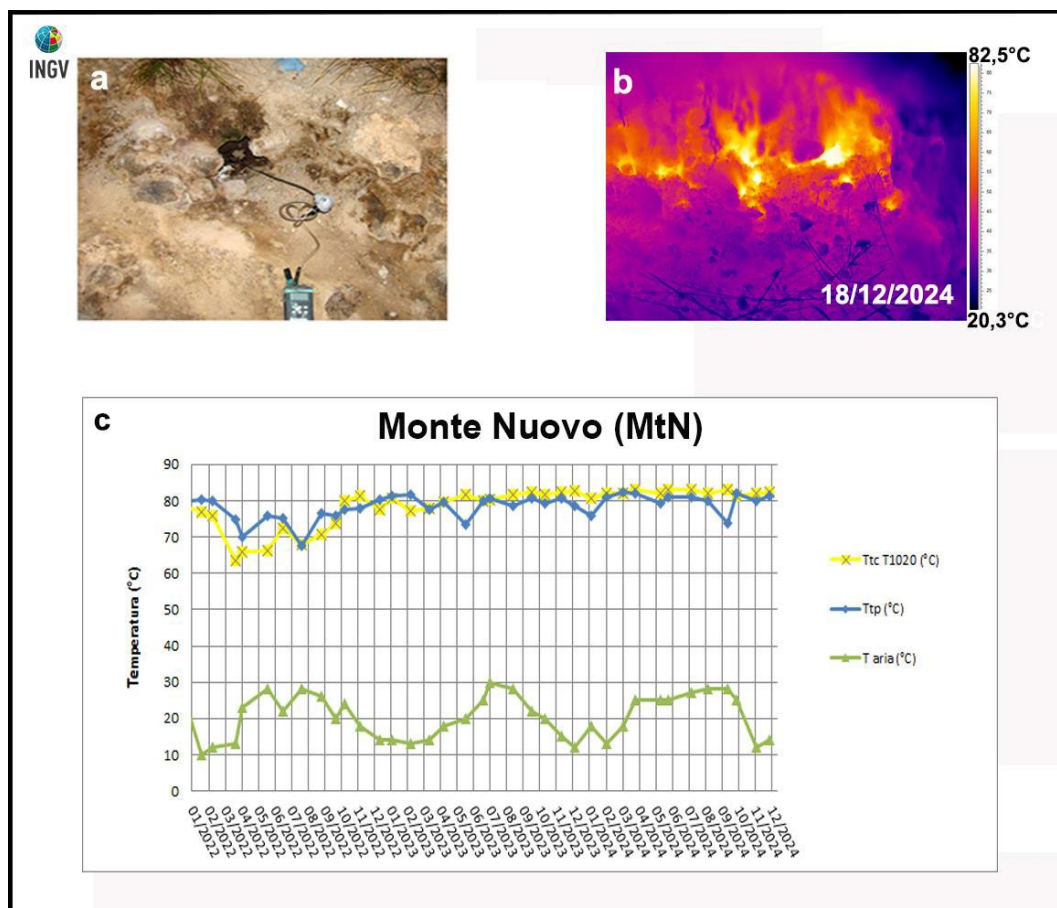


Figura 3.2.5 – Fumarola lungo il versante meridionale di Monte Nuovo. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto MtN di Figura 3.2.1e. Valori massimi di temperatura con termocamera FLIR T1020 (TtcT1020) e con termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell'aria (Taria) misurata nel momento del rilievo termico, da gennaio 2021 a dicembre 2024 (c).

AGNANO TERME

Nel corso del 2024 sono state effettuate le misure periodiche mensili in corrispondenza di una fumarola non captata presso le "Terme di Agnano" (Fig. 3.2.1c).

I rilievi termici effettuati con telecamera termica e termocoppia rigida (Fig. 3.2.6) mostrano valori di temperatura piuttosto stabili, ad eccezione delle variazioni stagionali, e simili a quelli misurati negli anni precedenti a meno di variazioni stagionali (Fig. 3.2.6c).

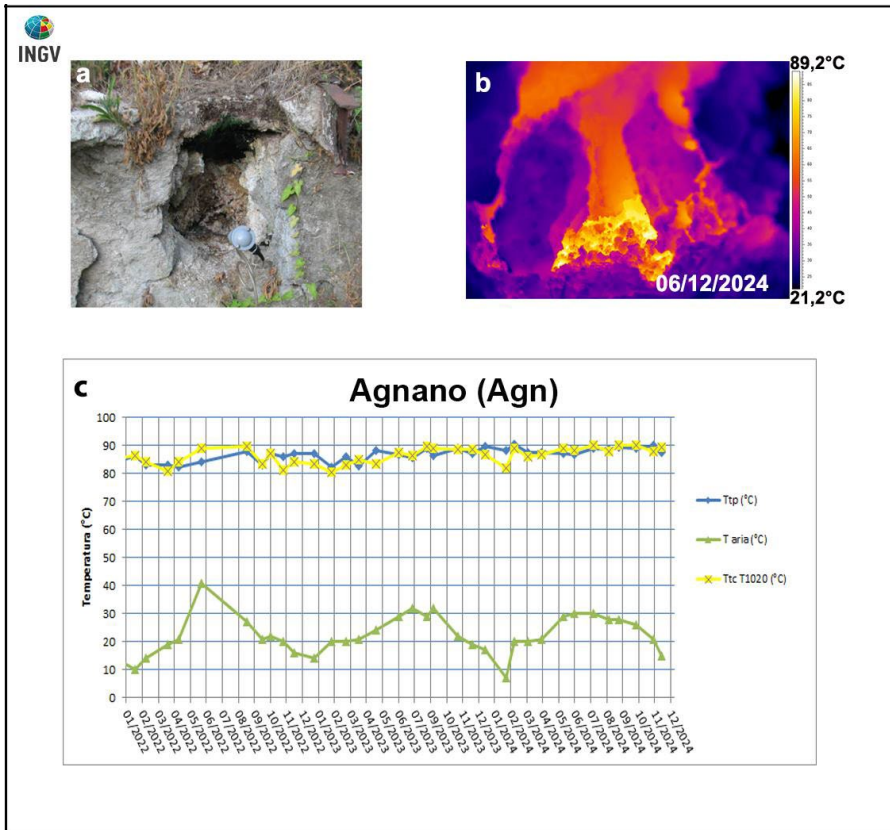
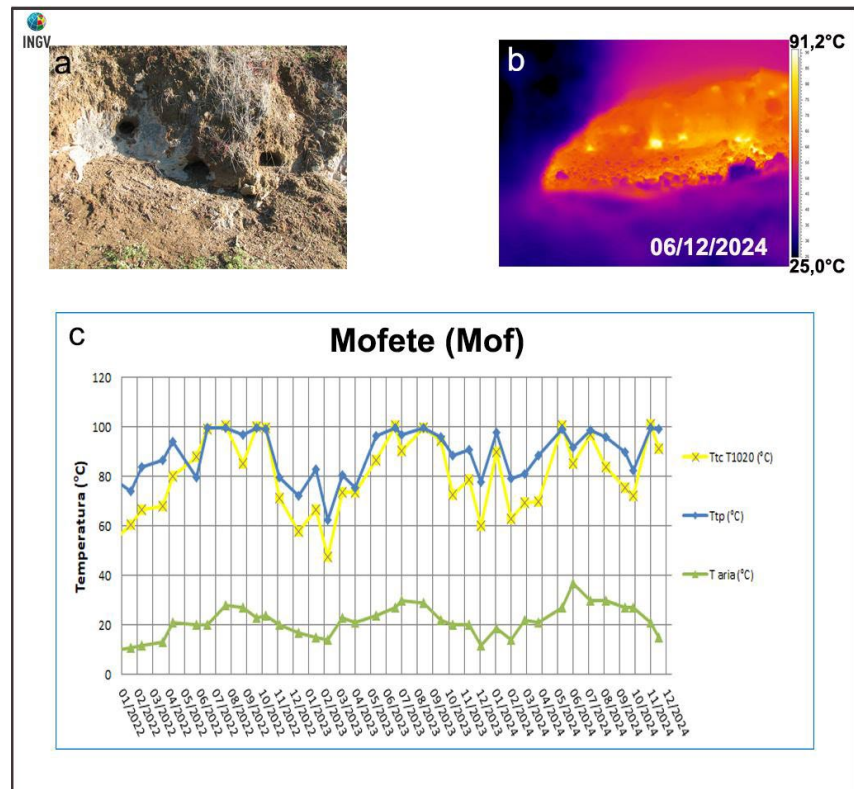


Figura 3.2.6 - Fumarola all'interno dello stabilimento termale delle "Terme di Agnano". Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione Agn di Figura 3.2.1c. Valori massimi di temperatura con termocamera FLIR T1020 (T_{tcT1020}) e con termocoppia (T_{tp}), confrontati con la temperatura dell'aria (T_{aria}) misurata nel momento del rilievo termico, da gennaio 2022 a dicembre 2024 (c).

Mofete

Nel corso del 2024 sono state effettuate misure periodiche mensili in località Mofete (Fig. 3.2.1a). I valori di temperatura misurati sono in linea con le medie stagionali dell'anno precedente (Fig. 3.2.7c).

Figura 3.2.7 - Fumarola in località Mofete. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto Mof di Figura 3.2.1a. Valori massimi di temperatura con termocamera FLIR T1020 (T_{tcT1020}) e con termocoppia (T_{tp}), confrontati con la temperatura dell'aria (T_{aria}) misurata nel momento del rilievo termico, da gennaio 2022 a dicembre 2024 (c).



3.3 COMPARAZIONE DELLA TEMPERATURA SUPERFICIALE DA DATI SATELLITARI E RETE TIRNET

F. Buongiorno¹, E. Bellucci Sessa², T. Caputo², M. Silvestri¹, F. Sansivero²

¹ INGV Osservatorio Nazionale Terremoti - Roma

² INGV Osservatorio Vesuviano – Napoli

Le missioni satellitari che acquisiscono dati nell'IR termico con risoluzioni spaziali idonee all'analisi del flusso termico presente nei vulcani dell'area napoletana sono le seguenti:

Landsat 8-9: i satelliti hanno due sensori a bordo, Operational Land Imager (OLI) e Thermal Infrared Sensor (TIRS). OLI ha 9 bande che acquisiscono dal visibile al vicino infrarosso (da 0.4 a 2.5 micron) e il TIRS che ha due bande nel termico, da 10.6 a 12.5 micron. Landsat acquisisce con una risoluzione spaziale di 30 metri nelle bande visibile e vicino infrarosso e 100 metri nelle bande nell'infrarosso termico (ricampionate a 30 metri) ed un tempo di rivisita di 16 giorni (Tabella 3.3.1). Dal mese di novembre 2021 la messa in orbita di Landsat 9 ha permesso di ridurre i tempi di rivisita in circa 8 giorni. Per questa missione, a seguito della definizione del programma congiunto USGS-INGV nel 2014, è stata attivata l'acquisizione dei dati Landsat 8 e dal 2021 quella di Landsat 9 sull'orbita ascendente relativa ai passaggi notturni che risultano utili alla discriminazione delle anomalie termiche in fase di prevenzione.

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer): uno dei cinque sensori remoti che si trovano a bordo del satellite per telerilevamento TERRA (EOS AM-1). Il sensore acquisisce in 3 bande nel visibile e 5 nell'infrarosso termico. La risoluzione spaziale è compresa tra 15 e 90 metri, rispettivamente per il visibile/vicino infrarosso e infrarosso termico (Tabella 3.3.2). Il tempo di rivisita è il medesimo del Landsat 8, ossia di 16 giorni, con acquisizioni diurne e notturne. Dal 2009 le bande nel vicino infrarosso (SWIR) non acquisiscono più a seguito di alcuni problemi dello spettrometro SWIR. Il sensore è, inoltre, nella sua fase finale di operatività essendo stato messo in orbita dalla NASA nel 1999.

Tabella 3.3.1 – Caratteristiche delle bande del Landsat 8; * Le bande TIRS sono acquisite a 100 metri di risoluzione ma sono ricampionate a 30 metri (<http://landsat.usgs.gov/>). Le caratteristiche sono identiche al Landsat 9.

Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) Launched February 11, 2013	Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
	Band 1 - Coastal aerosol	0.43 - 0.45	30
	Band 2 - Blue	0.45 - 0.51	30
	Band 3 - Green	0.53 - 0.59	30
	Band 4 - Red	0.64 - 0.67	30
	Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Band 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Band 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Band 8 - Panchromatic	0.50 - 0.68	15
	Band 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100 * (30)
	Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100 * (30)

Tabella 3.3.2 – Caratteristiche di ASTER.

Instrument	VNIR	SWIR	TIR	
Bands and Spectral Range (µm)	1	0.52-0.60	4 1.60-1.70	10 8.125-8.475
	2	0.63-0.69	5 2.145-2.185	11 8.475-8.825
	3N	0.78-0.86	6 2.185-2.225	12 8.925-9.275
			7 2.235-2.285	13 10.25-10.95
			8 2.295-2.365	14 10.95-11.65
		9 2.360-2.430		
Spatial Resolution	15m	30m	90m	
Swath Width	60km	60km	60km	
Cross Track Pointing	± 318km (± 24 deg)	± 116km (± 8.55 deg)	± 116km (± 8.55 deg)	
Quantisation (bits)	8	8	12	
Revisit Time	16 days	16 days	16 days	

Esistono ulteriori missioni che acquisiscono nell’infrarosso termico (MODIS, AVHRR, Sentinel 3 – SLSTR, Meteosat Second Generation con SEVIRI) ma tutte hanno una risoluzione spaziale dell’ordine dei km, pertanto non adatte al monitoraggio di aree di piccole dimensioni (minori di 1kmq) e con gradienti di temperatura in superficie dell’ordine 5-100 °C. Le missioni spaziali LANDSAT e ASTER sono le uniche che attualmente consentono di stimare le temperature superficiali prodotte da emissioni puntuali (fumarole) che presentano gradienti di temperatura alla superficie dell’ordine 5-100 °C. Per il periodo gennaio – dicembre 2024 sono stati acquisiti i seguenti dati satellitari ottici:

<p>ASTER Diurni</p> <p>Gennaio: Nessuno</p> <p>Febbraio: Nessuno</p> <p>Marzo: Nessuno</p> <p>Aprile: Nessuno</p> <p>Maggio: 12</p> <p>Giugno: Nessuno</p> <p>Luglio: Nessuno</p> <p>Agosto: Nessuno</p> <p>Settembre: Nessuno</p> <p>Ottobre: Nessuno</p> <p>Novembre: Nessuno</p> <p>Dicembre: Nessuno</p>	<p>ASTER Notturni</p> <p>Gennaio: Nessuno</p> <p>Febbraio: 17</p> <p>Marzo: 22, 27</p> <p>Aprile: Nessuno</p> <p>Maggio: 7, 12</p> <p>Giugno: Nessuno</p> <p>Luglio: 2, 19</p> <p>Agosto: 5, 22</p> <p>Settembre: Nessuno</p> <p>Ottobre: 15</p> <p>Novembre: 1</p> <p>Dicembre: Nessuno</p>
<p>LANDSAT8 Diurni</p> <p>Gennaio: 9, 24</p> <p>Febbraio: 2, 17, 18, 26</p> <p>Marzo: 5, 20, 21, 29</p> <p>Aprile: 5, 6, 13, 14, 21, 29, 30</p> <p>Maggio: 16, 23</p>	<p>LANDSAT8 Notturni</p> <p>Gennaio: 25</p> <p>Febbraio: 2</p> <p>Marzo: 13, 21, 29</p> <p>Aprile: 6, 14, 22</p> <p>Maggio: 16</p>

Giugno: 8, 16, 17	Giugno: 17
Luglio: 2, 10, 11, 18, 19, 26	Luglio: 11, 19
Agosto: 4, 11, 12, 20, 27,28	Agosto: 4, 12, 20
Settembre: 4, 20, 21, 29	Settembre: 5, 13, 29
Ottobre: 14, 15, 30, 31	Ottobre: 15, 31
Novembre: 15, 16, 23, 24	Novembre: 8, 16, 24
Dicembre: 2, 17	Dicembre: 18, 26

Pertanto, nel suddetto periodo, sono stati acquisiti e processati i seguenti dati:

N° 1 ASTER Diurni

N° 11 ASTER Notturni

N° 48 LANDSAT8 Diurni

N° 25 LANDSAT8 Notturni

I dati satellitari ASTER e LANDSAT 8-9 sono distribuiti da USGS (United States Geological Survey) attraverso i siti:

<http://earthexplorer.usgs.gov> e www.glovis.usgs.gov

Per l'elaborazione di tali dati, le informazioni necessarie per il calcolo delle correzioni atmosferiche sono state ricavate dal sito dal sito:

<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.

Per quanto riguarda i dati ASTER, è opportuno sottolineare che l'acquisizione di questi dati avviene "on demand" (a differenza dei dati L8-9 a copertura globale) attraverso un sistema di pianificazione che vede l'attività di monitoraggio dei Campi Flegrei con priorità inferiore rispetto ad altre acquisizioni sulla stessa orbita o limitrofe. Pertanto, a differenza dei dati L8-9, l'acquisizione dei dati ASTER non è regolare.

Le riprese diurne delle immagini satellitari contengono informazioni sia di tipo emesso che riflesso, e risulta complesso separare il contributo della radianza emessa dalle superfici indagate dal contributo dell'irraggiamento dovuto alla illuminazione solare. Viceversa, in riprese effettuate di notte, sempre nello stesso intervallo, mancando l'irradianza del sole sarà registrata soltanto la radianza emessa. Inoltre, l'utilizzo di immagini notturne consente di rilevare con maggior precisione eventuali variazioni spazio-temporali della temperatura del suolo in aree caratterizzate da rilascio termico particolarmente elevato anche grazie ad una temperatura di "background" dell'immagine maggiormente uniforme. Per questo motivo sono stati elaborati e analizzati esclusivamente i dati relativi ai passaggi notturni.

ANALISI DEI DATI SATELLITARI ACQUISITI NEL PERIODO GENNAIO – DICEMBRE 2024.

Dall'inizio del 2017 è in corso una attività di ricerca finalizzata alla validazione dei risultati relativi alla stima della temperatura superficiale da dati satellitari ed alla valutazione dell'affidabilità e robustezza dell'algoritmo utilizzato per il calcolo delle appropriate correzioni atmosferiche necessarie per ottenere la temperatura di superficie a partire dalla radianza misurata al sensore.

Tale attività è realizzata mediante comparazione tra le misure di temperatura superficiale effettuate in-situ dalle stazioni della rete permanente di monitoraggio IR operanti nell'area dei Campi Flegrei (TIRNet) e quelle ottenute dal processamento delle immagini satellitari.

La rete TIRNet per la sorveglianza vulcanica continua a lungo termine dei Campi Flegrei, tramite acquisizione di immagini all'infrarosso termico, è attualmente costituita da 6 stazioni permanenti, di cui due ubicate all'interno del cratere della Solfatara (SF1, SF2), una sul bordo sud-orientale del cratere della Solfatara (SOB), una in località Pisciarelli (PS1), la quinta (OBN) osserva il versante SE del duomo di monte Olibano e la sesta (ANT), di recente installazione, osserva l'area di via Antiniana [cfr. § 3.1]. Le aree monitorate corrispondono generalmente a porzioni di versante caratterizzate da significative anomalie termiche in corrispondenza di aree a degassamento diffuso e intensamente fumarolizzate. Nel caso della stazione SF1 nell'area inquadrata ricadono porzioni di versante con diverse pendenze, diversa profondità di campo e parte del fondo craterico sub-orizzontale (Figura 3.3.1).

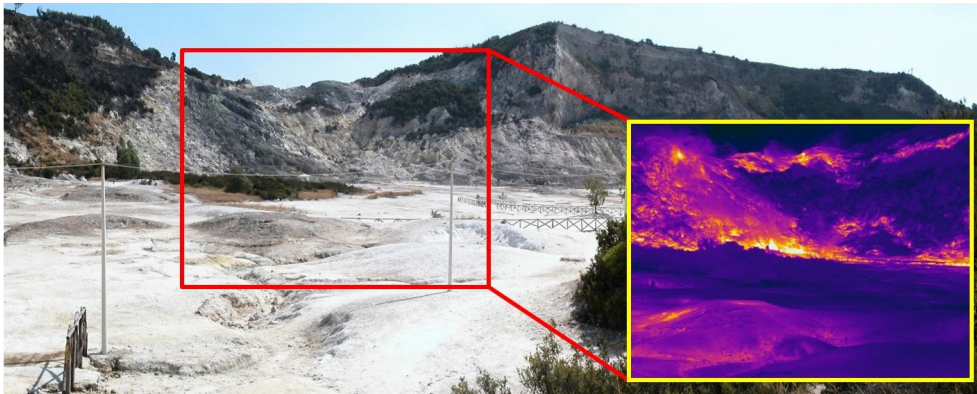


Figura 3.3.1 – Area inquadrata dalla stazione TIR SF1.

Per tale motivo, al fine di confrontare i valori di temperatura ottenuti dal processamento dei dati satellitari con quelli rilevati dalle stazioni al suolo, l'immagine IR ripresa dalla stazione SF1 è stata suddivisa in tre settori corrispondenti alle tre principali distanze focali presenti nel frame di ripresa IR.

Tutte le immagini termiche della Rete TIRNet sono state georiferite nel sistema UTM WGS84 (Figura 3.3.2a).

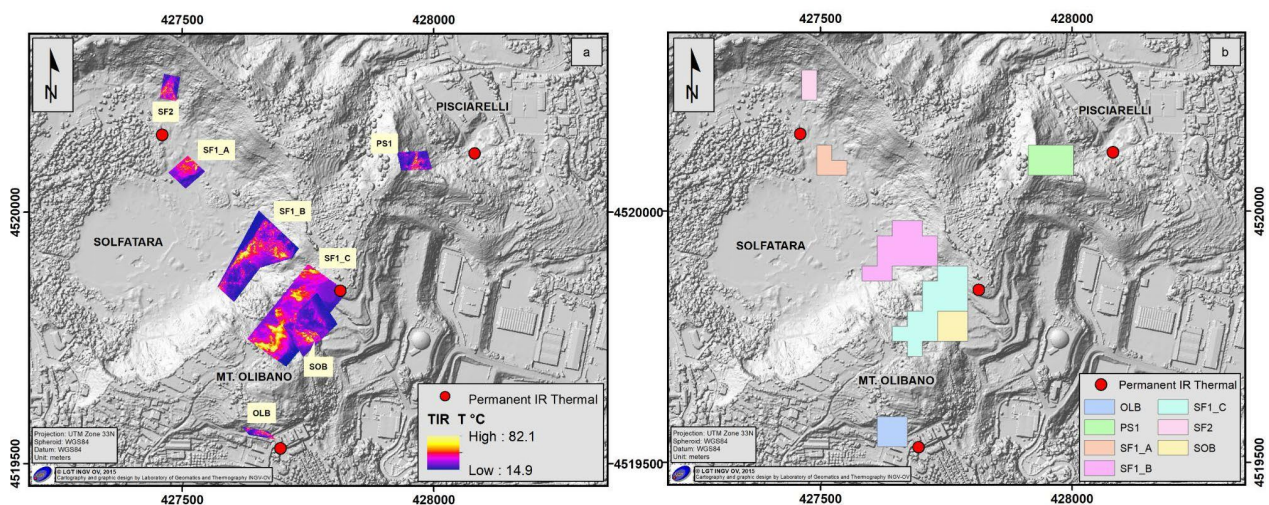


Figura 3.3.2 – Immagini termiche georiferite del 15/10/2024 (a) e aree di analisi (b).

Al fine di confrontare le temperature delle immagini satellitari con le temperature delle immagini termiche della Rete TIRNet, è stata creata una griglia regolare di dimensioni 30x30 metri per selezionare aree poligonali corrispondenti alle sole celle in cui ricadono le immagini TIR georiferite riprese dalle differenti stazioni al suolo (Figura 3.3.2b).

Le immagini satellitari ASTER hanno una risoluzione spaziale di 90 m mentre le immagini Landsat 8-9 sono distribuite a 30 m. Per rendere omogenea la comparazione le ASTER sono state georiferite e ricampionate in celle di 30 m aventi tutte il medesimo valore di temperatura corrispondente a quello della cella di origine (Figura 3.3.3).

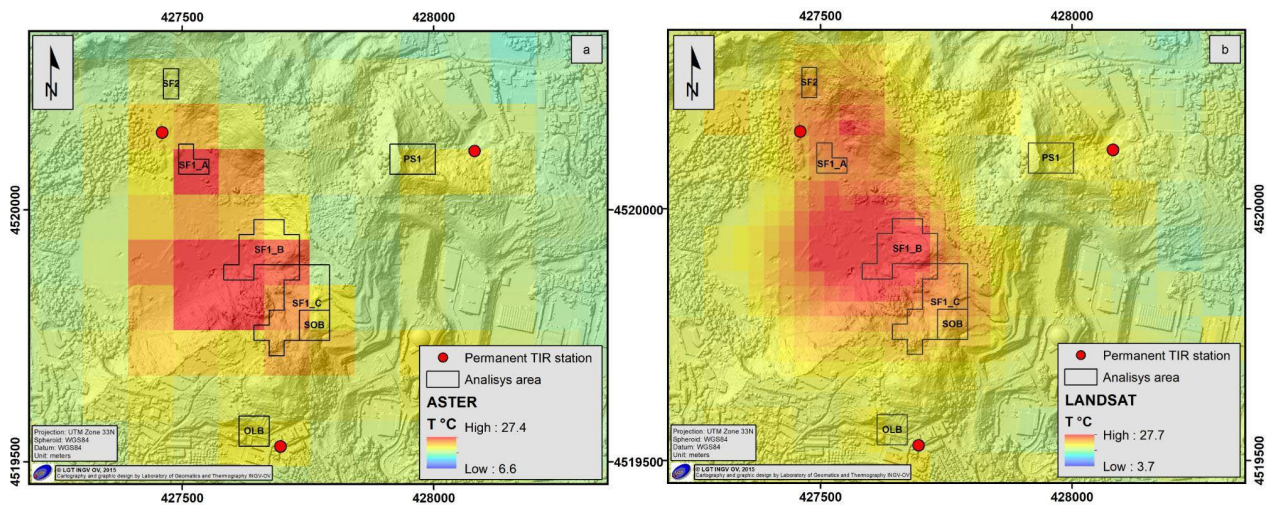
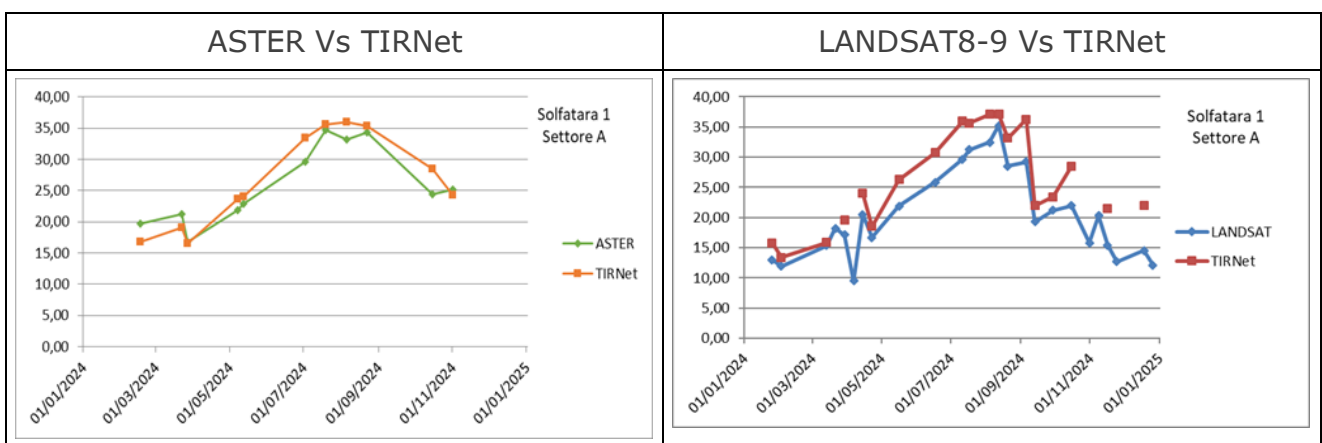
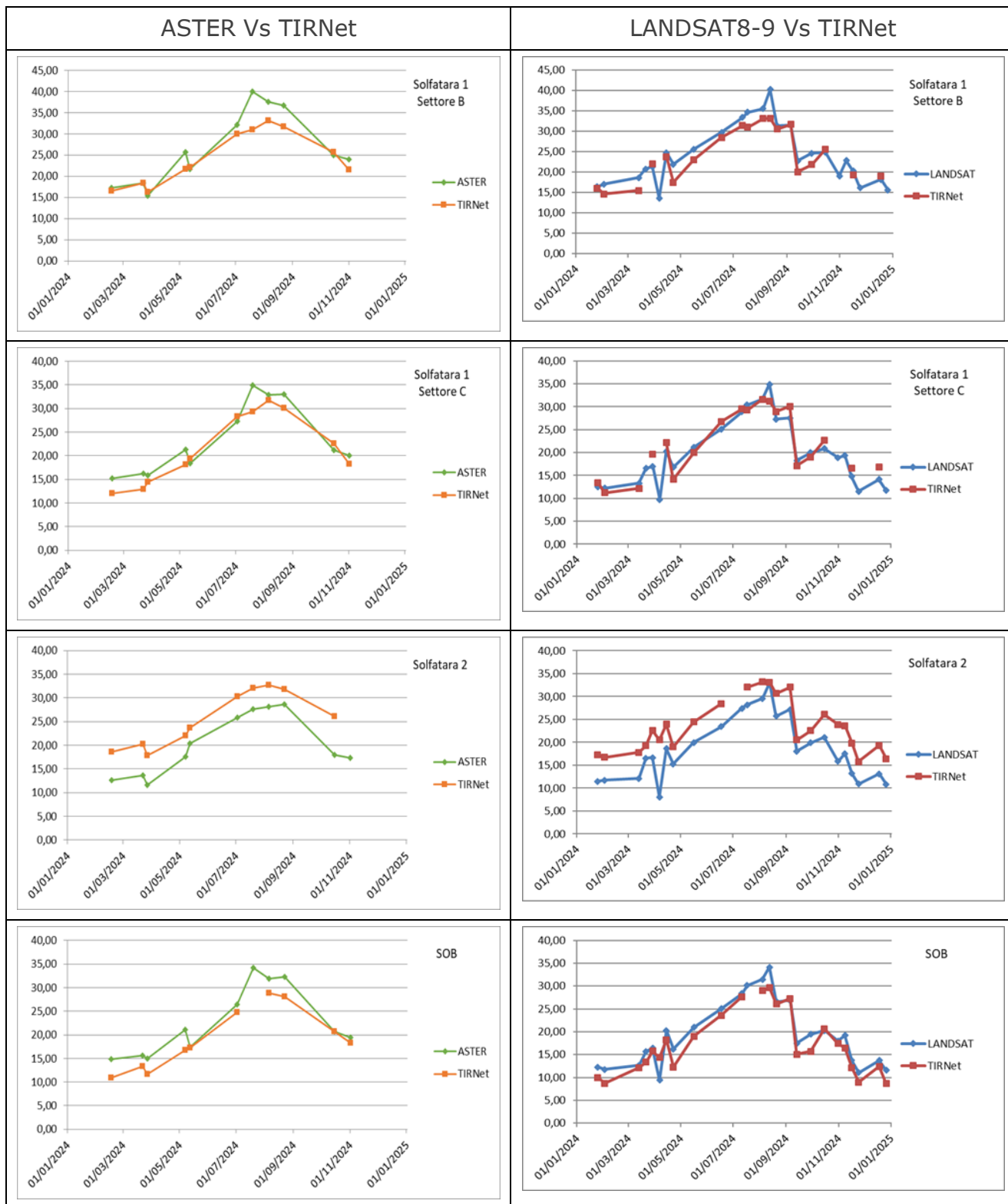
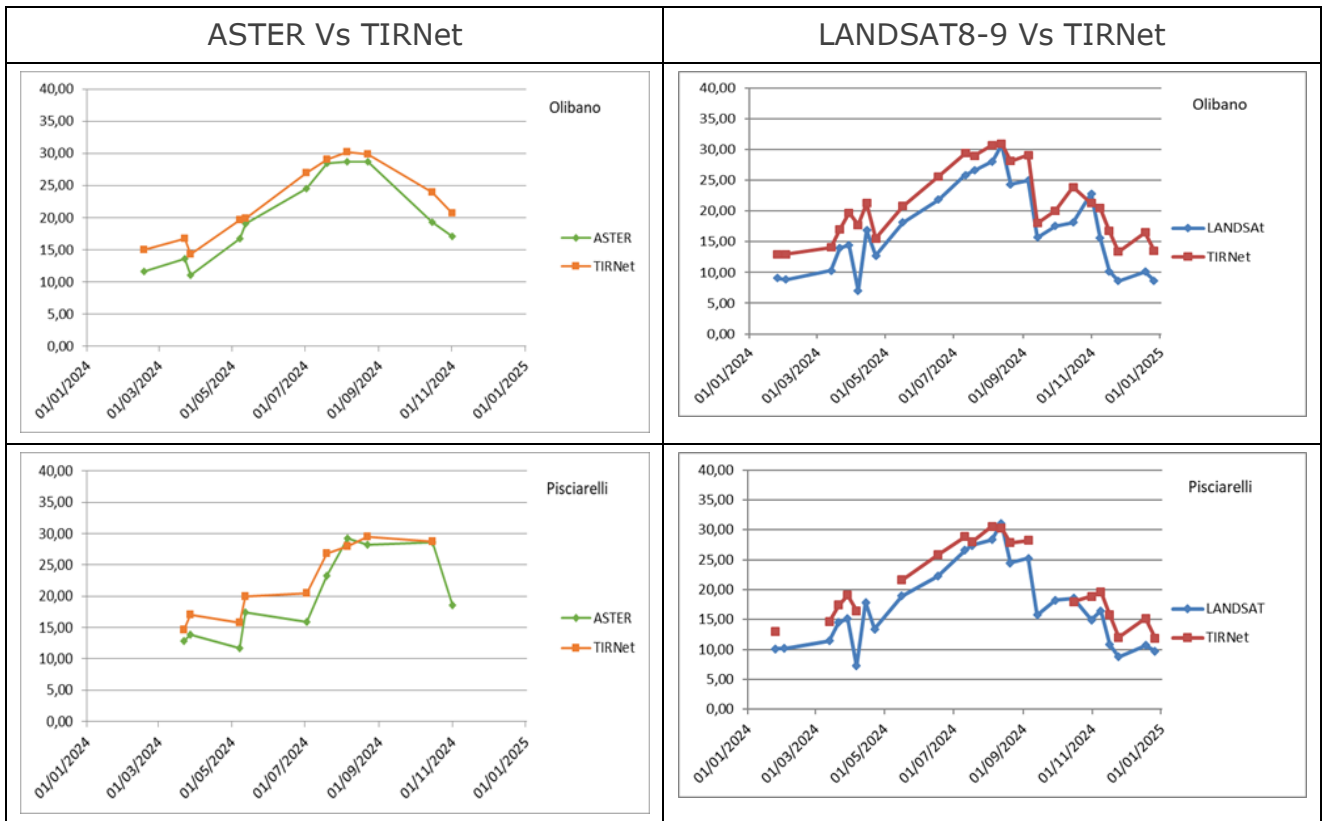


Figura 3.3.3 – Immagini termiche satellitari ASTER (a) e Landsat 9 (b) rispettivamente del 15/10/2024. I poligoni racchiudono le aree inquadrate dalla rete TIRNet.

Nei grafici che seguono sono riportate le comparazioni tra le temperature medie ottenute dall’analisi dei dati ASTER, LANDSAT 8-9 e quelle delle stazioni della rete TIRNet acquisite nel periodo oggetto di questa Relazione.







Dai grafici precedenti è possibile osservare che i risultati ottenuti dall’analisi dei dati acquisiti dai due sistemi di acquisizione a scale differenti sono comparabili e a novembre 2024 mostrano lo stesso aumento delle temperature rilevata anche dalla destagionalizzazione delle telecamere termiche (figura 3.1.4) ed in linea da quanto osservato dalle termocamere mobili e da drone (figure 3.2.2 e 3.2.3).

Questa osservazione consente di validare la stima della temperatura di superficie ottenuta tramite processamento dei dati satellitari garantendo la robustezza e l’affidabilità dell’algoritmo utilizzato per correggere le immagini dalle distorsioni dovute alle condizioni atmosferiche.

Nelle Figure 3.3.4 e 3.3.5 sono riportate le mappe di stima di temperatura superficiale notturne ottenuta da dati Landsat 8 e ASTER, acquisiti rispettivamente i giorni 8 e 1 novembre 2024 sull’area Flegrea.

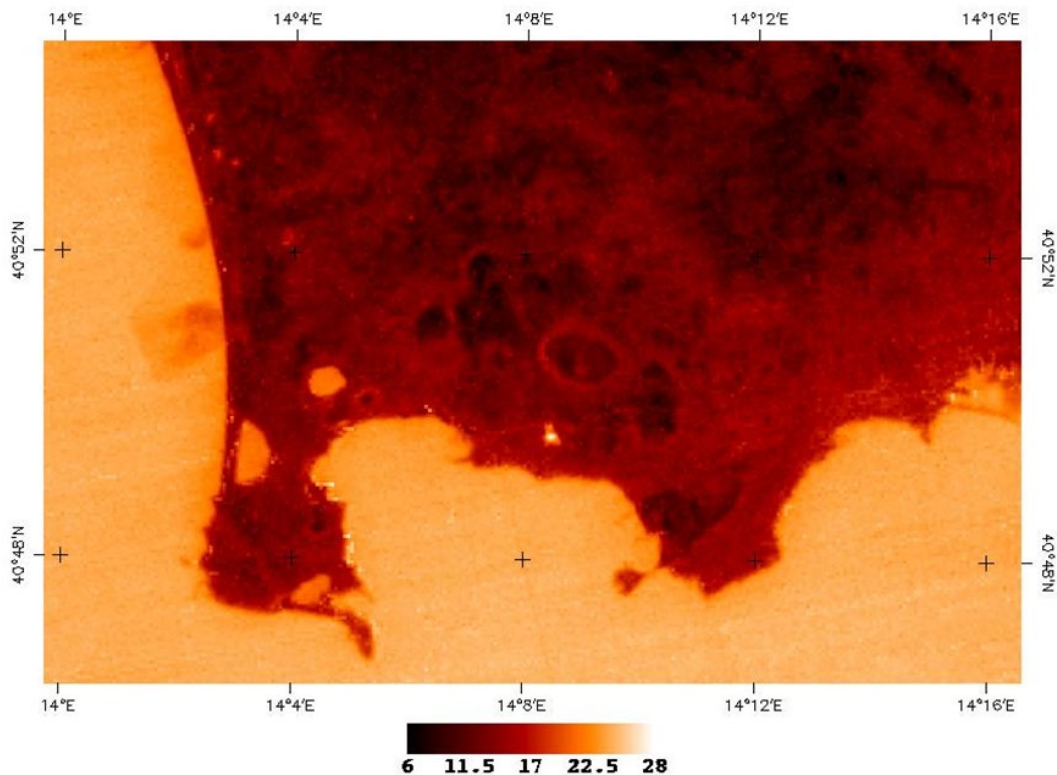


Figura 3.3.4 – Mappa di temperatura superficiale relativa al dato Landsat 8 acquisito alle 20.46 UTC del 29 ottobre 2024 (risoluzione 30 metri). La temperatura media all’interno della Solfatara è stimata intorno ai 23 °C.

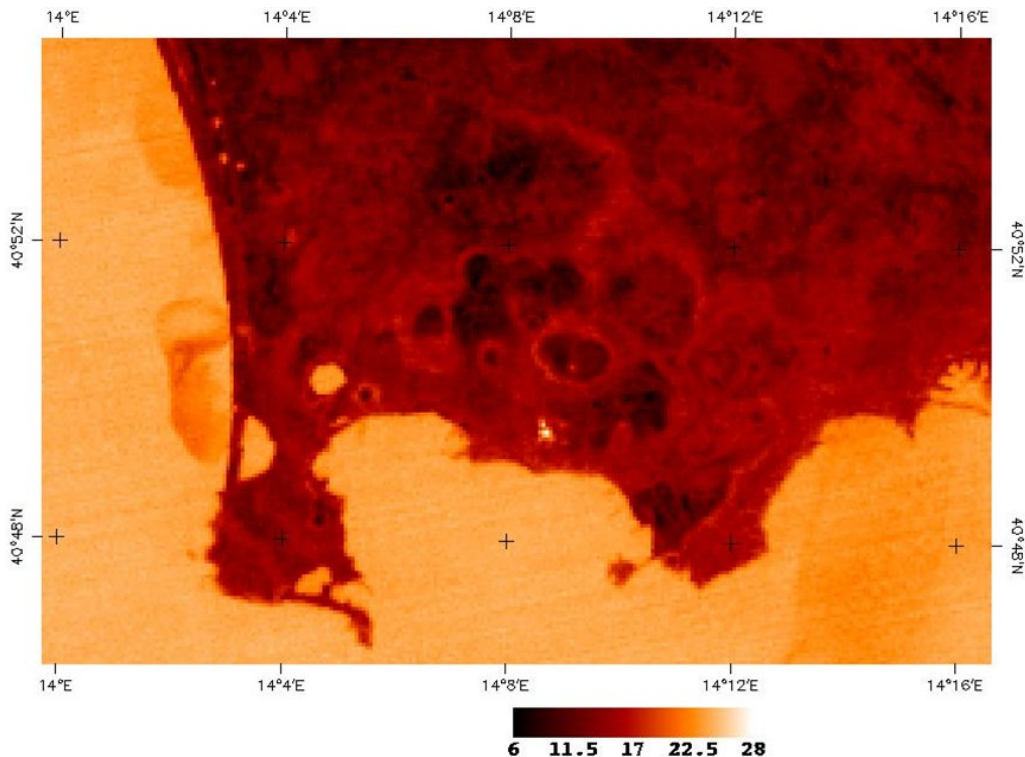


Figura 3.3.5 – Mappa di temperatura superficiale relativa al dato ASTER acquisito alle 20.29 UTC del 9 dicembre 2024 (l’immagine ASTER è stata riscalata ad una risoluzione di 30 metri per una migliore visualizzazione). La temperatura media all’interno della Solfatara è stimata intorno ai 15 °C.

In tali mappe, scelte come rappresentative del periodo gennaio-dicembre 2024, si osserva come la temperatura superficiale stimata dai dati ASTER e LANDSAT 8-9 nelle aree di maggiore emissione termica del Cratere della Solfatara (Bocca Nuova e Bocca Grande – Figura 3.3.6) e nell'area di Pisciarelli non si evidenziano variazioni significative, ad eccezione del periodo ottobre-novembre.



Figura 3.3.6 - Bocca Nuova (a destra dell'immagine) e Bocca Grande (a centro immagine).

4 – MONITORAGGIO GEOCHIMICO

S. Caliro¹, R. Avino¹, A. Carandente¹, E. Cuoco¹, C. Minopoli¹, F. Rufino¹, A. Santi¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

Le attività svolte dall'Osservatorio Vesuviano hanno riguardato il monitoraggio continuo e discontinuo dell'area craterica della Solfatara di Pozzuoli e della zona di Pisciarelli. Sono state inoltre potenziate le attività del monitoraggio multiparametrico delle acque della falda flegrea.

Lo studio delle composizioni chimico-isotopiche dei fluidi fumarolici, finalizzato alla stima delle condizioni termodinamiche dell'acquifero idrotermale, unitamente alla misura del processo di degassamento diffuso, forniscono importanti indicazioni per la valutazione della dinamica del sistema idrotermale-magmatico dei Campi Flegrei.

Le attività eseguite dall'Osservatorio Vesuviano hanno riguardato lo sviluppo e la manutenzione della rete di monitoraggio geochimico, che è costituita da quattro stazioni (Figura 4.1; Tabella 4.1), due delle quali sono multiparametriche del tipo "GEMMA" sviluppate e realizzate nell'ambito delle attività di ricerca tecnologica dell'Osservatorio Vesuviano, per l'acquisizione di parametri geochimici e ambientali correlati.

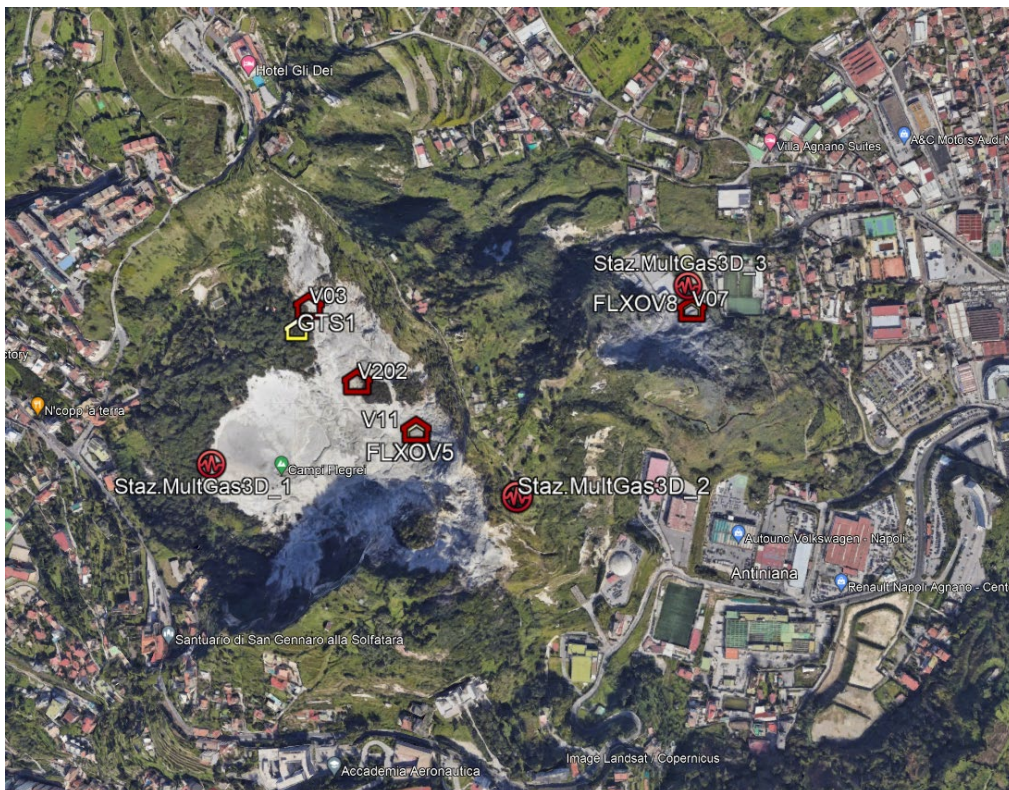


Figura 4.1 – Ubicazione delle stazioni della rete geochimica ai Campi Flegrei e dei siti dove sono eseguite le attività di monitoraggio geochimico. Sono riportate le stazioni geochimiche del tipo GEMMA (FLXOV5, FLXOV8) multiparametriche e le tre nuove stazioni per le misure multigas (CO₂, H₂S, SO₂, H₂O) e del vento, ubicate in area Solfatara-Pisciarelli. Per le principali fumarole della Solfatara (BG e BN) e di Pisciarelli, sono inoltre riportati i punti fissi di misura del flusso di CO₂ dal suolo e della temperatura del suolo in area Solfatara (simboli rossi) e in area Pisciarelli (simboli bianchi).

La stazione multiparametrica FLXOV5, installata in area cratere Solfatara, acquisisce in continuo il flusso di CO₂ dal suolo, la temperatura della fumarola principale, la pressione e la temperatura atmosferica e misure Multigas. La stazione multiparametrica FLXOV8, installata in area Pisciarelli, misura in continuo il flusso di CO₂ dal suolo, la temperatura della fumarola principale dell'area, oltre ad altri parametri per la misura del processo di degassamento. Le altre due stazioni FLXOV1 (dismessa e sostituita con la V03 a luglio 2022) per il monitoraggio in continuo del flusso di CO₂ dal suolo e la stazione GTS1 per la misura del gradiente termico del suolo, sono ubicate all'interno del cratere della Solfatara. Sono state installate 4 stazioni commerciali acquisite nei progetti infrastrutturali PON GRINT e POR PRESERVE, le stazioni sono in fase di test e sostituiranno per obsolescenza le stazioni del tipo GEMMA.

Le stazioni sono collegate via wi-fi con trasmissione dei dati in tempo reale alla Sala di Monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano. Le stazioni sono utilizzate per il monitoraggio operativo del processo di degassamento per fini di Protezione Civile.

Inoltre, sono state recentemente installate tre stazioni per misure multigas (CO₂, H₂S, SO₂, H₂O) e anemometriche triassiali. Questo potenziamento della rete fornirà parametri necessari alla modellazione della dispersione dei gas in atmosfera che sarà a breve implementata per la determinazione, in quasi real-time, del flusso di CO₂ emesso dall'intero sistema vulcanico-idrotermale. Le stazioni della rete del tipo GEMMA, il cui sviluppo è stato interrotto, saranno sostituite nel tempo da queste nuove stazioni dopo un adeguato periodo di test e affiancamento.

La Tabella 4.1 riassume le caratteristiche della Rete gestita dall'Osservatorio Vesuviano per il monitoraggio continuo dei parametri geochimici ai Campi Flegrei.

Tabella 4.1 – Rete Geochimica dei Campi Flegrei.

Stazione	Coordinate	Località	Anno di installazione	Parametri monitorati
V03 ex FLXOV1	40.8291N 14.1397E 103 m	Pozzuoli Solfatara	2022	Multiparametrica
FLXOV8	40.8292N 14.1473E 74 m	Agnano Pisciarelli	2007 Sostituisce la FLX03 Upgrade 2018	Multiparametrica
FLXOV5	40.8273N 14.1418E 105 m	Pozzuoli Solfatara	2014	Multiparametrica
GTS1	40.8291N 14.1397E 103 m	Pozzuoli Solfatara	2016	Gradiente termico nel suolo
V11	40.8273N 14.1418E	Pozzuoli Solfatara	2023	Multiparametrica, meteo, multigas
V202	40.8280N 14.1406E	Pozzuoli Solfatara	2023	Multiparametrica, meteo, multigas
V07	40.8291N 14.1472E	Pisciarelli	2022	Multiparametrica, meteo, multigas

MG-1	40.827692N 14.140049E	Pozzuoli Solfatara	2024	Multigas, meteo
MG-2	40.826431N 14.144109E	Pozzuoli Solfatara (Terrazzo)	2024	Multigas, meteo
MG-3	40.829353N 14.146830E	Agnano Pisciarelli	2024	Multigas, meteo

Le attività svolte dall'Osservatorio Vesuviano nell'area flegrea durante il 2024 sono di seguito riportate:

- Campagne mensili di campionamento dei gas fumarolici emessi dalla Solfatara di Pozzuoli e dalla zona dei Pisciarelli, analisi della composizione chimica (H₂O, CO₂, H₂S, H₂, Ar, N₂, CH₄, He e CO) ed isotopica (⁴⁰Ar/³⁶Ar, δ¹⁵N_{N2}, δ¹³C_{CO2}; δ¹⁸O_{CO2}, δ²H_{H2O}, δ¹⁸O_{H2O}).
- Campagne mensili di misura del flusso di CO₂ e della temperatura del suolo a 10 cm di profondità, in circa 60 punti fissi ubicati all'interno del cratere della Solfatara.
- Campagne mensili di misura dei flussi di CO₂ e della temperatura dal suolo su 28 punti fissi nella zona dei Pisciarelli.
- Monitoraggio continuo del flusso di CO₂ dal suolo, gradiente di temperatura nel suolo, temperatura fumarole, pressione differenziale, parametri meteorologici e misure Multigas tramite le stazioni automatiche FLXOV8 (ubicata a Pisciarelli), FLXOV1 e FLXOV5 (ubicata nel cratere della Solfatara); monitoraggio del gradiente termico del suolo nel cratere della Solfatara (stazione GTS1). Le nuove stazioni, in sostituzione, sono in fase di installazione/test operativo.
- Campagne estese di misura del flusso di CO₂ dal suolo nell'area Solfatara – Pisciarelli su un'area di circa 1.45 km²
- Campagne semestrali di monitoraggio della falda freatica, consistenti nel campionamento, analisi e caratterizzazione geochimica delle acque
- Monitoraggio continuo della temperatura, conducibilità elettrica e del livello delle acque della falda freatica, tramite la rete di stazioni installate in pozzi dell'area flegrea che è in fase di potenziamento con l'installazione di ulteriori stazioni multiparametriche di monitoraggio.

4.1 MISURE DI FLUSSO DI CO₂ E TEMPERATURA AL SUOLO

Le campagne mensili di misura del flusso di CO₂ dal suolo, su circa 60 punti fissi nel cratere della Solfatara, mostrano un andamento dei valori caratterizzato da una periodicità annuale, rientrando in un trend di aumento pluriennale a partire dal 2006 (Fig. 4.2). In particolare, le misure (~60 punti, Target area di Fig. 4.2a), sono state confrontate con i dati di flusso totale emesso dall'area di degassamento, misurato nelle campagne estese eseguite fino al 2016 (~400 misure per campagna, Cardellini et al., 2017), successivamente sospese per le note difficoltà di accesso all'area del cratere della Solfatara e solo recentemente riprese. La correlazione tra i valori di flusso misurati nell'area target e l'area estesa, ha permesso di stimare un valore medio del flusso dell'intera area di degassamento (Chiodini et al., 2021) in ~3000 t/d nel 2021 (Fig. 4.2b). Nel 2024 i valori stimati per l'intera area hanno raggiunto ~5000 t/d, valori paragonabili al flusso medio di CO₂ nel plume di vulcani attivi a degassamento persistente.

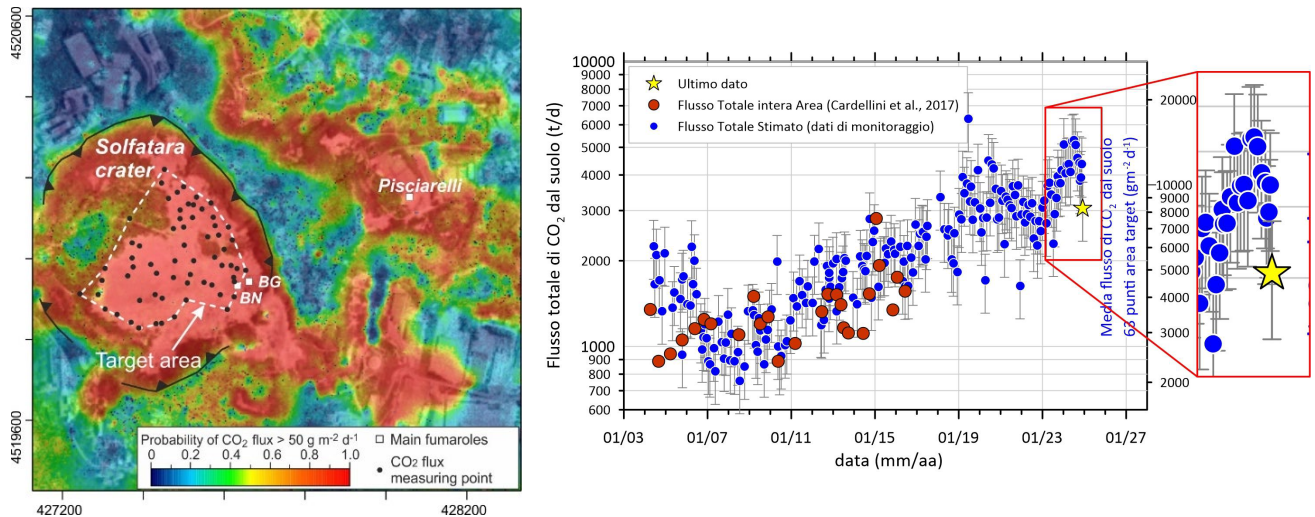


Figura 4.2 - a) Mappa dell'area di degassamento diffuso della Solfatara-Pisciarelli (Cardellini et al., 2017), con l'ubicazione dell'area target; b) Cronogramma dei flussi di CO₂, i punti blu si riferiscono all'emissione dall'area target scalati sull'intera DDS, ottenuta dal confronto con i dati delle 30 campagne estese (simboli rossi) in Cardellini et al. (2017).

Analogamente, la media delle temperature del suolo, misurate a 10 cm di profondità, mostra un chiaro andamento stagionale sovrainposto a un trend d'aumento della temperatura (Fig. 4.3), con un incremento del valore medio delle temperature misurate di oltre 8 °C nel periodo 2002-2024, anche se negli ultimi anni il trend non risulta essere più così marcato.

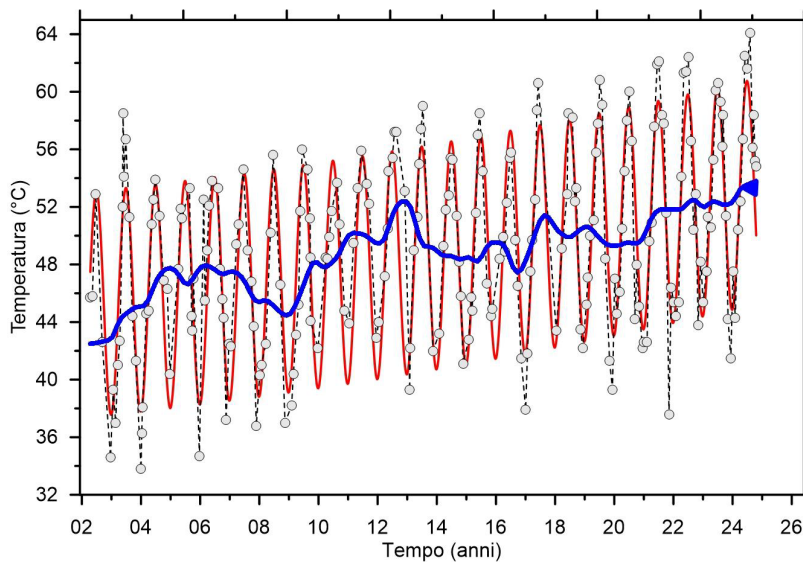


Figura 4.3 - Cronogramma della media delle temperature del suolo (a 10 cm di profondità) misurate su circa 60 punti fissi nell'area craterica della Solfatara. Va evidenziato l'incremento del valore medio nel periodo 2002-2021 di oltre 6 °C. Il trend depurato dalla componente stagionale, mediante l'utilizzo dell'algoritmo di destagionalizzazione STL (Seasonal-Trend decomposition based on Loess, Cleveland et al., 1990), è riportato con la linea blu.

Nella mappa di Figura 4.4a è riportato l'incremento di temperatura espresso 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 mentre 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. 4.4b).

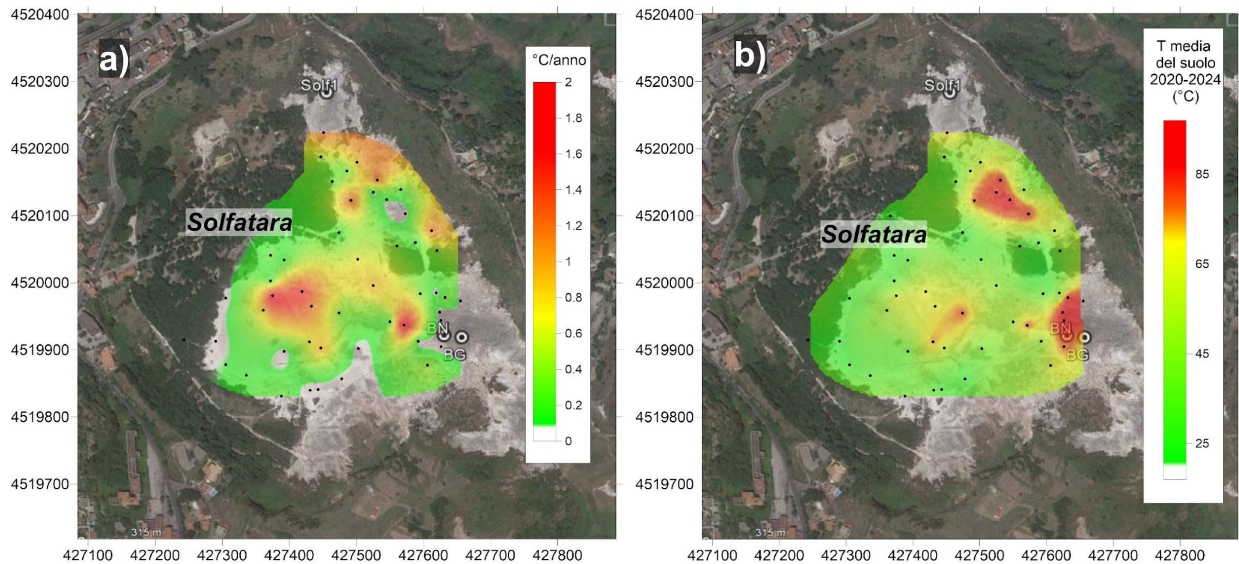


Figura 4.4 - a) Mappa dell'incremento di temperatura in °C/anno calcolato per ogni punto misurato a partire dal 2002. L'incremento di temperatura interessa diffusamente tutta l'area craterica con un massimo nella zona centrale. L'incremento di temperatura non interessa le aree delle fumarole e del bordo 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 2020 al 2024).

Utilizzando queste variazioni di temperatura è possibile stimare un incremento del flusso di calore e quindi dell'energia rilasciata dall'area di circa il 20%. Tale processo di riscaldamento è evidenziato anche da misure analoghe, di flusso di CO₂ dal suolo e temperatura del suolo, eseguite periodicamente su 25 punti fissi nell'area di Pisciarelli. In Figura 4.5a è riportata la media delle temperature del suolo, misurate a 10 cm di profondità, che dal 2009 mostra un rilevante trend d'aumento, con un incremento del valore medio di circa 6 °C.

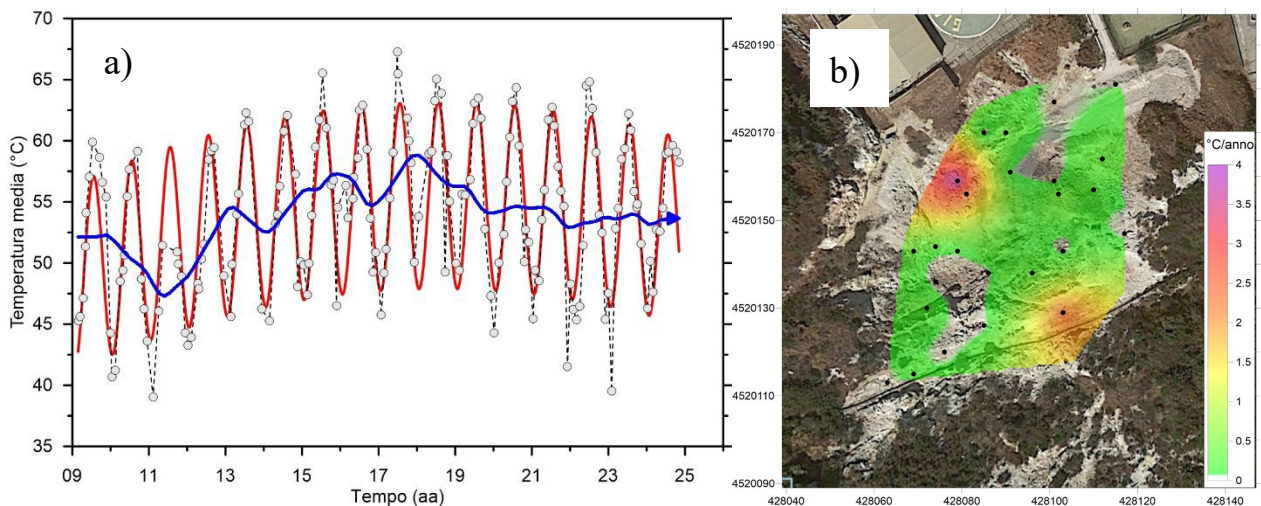


Figura 4.5 - a) Cronogramma della media delle temperature del suolo (a 10 cm di profondità) misurate su 25 punti fissi nell'area di Pisciarelli dal 2009. Il trend destagionalizzato, mediante l'utilizzo dell'algoritmo di destagionalizzazione STL (Seasonal-Trend decomposition based on Loess, Cleveland et al., 1990), è riportato con la linea blu. b) Mappa dell'incremento di temperatura in °C/anno calcolato per ognuno dei 25 punti misurati a partire dal 2009. L'incremento di temperatura interessa tutta l'area indagata con le zone di maggiore riscaldamento legate a processi di fumarolizzazione locale.

Nella mappa di Figura 4.5b, dove è riportata la distribuzione areale dell'incremento annuo di temperatura, si nota oltre ad un aumento diffuso delle temperature in tutta l'area indagata la presenza di zone a maggiore riscaldamento legate a processi di fumarolizzazione locale. Negli ultimi anni, a partire dal 2022, l'incremento di temperatura risulta essere meno marcato.

La stazione multiparametrica FLXOV5, attiva dal dicembre 2014 e installata a pochi metri dalla fumarola BG nel cratere della Solfatara, ha misurato un significativo aumento del flusso di CO₂ dal suolo, a partire dal febbraio 2016 (Fig. 4.6). Tale aumento del flusso di CO₂, che ha mostrato valori di ~ 300 kgm⁻²d⁻¹, è da mettere in relazione all'evidente processo di fumarolizzazione dell'area. È da evidenziare nei periodi il significativo aumento di temperatura della fumarola BG. La stazione sarà sostituita, con una stazione del nuovo tipo che andrà a potenziare la rete di monitoraggio geochimico, dopo un sufficiente periodo di test e di affiancamento in situ.

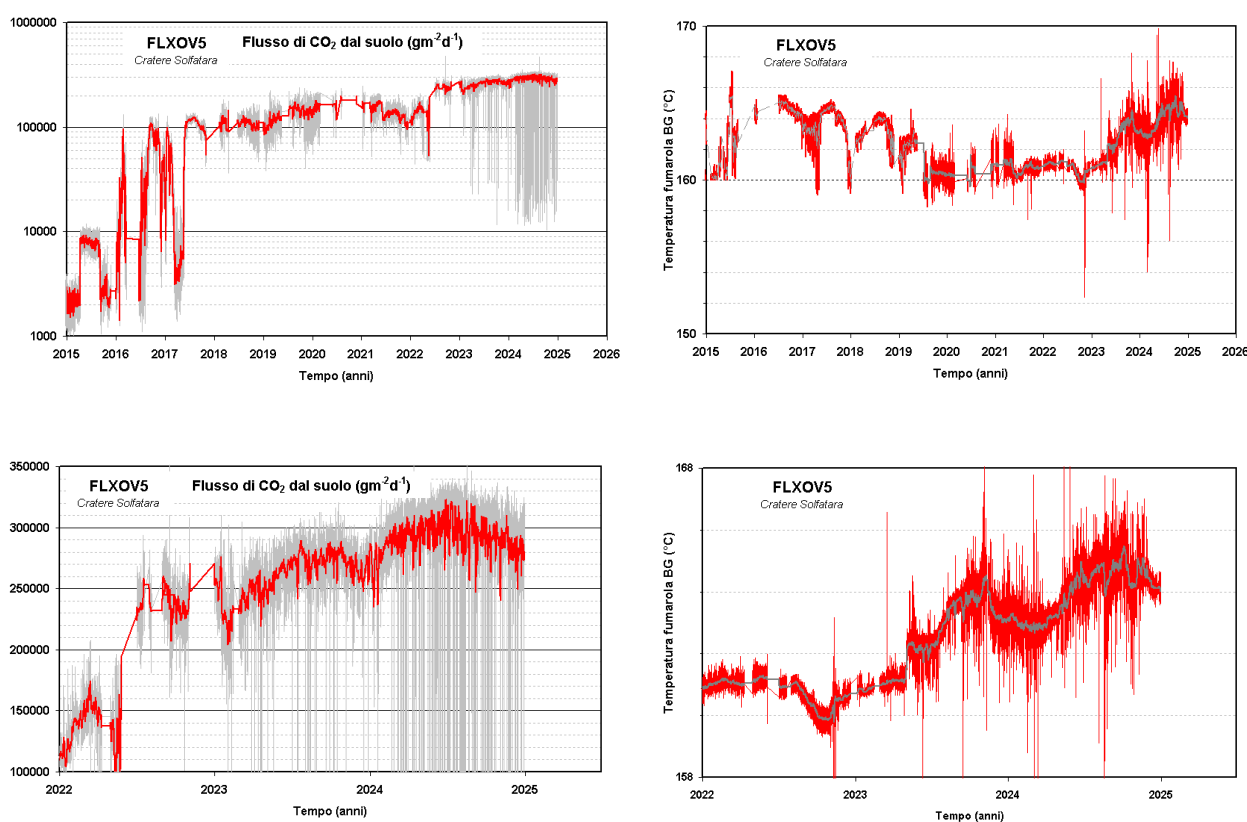


Figura 4.6 - Valori del flusso di CO₂ dal suolo misurati dalla stazione FLXOV5 installata nel cratere della Solfatara (area fumarole, la linea rossa si riferisce alle medie giornaliere). I flussi di CO₂ dal suolo mostrano, in generale, un significativo incremento a partire dal 2016.

In Figura 4.7 è riportato il cronogramma del flusso di CO₂ registrato dalla stazione FLXOV8 (Pisciarelli) a partire dal 2007. I dati hanno mostrato un andamento del flusso di CO₂ caratterizzato da una periodicità annuale con picchi positivi durante la stagione invernale e bassi valori durante quella estiva. Dal 2010 è iniziato un periodo di forte aumento dei flussi. L'intervento di riparazione della stazione, effettuato nel mese di novembre 2016, per il ripristino del 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, ma caratterizzati da un simile trend d'aumento.

La stazione FLXOV1 è stata dismessa e sostituita da una nuova stazione del nuovo tipo di stazioni acquisite sui progetti infrastrutturali PON GRINT e POR Preserve.

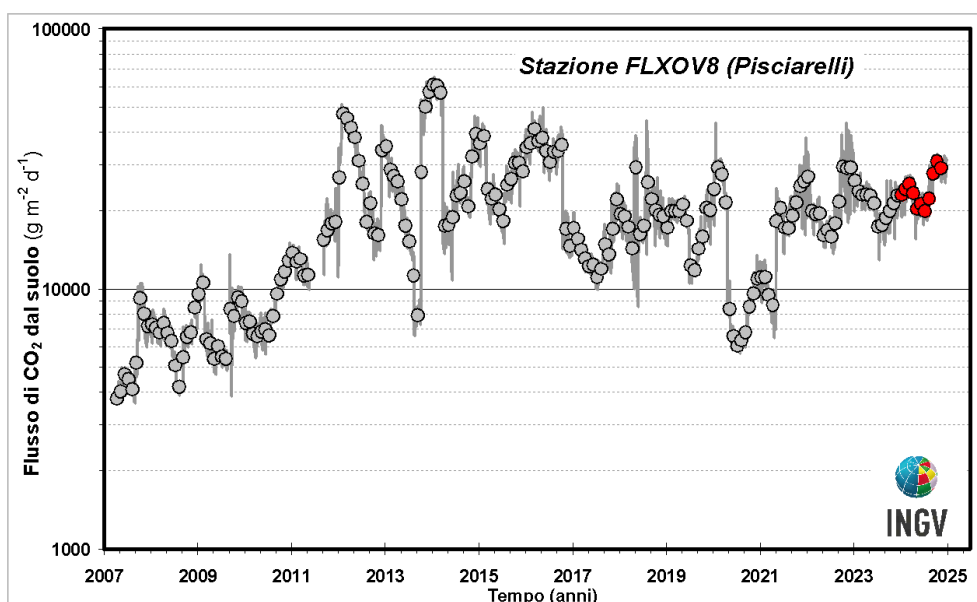


Figura 4.7 - Medie giornaliere (linea) e medie mensili (cerchi) dei flussi di CO₂ dal suolo misurati a Pisciarelli (FLXOV8). I flussi di CO₂ mostrano, in generale, un significativo incremento a partire dal 2010. In rosso sono evidenziate le medie mensili dei valori del 2024.

4.2 COMPOSIZIONE CHIMICA DELLE FUMAROLE DELL'AREA FLEGREA

Una dettagliata descrizione del modello geochimico interpretativo del sistema idrotermale della Solfatarà, 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; 2015b; 2016), ai quali si rimanda per approfondimento.

L'analisi temporale delle variazioni della composizione dei gas delle fumarole BG, BN e Pisciarelli, suggerisce le seguenti considerazioni.

Il rapporto CO₂/H₂O delle fumarole, in aumento a partire dal 2000 (Fig. 4.8), nel periodo di interesse è rimasto su valori elevati che, in generale, testimoniano un'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 nel sistema idrotermale), possano contribuire all'aumento del rapporto CO₂/H₂O (Chiodini et al., 2015a; 2016). Inoltre, è possibile che una frazione della CO₂ emessa dalle fumarole sia prodotta, in seguito all'aumento di temperatura, da reazioni che coinvolgono la calcite di origine idrotermale presente nel sistema (Chiodini et al., 2015b; Buono et al., 2023).

I geo-indicatori gassosi suggeriscono un significativo aumento nel tempo della temperatura e della pressione delle parti più superficiali del sistema idrotermale (Chiodini et al., 2011; 2015a; 2016).

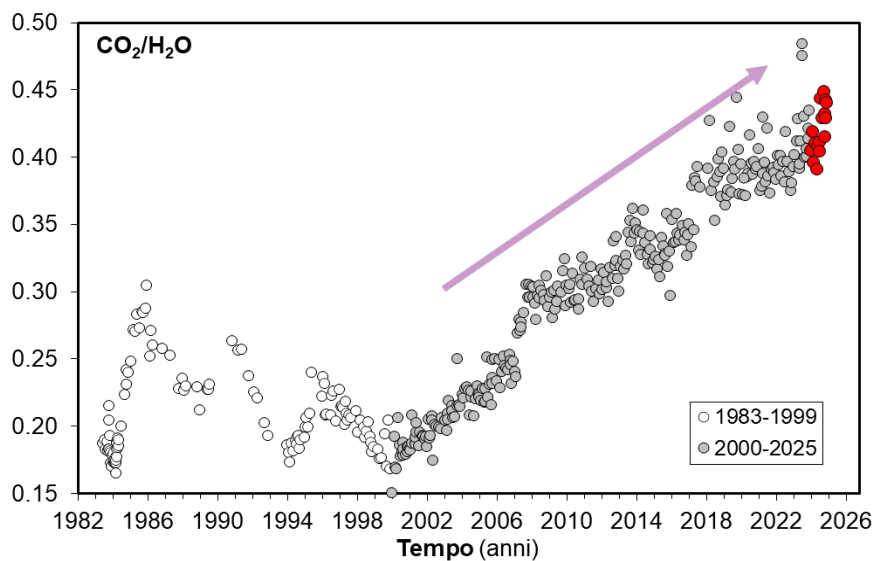
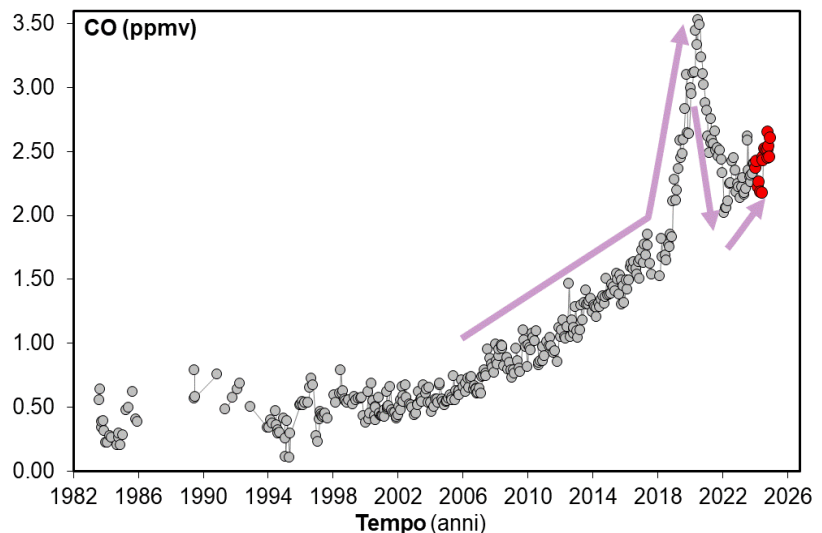


Figura 4.8

Cronogramma del rapporto CO_2/H_2O per la fumarola BG. In grigio sono riportati i dati a partire dal 2000, quando è iniziato un trend d'aumento del rapporto CO_2/H_2O , in generale, indicativo di una crescente frazione della componente magmatica nei fluidi fumarolici. In rosso sono evidenziati i campioni del 2024.

Tali stime sono basate principalmente sulle concentrazioni relative di monossido di carbonio (CO) nei fluidi fumarolici, che a partire dal 2000 mostrano un ben definito trend d'aumento, tuttora in corso e particolarmente marcato a partire dai campioni del 2018, trend che ha raggiunto un massimo nel luglio 2020 per poi invertirsi per i campioni fino ai primi mesi del 2022 (fumarola BG, Fig. 4.9). I campioni degli ultimi mesi mostrano un nuovo lieve aumento.

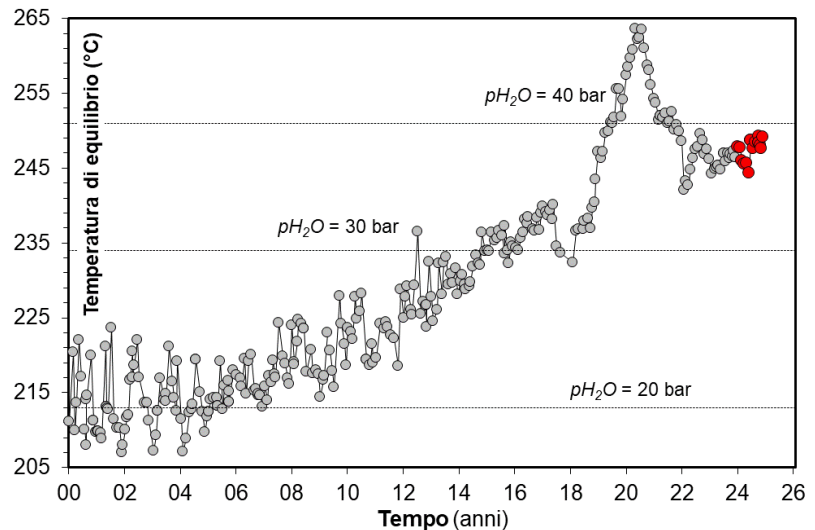
Figura 4.9 – Variazioni della concentrazione di monossido di carbonio (CO) misurato alla fumarola BG a partire dal 1983. In rosso sono evidenziati i campioni del 2024. In generale alti contenuti di CO caratterizzano sistemi vulcanici a elevata temperatura mentre fumarole alimentate da sistemi idrotermali mostrano concentrazioni più basse, in tali sistemi un aumento delle concentrazioni di CO può riflettere un incremento delle condizioni di temperatura e pressione.



Tale incremento è comunque 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_{O_2} in molti dei sistemi idrotermali del mondo, il trend del CO corrisponderebbe a un aumento di temperatura di circa 35 °C dagli inizi degli anni 2000 (T circa 215°C) a oggi (T circa 250°C) raggiungendo un massimo (T circa 263°C) nel 2018 (Fig. 4.10). Tale variazione suggerisce un comportamento simile a quanto verificatosi nel 2017, quando dopo una iniziale diminuzione delle concentrazioni di CO, probabilmente legata a un input di fluidi ossidanti magmatici, è seguito un successivo aumento delle concentrazioni e delle temperature stimate.

Figura 4.10 - 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. In rosso sono evidenziati i campioni relativi al 2024.



Tale processo di riscaldamento del sistema flegreo e le possibili cause sono trattate in modo approfondito nei seguenti lavori scientifici Chiodini et al. (2015a; 2016; 2021) a cui si rimanda per ulteriori dettagli.

Il rapporto CO₂/CH₄, le cui variazioni nel tempo sono state interpretate come episodi di iniezione di fluidi magmatici, ossidanti e poveri in CH₄, nel sistema idrotermale (Chiodini 2009; 2012), ha mostrato negli ultimi anni la fase discendente di un picco fino al 2020 (Fig. 4.11). I picchi positivi del rapporto CO₂/CH₄ (Fig. 4.11) sono stati interpretati come l'arrivo in superficie dei fluidi coinvolti in episodi di degassamento magmatico avvenuti circa un anno prima. Per una miglior comprensione del modello qui sopra accennato, si rimanda a specifici lavori scientifici (Chiodini et al., 2012; 2016).

Dalla fine del 2020 è iniziato un nuovo moderato trend d'aumento del rapporto CO₂/CH₄ sul quale è possibile riconoscere due picchi minori con i massimi ad aprile 2021 e marzo 2022. La persistenza di un basso valore del rapporto CO₂/CH₄ (i.e. elevate concentrazioni di CH₄) contemporaneamente all'aumento della concentrazione del monossido di carbonio e dell'idrogeno, evidenzia una variazione del comportamento del sistema idrotermale in risposta a un'iniezione di fluidi magmatici, rispetto a quanto mostrato nei periodi precedenti. I fluidi emessi dal sistema idrotermale, nel periodo 2018-2021 e da marzo a settembre 2022 mostrano caratteristiche più riducenti. Differenti processi possono causare condizioni riducenti nel sistema idrotermale. I campioni del 2023 confermano il trend generale di aumento del rapporto CO₂/CH₄.

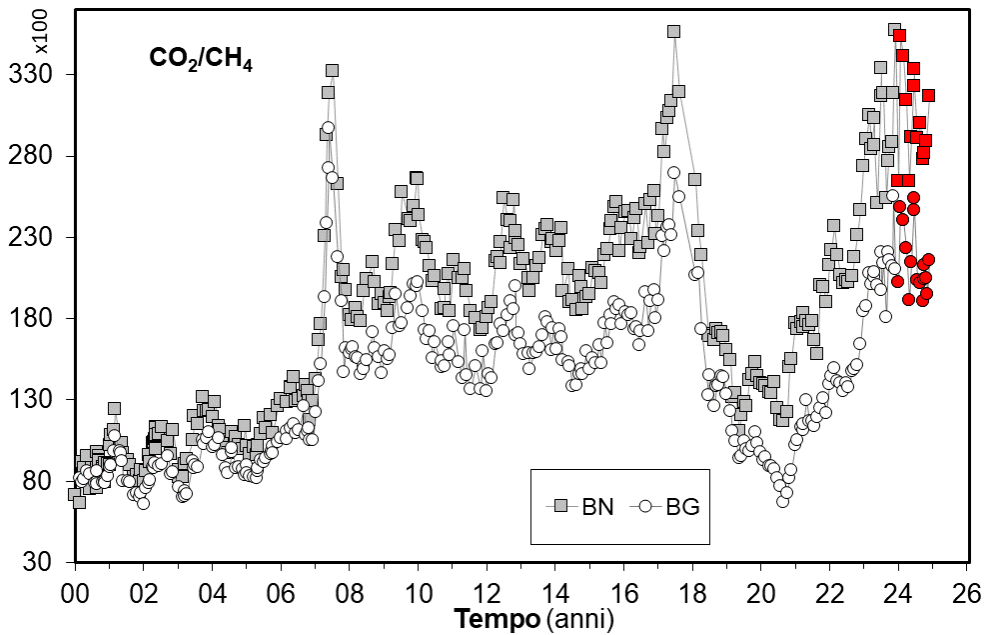


Figura 4.11 - Variazioni del rapporto CO_2/CH_4 per le fumarole BG e BN a partire dal 2000. I picchi nel rapporto, registrati in superficie con circa un anno di ritardo, evidenziano episodi di degassamento magmatico occorsi ai Campi Flegrei (Chiodini et al., 2012). In rosso sono evidenziati i campioni del 2024.

I rapporti N_2/CO_2 e N_2/He , che avevano mostrato una rilevante variazione a partire dal 2000 (Chiodini et al., 2010), ma più in generale dai primi dati disponibili (1985), nel periodo di interesse (2023) rientrano nel trend di diminuzione già identificato (Fig. 4.12). Tali variazioni sono state interpretate come compatibili con un processo di degassamento di un magma, di composizione primitiva, a pressioni decrescenti nel tempo. Tali interpretazioni sono state oggetto di lavori scientifici (Caliro et al., 2014; Buono et al., 2023), ai quali si rimanda per un approfondimento dei modelli di degassamento magmatico utilizzati e dei possibili scenari del plumbing system dei Campi Flegrei.

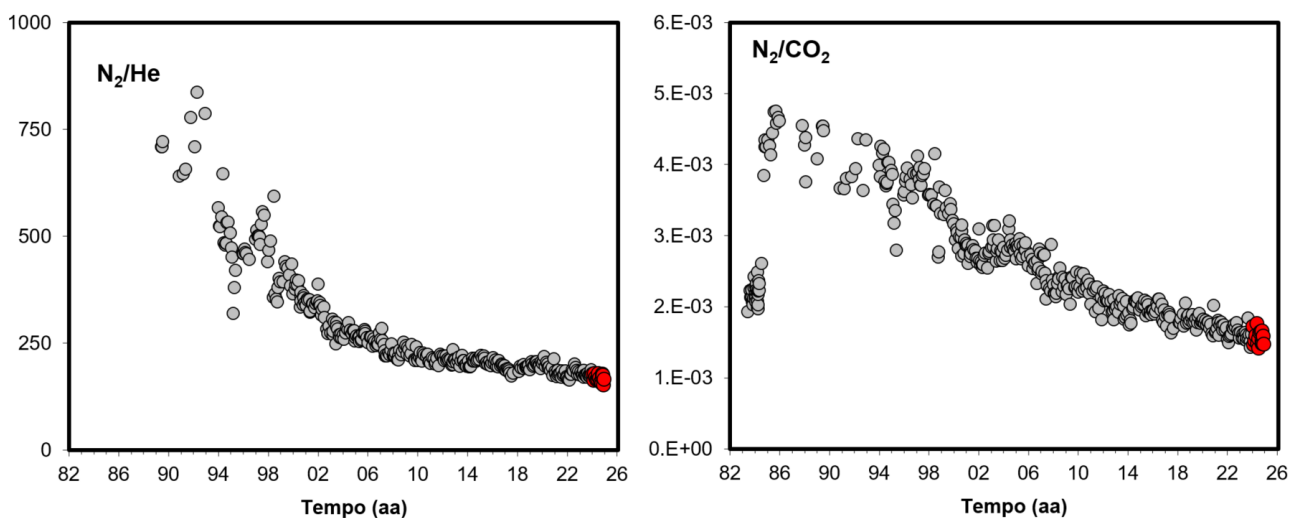


Figura 4.12 - Cronogramma dei rapporti N_2/CO_2 e N_2/He relativi alla fumarola BG. In rosso sono evidenziati i campioni del 2024, che confermano i trend di diminuzione già identificati.

Il processo di degassamento così individuato comporterebbe nel tempo (indipendentemente dal modello di degassamento magmatico utilizzato, Chiodini et al., 2016), congiuntamente alle variazioni dei rapporti N_2/CO_2 e N_2/He , anche una diminuzione del rapporto CO_2/H_2O nel gas rilasciato dal magma (Chiodini et al., 2015a; 2016; Buono et al., 2023). Questo risultato è stato considerato, come ulteriore raffinamento, nel modello fisico-numerico del sistema idrotermale già riportato in Chiodini et al., 2012. I risultati di questo nuovo modello, considerando un rapporto CO_2/H_2O non costante ma in diminuzione nel tempo, in accordo con il modello di degassamento magmatico (Chiodini et al., 2016), mostrano come a partire dal 2000 siano necessari input di gas magmatici più ravvicinati nel tempo e con quantitativi di fluidi sempre più elevati per spiegare le variazioni composizionali osservate nei fluidi fumarolici. Questo risultato è in accordo col precedente modello (Chiodini et al., 2012), ma i quantitativi di fluidi iniettati alla base del sistema idrotermale durante la simulazione, nonché l'energia ad essi associata, risultano notevolmente maggiori. In Figura 4.13 è riportata la curva cumulativa dei quantitativi di fluidi iniettati alla base del sistema idrotermale durante la simulazione 1 (con CO_2/H_2O fisso a 0.67, Chiodini et al., 2012) e la simulazione 2 (con CO_2/H_2O variabile da 0.67 a 0.22, Chiodini et al., 2016). Dall'analisi del cronogramma sono distinguibili due periodi: il primo, dal 1984 fino al 2000, è caratterizzato da una diminuzione nel tempo delle quantità di fluidi iniettati nel sistema; il secondo, iniziato nel 2000 e ancora attivo, è caratterizzato dall'aumento progressivo nel tempo delle quantità di fluidi magmatici che entrano nel sistema idrotermale e dall'aumento della frequenza di tali eventi.

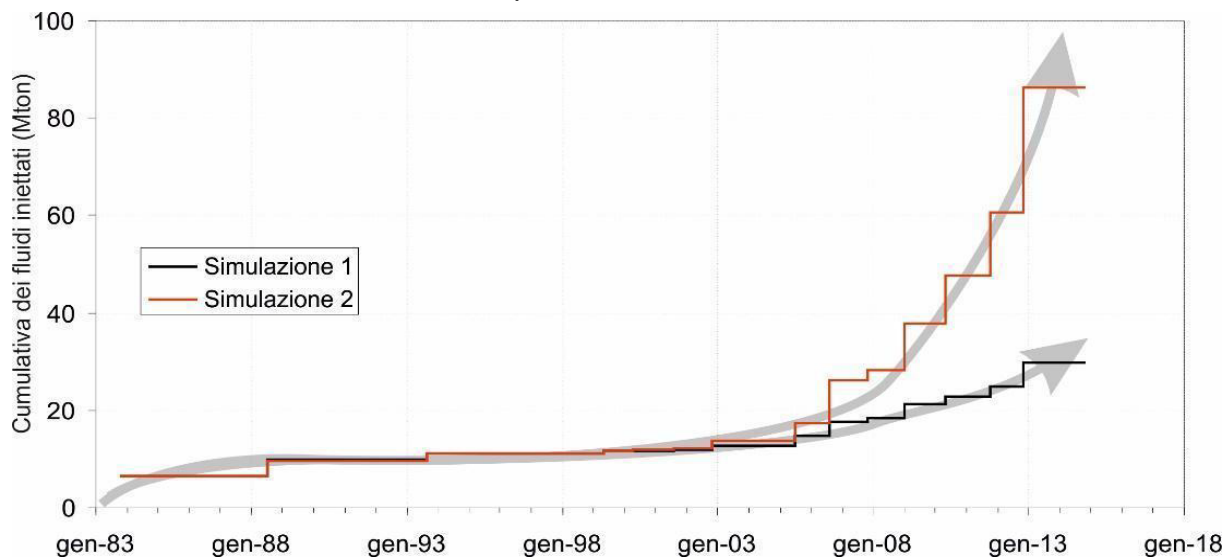


Figura 4.13 - Curve cumulative delle quantità di fluidi magmatici iniettate nel sistema idrotermale dei Campi Flegrei riferite alla simulazione 1 (Chiodini et al., 2012) e alla simulazione 2 (Chiodini et al., 2016). Per maggiori dettagli vedi il testo e i lavori citati.

4.3 VARIAZIONI MACROSCOPICHE DELL'AREA DI PISCIARELLI

Il processo di riscaldamento e pressurizzazione della parte più superficiale del sistema idrotermale, evidente a partire dal 2007 (Chiodini et al., 2011) e tuttora in corso, è presumibilmente la causa delle variazioni macroscopiche dell'attività di degassamento osservate a Pisciarelli, 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. 4.14), nell'aumento dei flussi misurati in continuo dalla stazione FLXOV8 (Fig. 4.7). L'incremento del processo di degassamento dell'area è altresì supportato da recenti misure del flusso di CO₂ emesso dalle fumarole (Tamburello et al., 2019), misure effettuate nell'ambito di un progetto di potenziamento e di sviluppo di tecniche di monitoraggio dell'attività idrotermale dell'area di Pisciarelli (DPC-INGV All. B2 2019-2021, WP2-Task3).

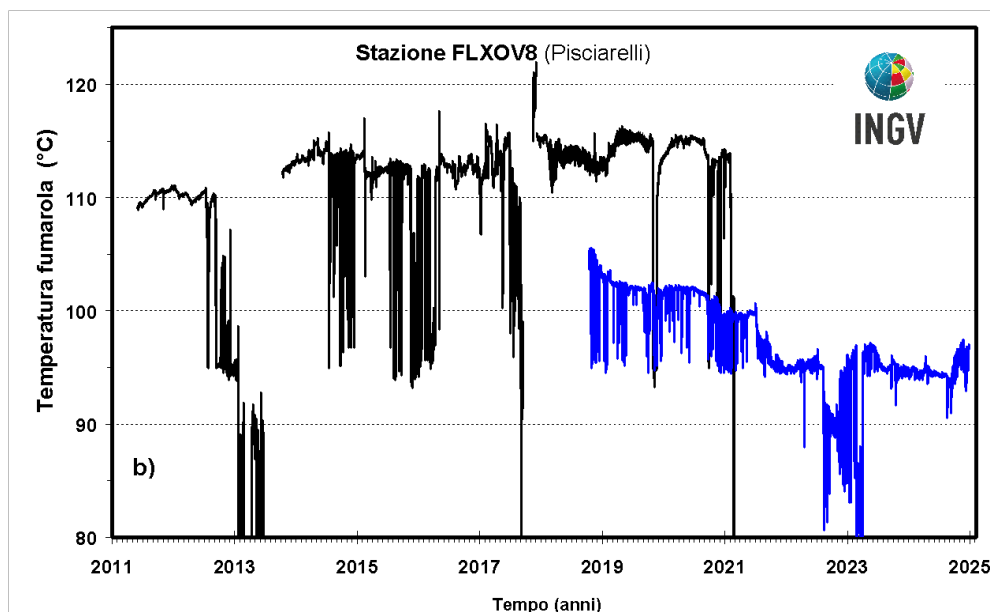


Figura 4.14 - Temperature della fumarola di Pisciarelli registrate in continuo dalla stazione FLXOV8. Con la linea blu sono riportati i valori di temperatura misurati in continuo, a partire dal mese di ottobre 2018, in un'altra emissione fumarolica nell'area di Pisciarelli sita a pochi metri di distanza dalla fumarola principale. 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.

L'attività di degassamento è anche indicata dalla misura in continuo della concentrazione di CO₂ in aria (Fig. 4.15) che, unitamente ad altri parametri (RSAM), risulta essere strettamente correlata all'intensità dell'attività idrotermale (Chiodini et al., 2017, Giudicepietro et al., 2019; 2020). La serie temporale di concentrazione di CO₂ in aria (registrata con frequenza bioraria dalla stazione geochimica FLXOV8) mostra un significativo aumento nel tempo delle concentrazioni, (come medie mensili) da ~1000 ppm nel 2012, fino a ~3000 ppm negli ultimi periodi, con un massimo di ~5000 ppm registrato nei periodi gennaio- marzo 2019 e gennaio- marzo 2020. Analogamente, l'ampiezza del tremore fumarolico (RSAM) mostra a partire dal 2013 un rilevante aumento nel tempo.

In particolare la stazione FLXOV8, oltre alle misure del flusso di CO₂ dal suolo e le temperature delle emissioni principali dell'area, ha misurato anche i parametri (proxy) per la stima del flusso di CO₂ emesso dalle fumarole (Chiodini et al., 2017; Tamburello et al., 2019; Giudicepietro et al., 2019; 2020) e/o utilizzabili con l'ausilio di modelli di dispersione dei gas (concentrazioni di CO₂, H₂S, SO₂, direzione e intensità del vento a differenti altezze dal suolo) per la stima del flusso totale emesso dalle fumarole e dal degassamento diffuso (Massaro et al., 2022).

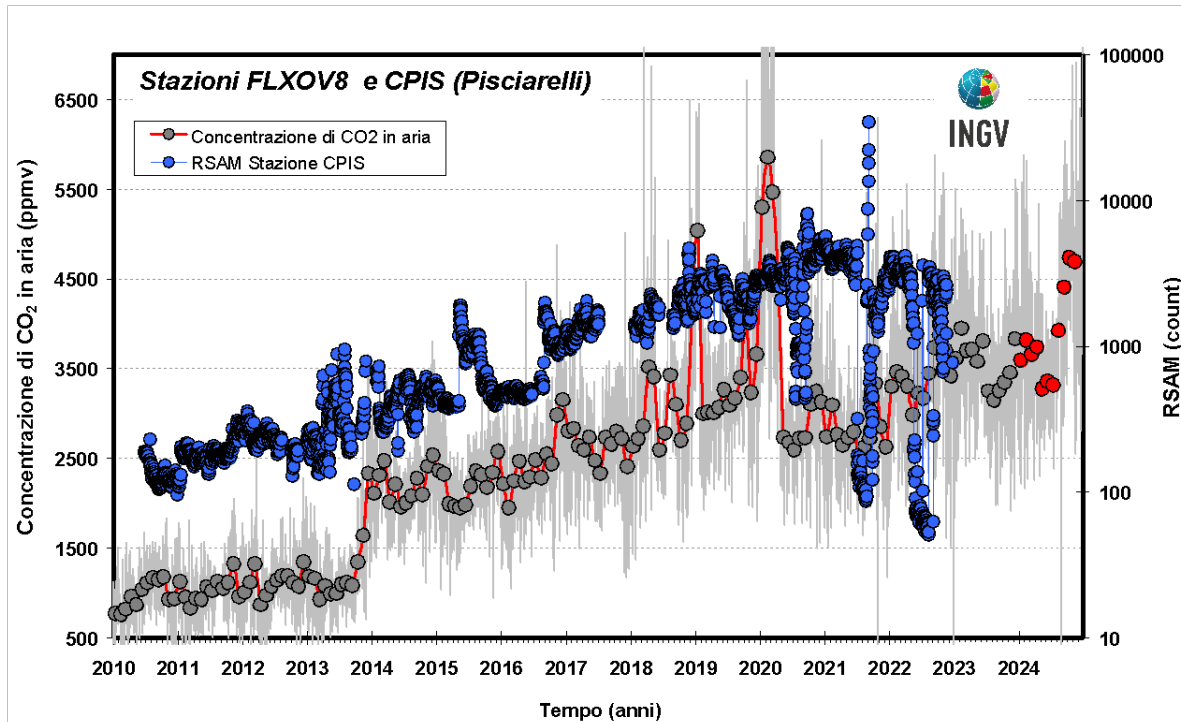


Figura 4.15 - Cronogramma delle medie giornaliere (linea) e medie mensili (cerchi) della concentrazione di CO₂ registrata in aria con frequenza bioraria dalla stazione geochimica per la misura del flusso di CO₂ dal suolo di Pisciarelli (FLXOV8). Nel cronogramma è riportata anche la serie temporale dell'ampiezza del tremore fumarolico su base giornaliera registrata dalla stazione CPIS, installata a pochi metri dalla fumarola principale. Questi parametri risultano strettamente correlati tra di loro e all'intensità dell'attività idrotermale (Chiodini et al., 2017, Giudicepietro et al., 2019). È da evidenziare il continuo trend d'aumento nel tempo delle concentrazioni di CO₂ in aria e dell'ampiezza del tremore fumarolico sin dal 2013. In rosso sono evidenziati i campioni del 2024, che un trend in aumento per gli ultimi campioni.

La direzione media del vento misurata dalla stazione mostra una maggiore frequenza dal settore N-NE, dove vengono raggiunte anche le massime intensità (Fig. 4.16). Questa indicazione prevalente evidenzia una sostanziale differenza con la direzione S-SW dei venti predominanti nell'area (dati meteo, Campania), indicando che la circolazione locale dei venti risulta essere fortemente controllata dalla topografia; pertanto, la sua caratterizzazione rappresenta un elemento fondamentale per la stima del flusso di gas emesso con i modelli di dispersione del plume. La frequenza della direzione e intensità del vento non ha mostrato significative variazioni, considerando i valori medi nei diversi anni di funzionamento (dal 2018 al 2022, Fig. 4.16).

La direzione azimutale delle principali emissioni fumaroliche e della polla, rispetto alla posizione della stazione FLXOV8 è compresa tra ~N225° e ~N280°. Questo settore di provenienza del vento è anche quello che mostra le più elevate concentrazioni di CO₂ misurate in aria (Fig. 4.16), in accordo alla posizione relativa della stazione rispetto alle manifestazioni principali di emissione di CO₂. Anche le concentrazioni di CO₂ misurate in aria provenienti dagli altri settori, sebbene caratterizzate da valori più bassi, non sono trascurabili essendo in media circa il doppio della concentrazione atmosferica, questa caratteristica suggerisce il probabile contributo di emissioni secondarie o diffuse dal suolo nell'area.

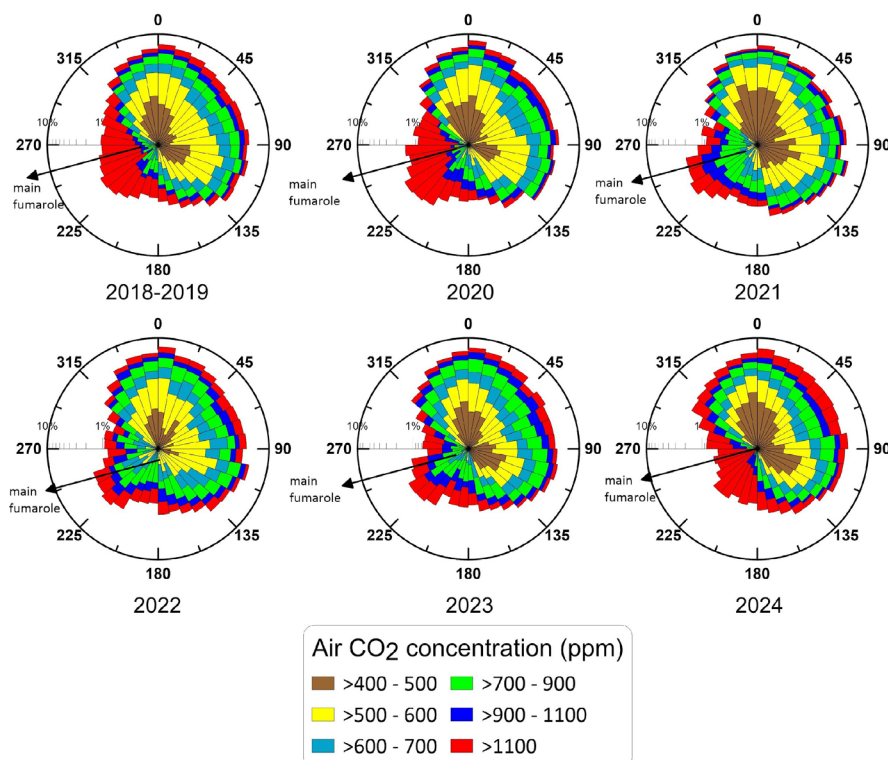


Figura 4.16 - Diagrammi di frequenza polari della direzione del vento e della concentrazione di CO₂ registrati dalla stazione FLXOV8 installata a Pisciarelli da ottobre 2018. I diagrammi si riferiscono ai dati acquisiti dall’anemometro posto a ~4.0 m dal suolo che non mostrano variazioni di frequenza e intensità del vento significative considerando i diversi anni di funzionamento, mentre è da mettere in evidenza la diminuzione della concentrazione media misurata nel tempo dal 2018 al 2022, dal 2023 la concentrazione media in aria è aumentata nuovamente. La scala di frequenza è logaritmica.

Sebbene la frequenza della direzione e intensità del vento non abbiano mostrato significative variazioni, la concentrazione di CO₂ misurata in aria evidenzia una significativa diminuzione dei valori misurati nel tempo dal 2018 al 2022 (Fig. 4.16), che unitamente alla diminuzione delle temperature delle emissioni fumaroliche (temperatura di circa 95 °C per entrambe le fumarole monitorate) suggerisce una stabilità se non una diminuzione dell’attività di degassamento nell’area di Pisciarelli. Nel 2024 si conferma l’inversione del trend di diminuzione della concentrazione di CO₂ in aria, evidenziato nel 2023, con un aumento del valore medio registrato.

4.4 POTENZIAMENTO RETE GEOCHIMICA

Le stazioni multiparametriche V03, V202, V11 e V202 (Fig. 4.1) installate a partire dal 2022 nel cratere della Solfatara e nell’area di Pisciarelli hanno funzionato correttamente mostrando una buona affidabilità, sebbene con alcune interruzioni legate a problemi tecnici. I dati di flusso di CO₂ dal suolo e delle temperature misurate al suolo acquisite da questa nuova rete sono riportati nelle Figs. 4.17 e 4.18.

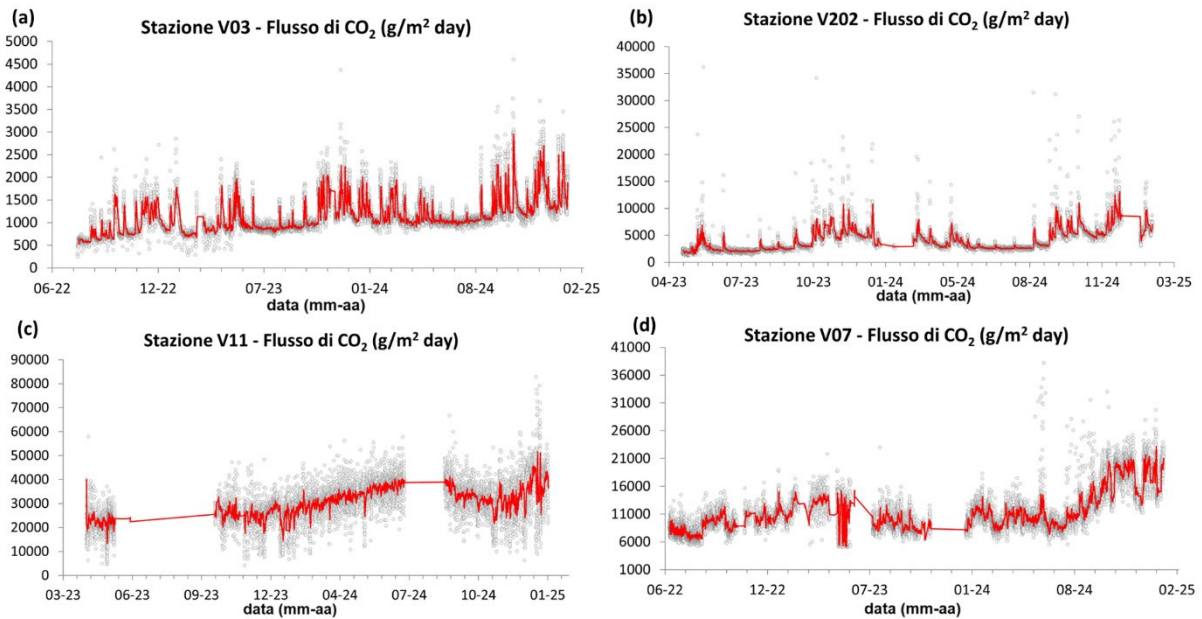


Figura 4.17 - Serie temporali del flusso dal suolo di CO₂; media mobile a 24h indicata dalla linea rossa. Non sono evidenti variazioni significative per tale parametro ad eccezione del sito di Pisciarelli (V07) dove si evidenzia un aumento progressivo del flusso di CO₂ a partire dal mese di agosto 2024.

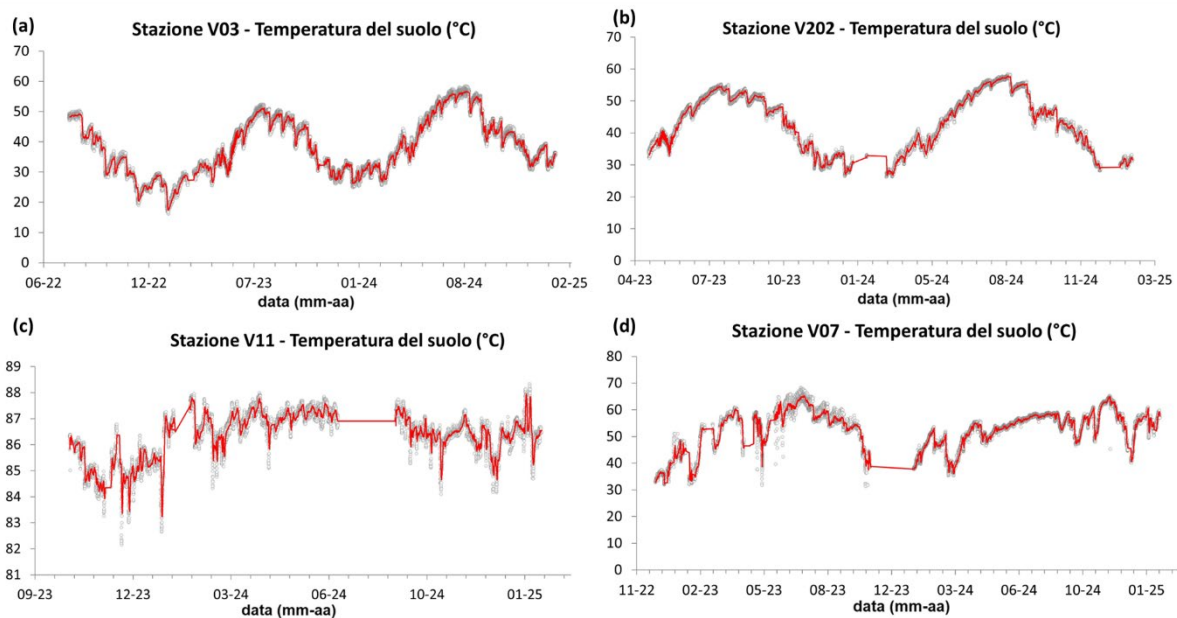


Figura 4.18 - Serie temporali della Temperatura misurata al suolo; media mobile a 24h indicata dalla linea rossa. Le oscillazioni dei valori sembrano essere legate all'effetto della stagionalità, tale effetto è maggiormente visibile per i siti con un valore di temperatura minore.

In aggiunta recentemente (agosto 2024) sono state installate tre stazioni per la misura della concentrazione in aria di CO₂, H₂S e SO₂ e parametri atmosferici (Temperatura, pressione e umidità relativa, direzione e velocità del vento). Queste ultime, a differenza delle altre stazioni, sono dotate di sensori trisonici 3D per l'acquisizione a 10 Hz della direzione e la velocità del vento.

Sono di seguito riportate la serie temporali della concentrazione di CO₂ (Fig. 4.19) e delle concentrazioni di H₂S (Fig. 4.20) misurate a 2m dal livello del suolo per tutte le stazioni munite del modulo per le misure multi gas.

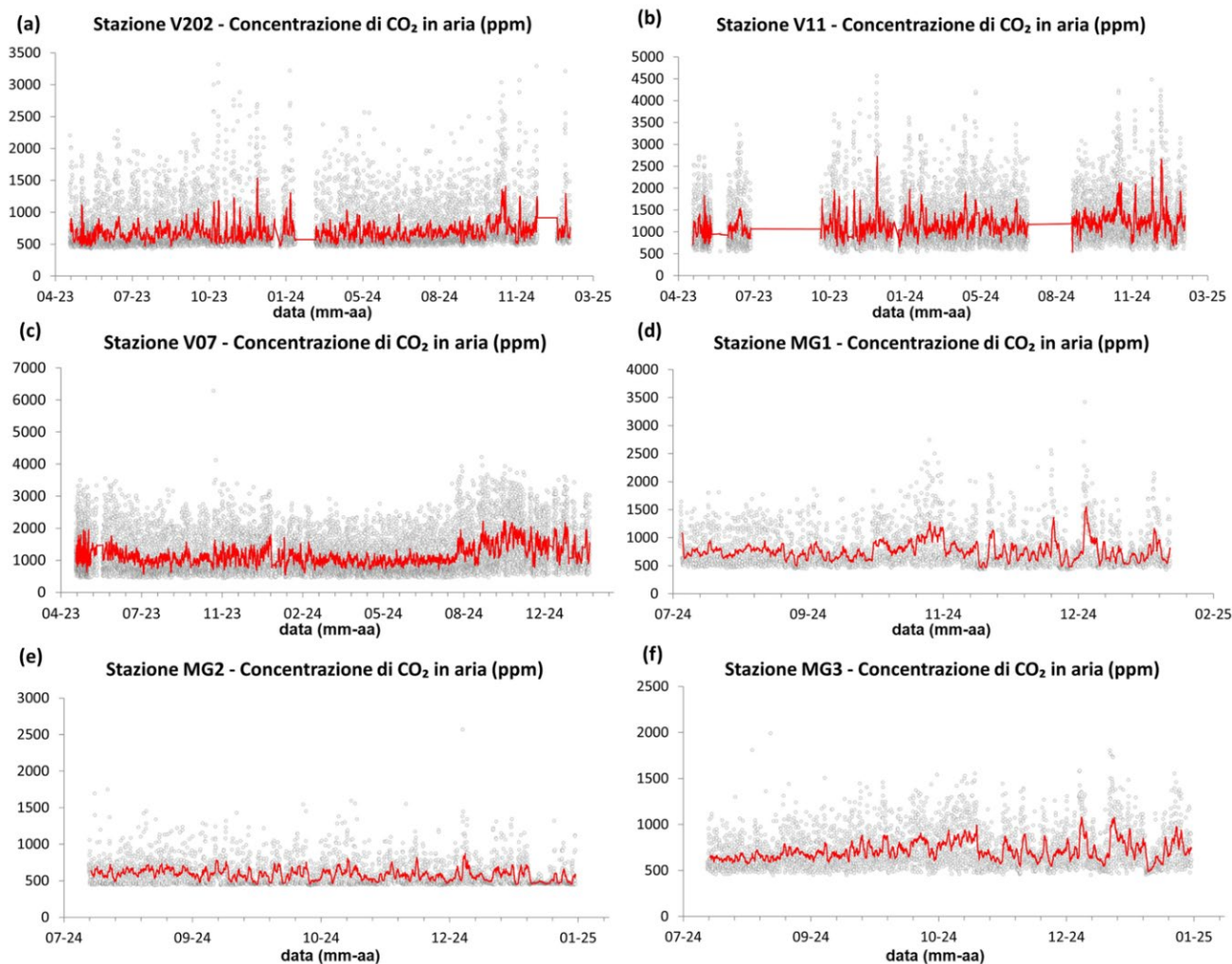


Figura 4.19 - Serie temporali della concentrazione di CO₂ misurata a 2m dal livello del suolo; media mobile a 24h indicata dalla linea rossa.

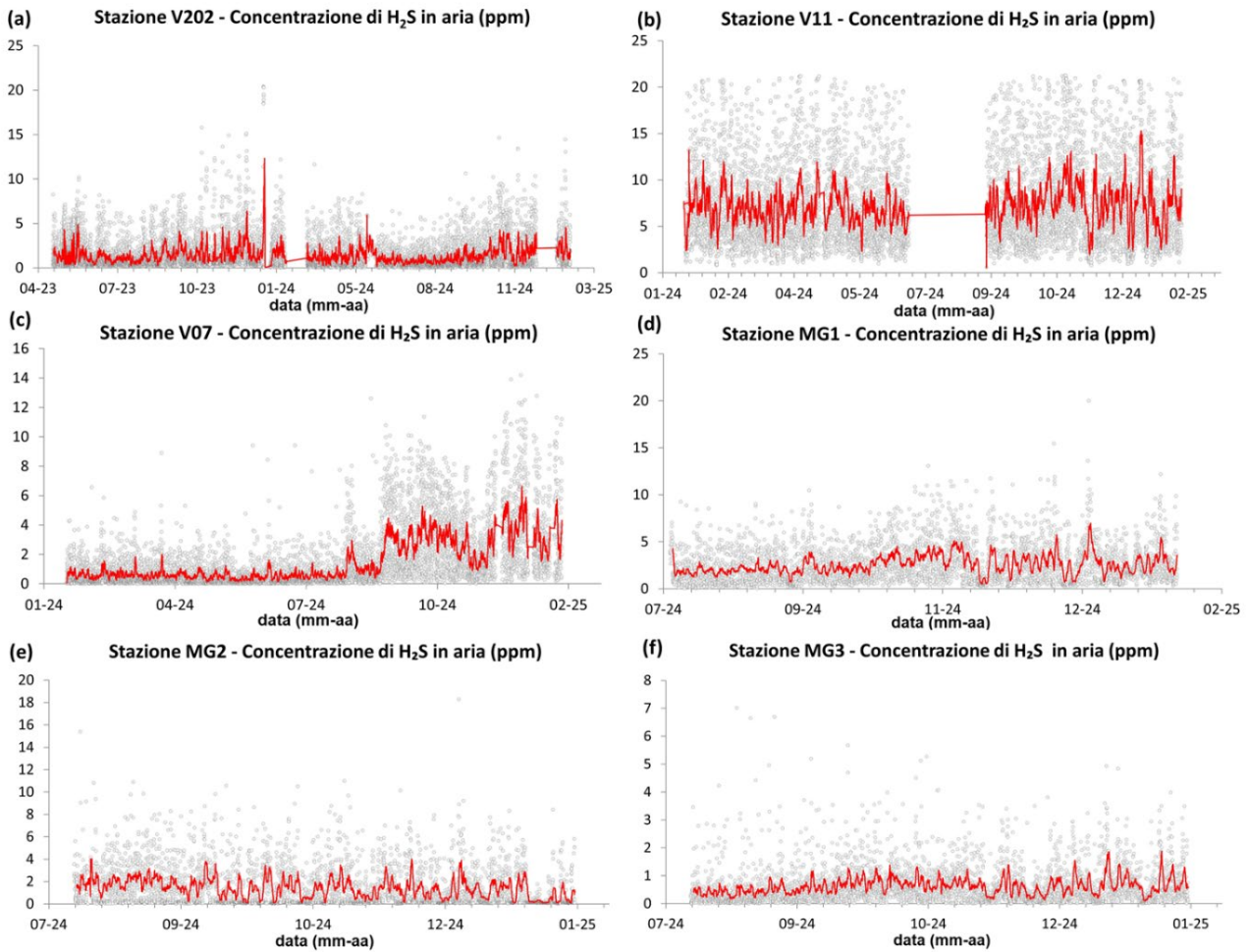


Figura 4.20 - Serie temporali della concentrazione di H_2S misurata a 2m dal livello del suolo; media mobile a 24h indicata dalla linea rossa. Si noti il lieve incremento misurato alla stazione V07 (Pisciarelli) incremento mostrato anche dalla CO_2 in aria (Fig.4.19).

4.5 CARATTERIZZAZIONE CHIMICO-FISICA DELLE ACQUE DELLA FALDA FLEGREA

Nel 2024, sono proseguite le attività di monitoraggio in continuo dei parametri chimico-fisici e del livello piezometrico della falda flegrea, con maggiore dettaglio nelle aree limitrofe di Solfatara – Pisciarelli. Tali attività rappresentano il passaggio al livello operativo di quanto sviluppato nell’ambito del progetto di potenziamento del monitoraggio dell’attività idrotermale ai Campi Flegrei (DPC-INGV All. B2 2019-2021, WP2-Task3). È stato inoltre eseguito il campionamento semestrale delle acque di falda per la determinazione della composizione chimica e isotopica.

Nel periodo di interesse è stata mantenuta in funzione e ulteriormente sviluppata la rete di monitoraggio multiparametrico della falda flegrea (Fig. 4.21). I siti di monitoraggio sono stati selezionati in modo da interessare sia le aree della falda caratterizzate da un chiaro input di fluidi idrotermali che le aree di background limitrofe, in modo da

riconoscere eventuali estensioni delle anomalie, basandosi sui risultati delle precedenti campagne di campionamento delle acque, misura dei parametri chimico-fisici e livello piezometrico.

Inoltre, sono state installate due nuove stazioni multiparametriche di monitoraggio della falda: nel complesso dell'ex Tennis Hotel, dove la temperatura misurata in pozzo è di ~83 °C, che mostra caratteristiche di un liquido idrotermale con temperatura di equilibrio profondo di ~360 °C, e la stazione Montespina, dove la temperatura misurata in pozzo è di ~40 °C.

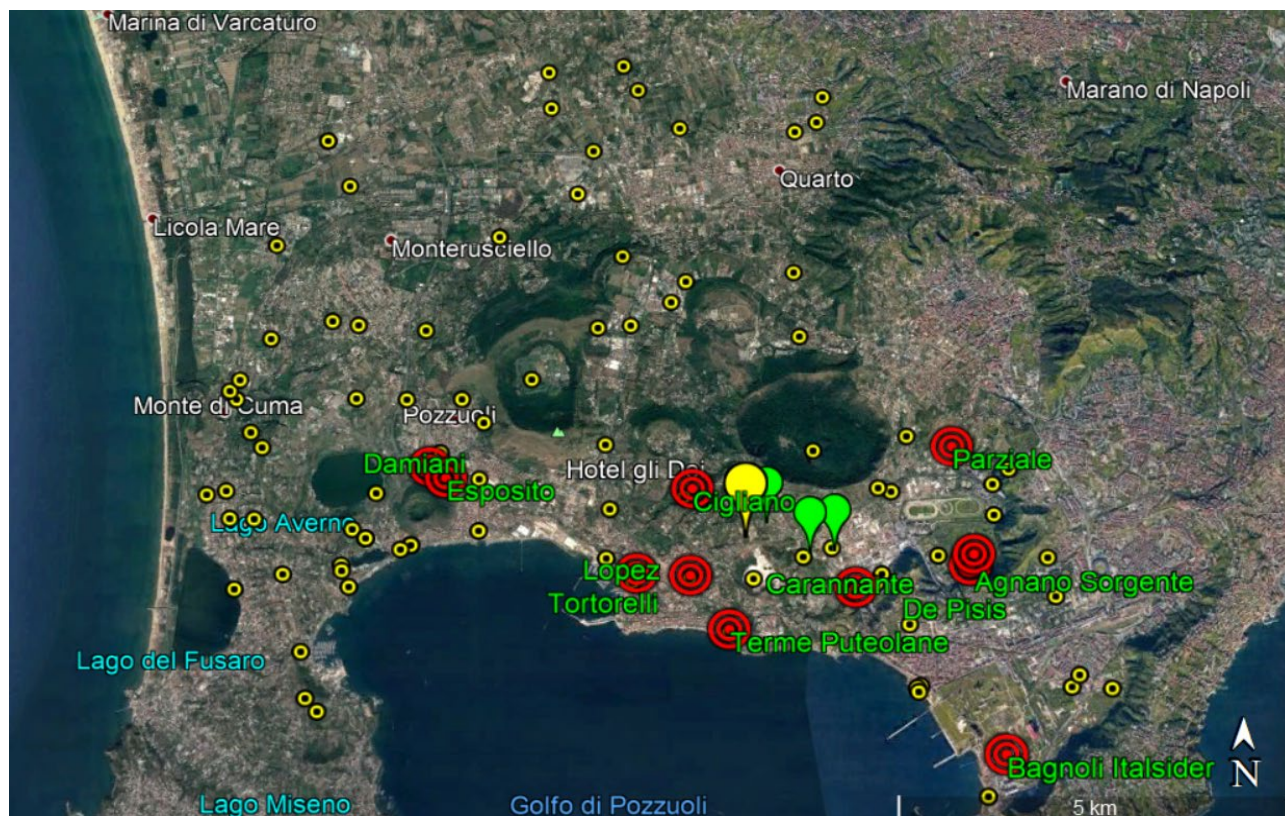


Figura 4.21 - Ubicazione dei siti della rete di monitoraggio multiparametrico in continuo della falda. In giallo la prima stazione equipaggiata con i sensori HT (fino a 100 °C), con i simboli verdi sono indicate le nuove stazioni recentemente installate. I cerchi gialli si riferiscono ai campioni prelevati nella campagna estesa.

Le stazioni di monitoraggio utilizzate per la realizzazione di questa rete sono costituite da una sonda CTD (Conducibilità elettrica (C), Temperatura (T) e Profondità (D)) con alimentazione interna sufficiente per diversi anni, e da un modem GSM anch'esso dotato di batteria che ne garantisce il funzionamento per alcuni anni. I dati sono acquisiti con frequenza oraria ed elaborati automaticamente. La strumentazione è stata acquistata su fondi POR Campania FESR 2007/2013 e integrata con i fondi del progetto DPC-INGV All. B2 2019-2021, WP2 Task3. Inoltre, riscontrata la necessità di estendere la capacità del sistema di monitoraggio della falda alle aree più prossime alle zone di risalita di fluidi ed in particolare in area Solfatara-Pisciarelli, dove le temperature dell'acqua raggiungono ~100°C, sono stati acquistati dei sensori di P-T in grado di funzionare a queste temperature e in presenza di fluidi aggressivi.

Purtroppo, questi sensori non si sono dimostrati affidabili nel lungo tempo, e poiché a livello commerciale non esiste una sensoristica adeguata, senza dover rivolgersi al

campo delle strumentazioni per le perforazioni geotermiche (comunque inadeguate per lo scopo), è stato progettato, sviluppato e realizzato un metodo innovativo di misura del livello di falda. La prima stazione è stata installata nel maggio 2021, nel pozzo del “Hotel gli Dei” caratterizzato da una temperatura dell’acqua di ~89 °C, la seconda è stata installata nel pozzo nel Tennis Hotel.

Inoltre, nel 2024 sono state eseguite due campagne di campionamento dei siti della rete di monitoraggio multiparametrico e di altri siti di interesse e una campagna estesa per ~60 campioni per confronto con le campagne di misura eseguite in precedenza (Fig. 4.21).

I pozzi investigati hanno una profondità variabile da pochi metri fino a oltre 180 m e una temperatura massima misurata di ~99 °C. La ricostruzione preliminare della superficie piezometrica, basata sulle misure dirette della profondità della falda eseguite nei pozzi, mostra una risalita della superficie freatica con la massima variazione centrata nell’area Solfatarata - Pisciarelli alimentata verosimilmente da condensati, in accordo con le misure effettuate in campagne precedenti e in generale con le indicazioni fornite da tecniche geoelettriche (Bruno et al., 2007; Byrdina et al., 2014). In Figura 4.22 è riportata la ricostruzione della superficie piezometrica basata sui dati disponibili.

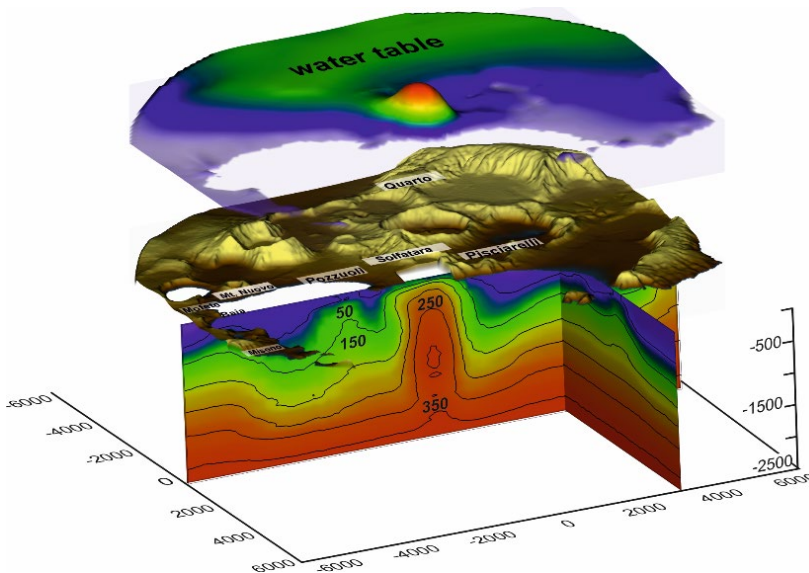


Figura 4.22 - Ricostruzione della superficie di falda nell’area flegrea. Si noti l’alto morfologico della superficie piezometrica con una geometria a campana centrata nell’area Solfatarata-Pisciarelli causata dalla condensazione del vapore dei fluidi idrotermali. La sezione verticale si riferisce alle temperature (°C) risultanti dal modello fisico 3D del sistema geotermico dei Campi Flegrei (Caliro et al., 2025).

La composizione chimica delle acque di falda mostra un ampio range di variazione della salinità, da acque diluite con meno di 1 grammo/litro (g/l) ad acque molto saline con oltre 60 g/l. Il pH varia da valori vicini alla neutralità fino a valori notevolmente acidi (pH ~2.0). La composizione chimico-isotopica riassunta in Figura 4.23a dai diagrammi $\delta^{18}\text{O}$ vs. δD e vs. Cl mette in evidenza, per molte delle acque investigate in area Solfatarata-Pisciarelli, caratteristiche tipiche delle acque “steam-heated”, ovvero riscaldate da vapori (fumarolici). Queste caratteristiche peculiari suggeriscono un significativo input di fluidi fumarolici condensati nella definizione della composizione chimico isotopica della falda locale. Questo input di condensati che, considerando la condensazione del vapore associato al flusso di CO_2 diffuso dal suolo misurato recentemente in area Solfatarata-Pisciarelli (Cardellini et al., 2017), può essere stimato in circa 40 litri al secondo è probabilmente la causa dell’alto morfologico che assume la superficie piezometrica nell’area.

In Figura 4.23b l'applicazione dei geotermometri basati sulle composizioni relative di Na-K-Mg^{0.5} (Giggenbach, 1988) delle acque campionate mette in evidenza, oltre ad acque "steam-heated", anche la presenza di acque in area Solfatara-Pisciarelli equilibrate a temperature elevate fino a circa 360 °C, probabilmente rappresentative almeno localmente della fase liquida profonda del sistema idrotermale, variabilmente miscelata a condensati. L'interpretazione preliminare dei dati acquisiti non evidenzia variazioni significative delle composizioni delle acque rispetto ai dati pregressi.

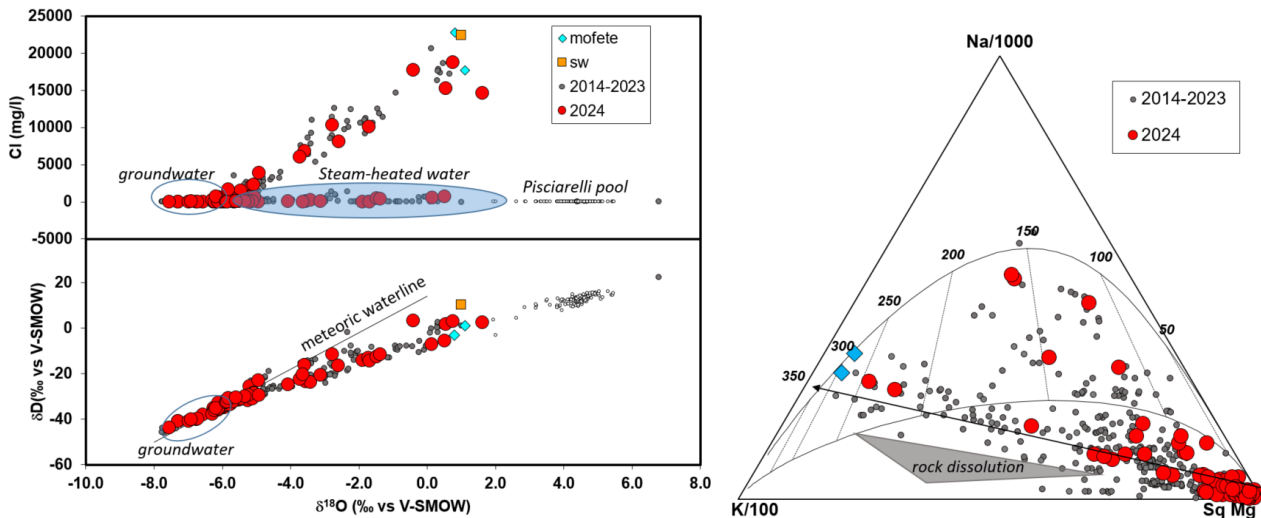


Figura 4.23 - a) composizione chimico-isotopica delle acque di falda relative alle campagna di misura dal 2014 e quelle effettuate nel 2024, da notare che la quasi totalità delle acque campionate in area Pisciarelli-Solfatara mostrano composizioni che indicano un significativo contributo di fluidi fumarolici; b) diagramma geotermometrico basato sulle composizioni relative di Na-K-Mg (Giggenbach 1988), temperature elevate fino a ~360°C sono stimate per le acque campionate in area Solfatara-Pisciarelli.

4.6 VARIAZIONI OSSERVATE DEI PARAMETRI MONITORATI DELLA FALDA

Nel sito "Tortorelli" situato a ~600 m a W-SW dal cratere della Solfatara (Fig. 4.21), la composizione chimica isotopica delle acque indica un rilevante contributo di condensati fumarolici, sono state registrate rapide variazioni di temperatura delle acque di falda con aumenti fino a ~4 °C nell'arco di poche ore (Fig. 4.24), accompagnate da modeste variazioni di salinità (conducibilità). Variazioni locali, che non hanno interessato le zone limitrofe della falda a temperatura elevata (i.e. Terme Puteolane, Fig. 4.21). Tali repentini aumenti di temperatura possono essere collegati a un incremento dell'apporto di condensati, indicativo di un aumento del flusso di fluidi emessi dal sistema idrotermale. Il sito in questione che ha mostrato le maggiori variazioni dei parametri monitorati, è stato oggetto anche di emissione di gas (ricco in CO₂) che è stata rilevata dopo gli eventi sismici del 5-6 dicembre 2019 (M_{dmax} 3.1), del 26 aprile 2020 (M_{dmax} 3.3), del 19 dicembre 2020 (M_d 2.7) e del 16 e 29 marzo 2022 (M_d 3.5-3.6) e degli eventi maggiori registrati (M_{dmax} 4.2). L'analisi della composizione dell'acqua di falda, durante questi periodi, ha evidenziato un aumento del carbonio totale inorganico

disciolto (TDIC) essenzialmente legato all'incremento della pressione parziale di CO₂. Il fenomeno rilevato è probabilmente legato alla separazione di CO₂ dalle zone più profonde della falda, che localmente è ricca in gas, innescata dall'effetto sismico sull'acquifero o ad un aumento del flusso di fluidi rilasciato nell'acquifero.

In particolare, tali correlazioni sono maggiormente evidenti per gli eventi di maggiore energia (con uno strain release più alto).

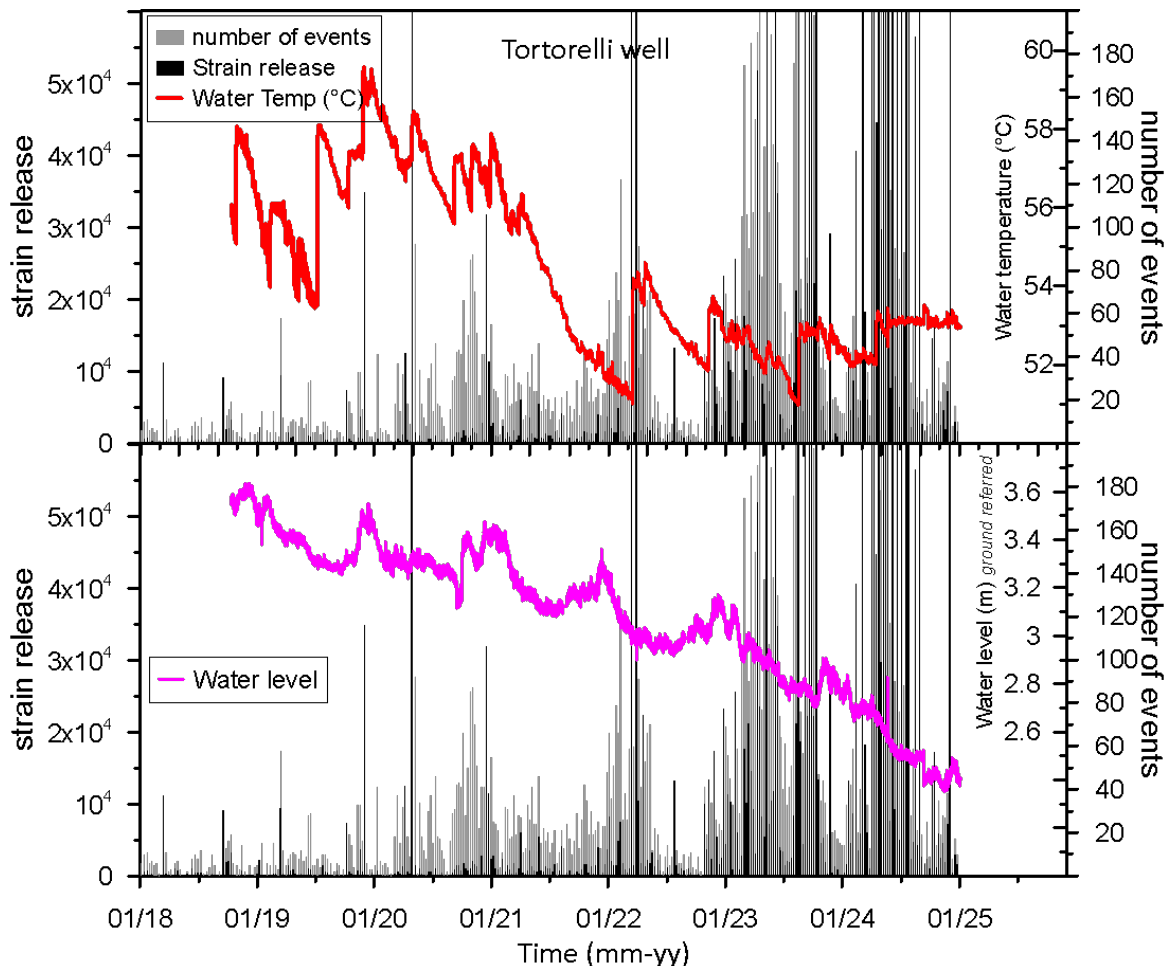


Figura 4.24 - Parametri monitorati in continuo a) temperatura della falda b) livello di falda e c) variazione della concentrazione del carbonio totale inorganico disciolto (TDIC) nelle acque del sito di Tortorelli. Il numero di eventi sismici su base settimanale e lo strain-release registrati ai Campi Flegrei sono riportati come istogrammi.

Altri parametri monitorati in continuo (livello piezometrico, conducibilità elettrica) non hanno mostrato variazioni così nette in concomitanza dell'anomalia chimica rilevata. Di conseguenza, le anomalie registrate (i.e. aumento di ~4°C di un settore della falda) indicano un rapido e intenso rilascio di energia nella falda ad opera dei fluidi, risultando di primario interesse nel riconoscimento della dinamica del sistema idrotermale.

La variazione di temperatura interessa tutta la colonna d'acqua del pozzo, quindi, non è legata al rimescolamento delle acque nel pozzo ma al reale riscaldamento locale della falda (Figura 4.25).

Di particolare interesse sono i dati acquisiti nel pozzo di più alta temperatura (~89 °C, H. gli Dei) sito nei pressi della Solfatarà. I parametri misurati hanno evidenziato una forte correlazione inversa tra la pressione atmosferica, misurata indipendentemente, e

la variazione del livello di falda (Fig. 4.26). Non ci risulta che tale fenomenologia sia nota o che sia stata osservata in precedenza in acquiferi freatici. Normalmente i sistemi di misura del livello non compensati, come i sensori utilizzati nelle altre stazioni della rete di monitoraggio (CTD-Diver, Schlumberger), misurano il livello delle acque sotterranee con un sensore di pressione assoluta. Il valore misurato di pressione è uguale al "peso" della colonna d'acqua sopra lo strumento di misura più la pressione ("peso") dell'aria, e pertanto va compensato sottraendo la pressione atmosferica dalla misura di pressione assoluta.

In ogni caso se non si applicasse questa compensazione si osserverebbe una correlazione diretta (i.e. aumento della pressione atmosferica e aumento della pressione misurata e di conseguenza del livello) e non inversa come quella registrata nel pozzo dell'Hotel gli Dei.

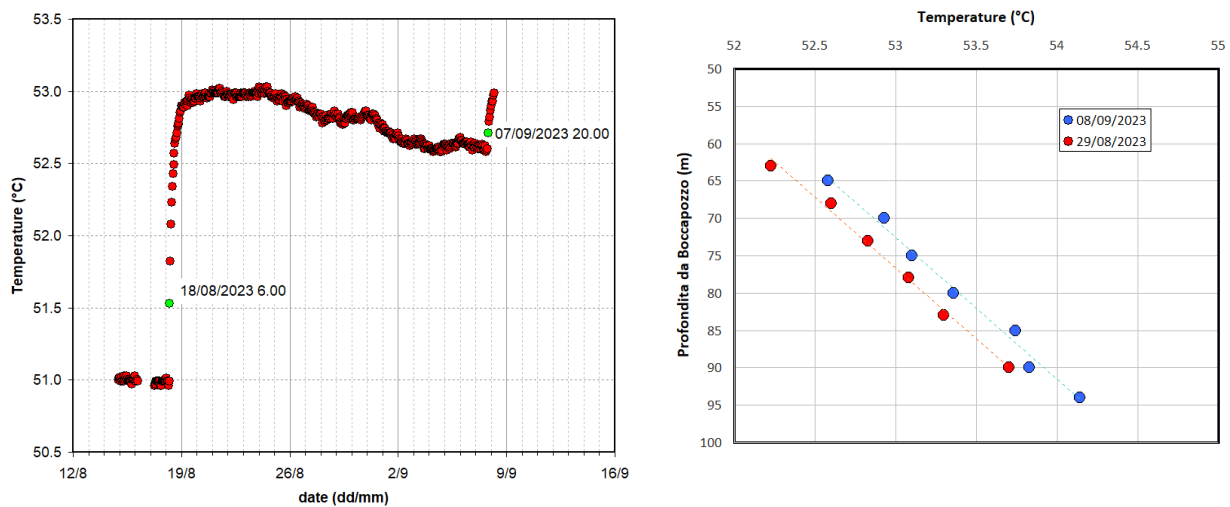


Figura 4.25 - Temperatura misurata in continuo nel pozzo Tortorelli nel periodo agosto-settembre 2023 (a destra) e i gradienti verticali di temperatura misurati nel pozzo in data 29/08/2023 e dopo l'aumento di temperatura il 08/09/2023 (a sinistra). L'aumento di temperatura è stato misurato in tutta la colonna d'acqua del pozzo.

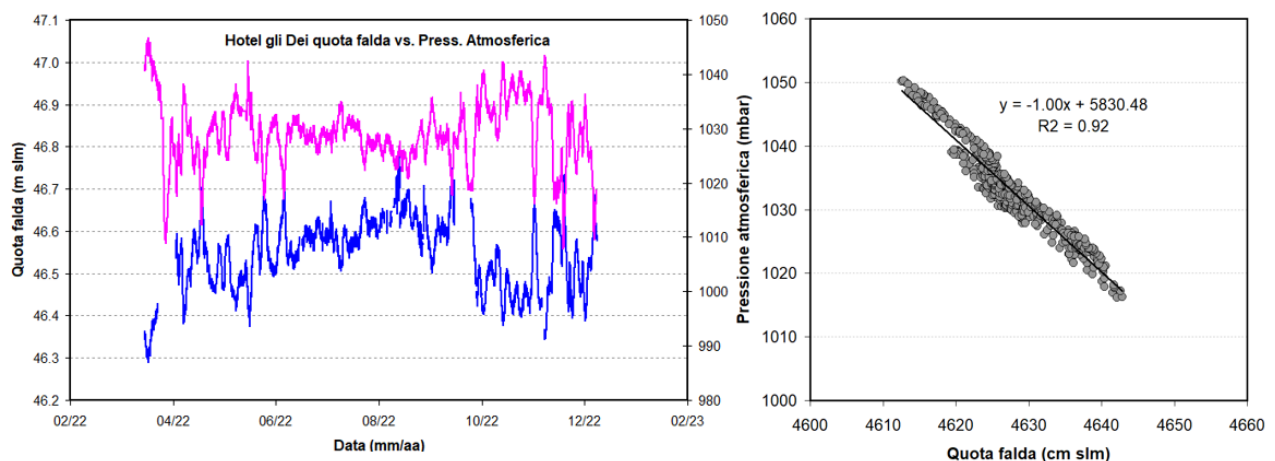


Figura 4.26 - Quota della falda sul livello del mare misurata in continuo dalla stazione di monitoraggio installata presso l'Hotel gli Dei, equipaggiata con un sensore ad alta performance compensato per la pressione atmosferica. Nel grafico è riportata la pressione atmosferica misurata da un'altra stazione installata nel sito Tortorelli distante poche centinaia di metri, si noti la spiccata anti-correlazione dei due segnali acquisiti in modo indipendente.

Tutti i dati disponibili dal 2018 acquisiti dalle altre stazioni della rete di monitoraggio sono stati elaborati per evidenziare eventuali simili correlazioni. In Figura 4.27 sono riportati i valori di pressione atmosferica e le variazioni della falda per ciascun pozzo, calcolate come differenza dei valori rispetto a una media mobile con un periodo di 60 giorni. La correlazione inversa risulta essere molto evidente per "Hotel gli Dei" con un Coefficiente di Correlazione (R2) di ~0.9. Risulta inoltre essere ben visibile anche per i siti di Cigliano e Carannante, mentre risulta assente o trascurabile negli altri pozzi più distanti dall'area Solfatarata-Pisciarelli (Fig. 4.21).

Il fenomeno osservato, considerando anche la sua distribuzione areale e le caratteristiche chimico-isotopiche delle acque, fortemente supporta l'interpretazione che nell'area Solfatarata-Pisciarelli la falda sia sostenuta da una struttura comprimibile rappresentata dalla presenza del plume di gas idrotermali i cui condensati stessi alimentano localmente la falda.

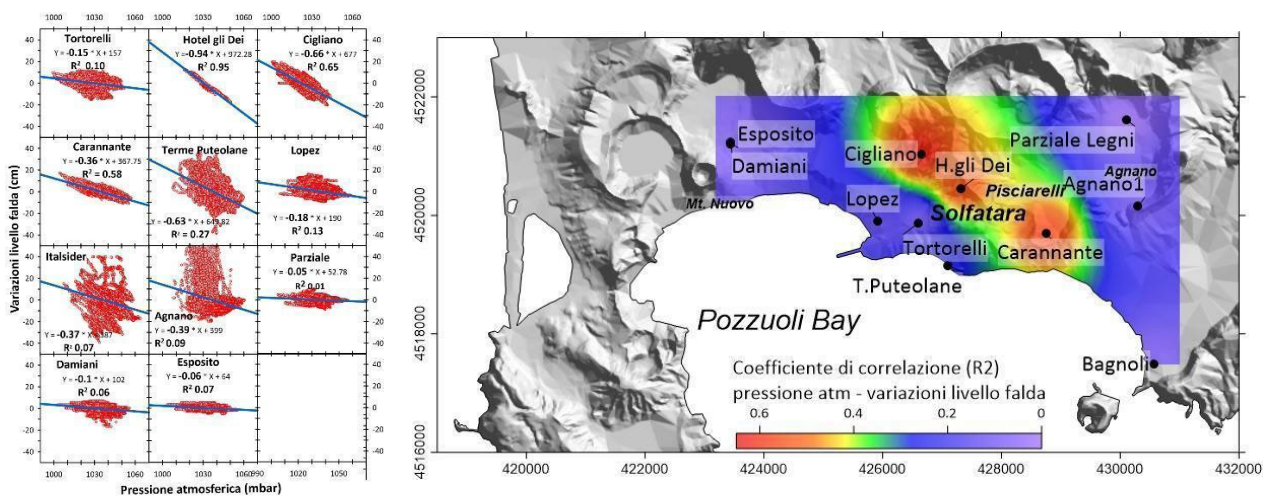


Figura 4.27 – a) Variazioni di pressione atmosferica e del livello di falda misurate dalle stazioni di monitoraggio multiparametrico su tutti i dati disponibili dal 2018. Solo in alcune stazioni si rileva una marcata correlazione negativa tra i due parametri; b) Distribuzione areale dei valori del coefficiente di correlazione (R2) tra la pressione atmosferica e la variazione del livello di falda. La falda sembra essere sostenuta da una struttura comprimibile probabilmente rappresentata dalla presenza del plume di gas idrotermali i cui condensati stessi alimentano localmente la falda.

4.7 CAMPAGNE ESTESE DI MISURA DEL FLUSSO DI CO₂ DAL SUOLO

Nel 2024 sono state realizzate due campagne estese di misura del flusso di CO₂ diffuso dal suolo nell'area Solfatarata – Pisciarelli a maggio e a novembre. Le campagne hanno interessato un'area di circa 1.45 km² (Figura 4.28) che include l'area interna del cratere della Solfatarata, l'area fumarolizzata in contrada Pisciarelli e le aree circostanti (es. area via Antiniana, etc...). Questo tipo di campagne di misura, iniziate nel 1998 ed effettuate con una cadenza variabile da annuale a trimestrale sino al 2016, sono state interrotte dopo la restrizione degli accessi nell'area del cratere della Solfatarata (settembre 2017). Nel settembre 2021 questa attività di monitoraggio è ripresa, non con poche difficoltà legate alla permanenza nel cratere ancora limitata a 60 minuti.

I valori misurati del flusso di CO₂, per ciascuna delle campagne sono stati elaborati mediante il metodo delle simulazioni sequenziali Gaussiane (Cardellini et al., 2003), per la stima del flusso totale emesso dall'area intera (Figura 4.29). I valori di flusso di CO₂

dal suolo sull'area indagata sono stati stimati in $1550 \pm 120 \text{ t d}^{-1}$ a novembre 2024. Questi valori di flusso risultano più bassi di quelli calcolati utilizzando la correlazione tra il flusso delle misure mensili e quello delle misure estese, riportata in Chiodini et al., 2021. Questa differenza suggerisce una variazione del pattern di degassamento diffuso nell'area, con un incremento relativo nell'area craterica (misurata mensilmente) e quella esterna interessata dalle misure estese di flusso di CO_2 . Tale differenza potrebbe essere dovuta alla difficoltà di eseguire le misure in alcune aree non più accessibili.

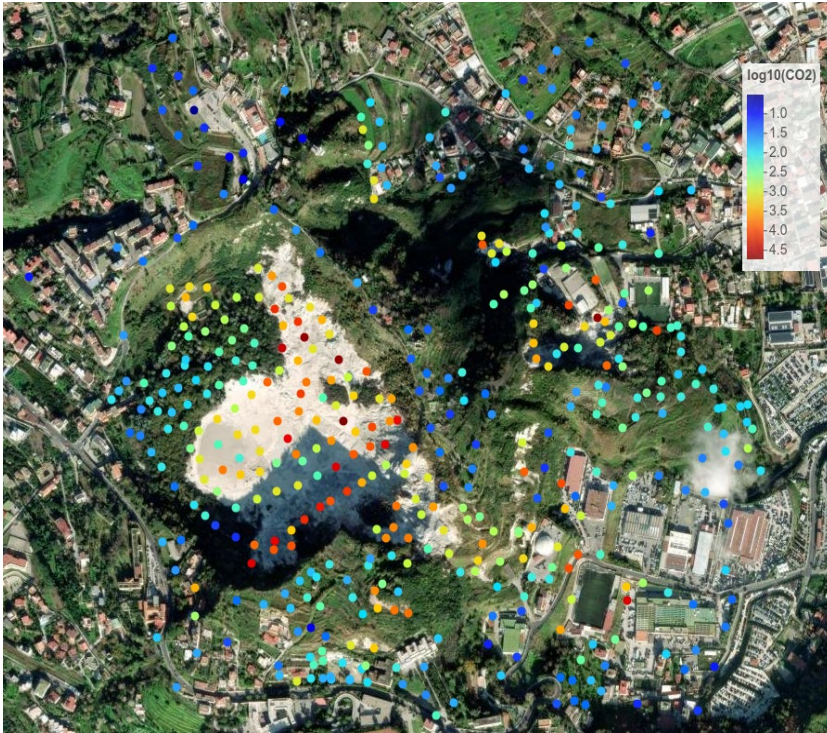
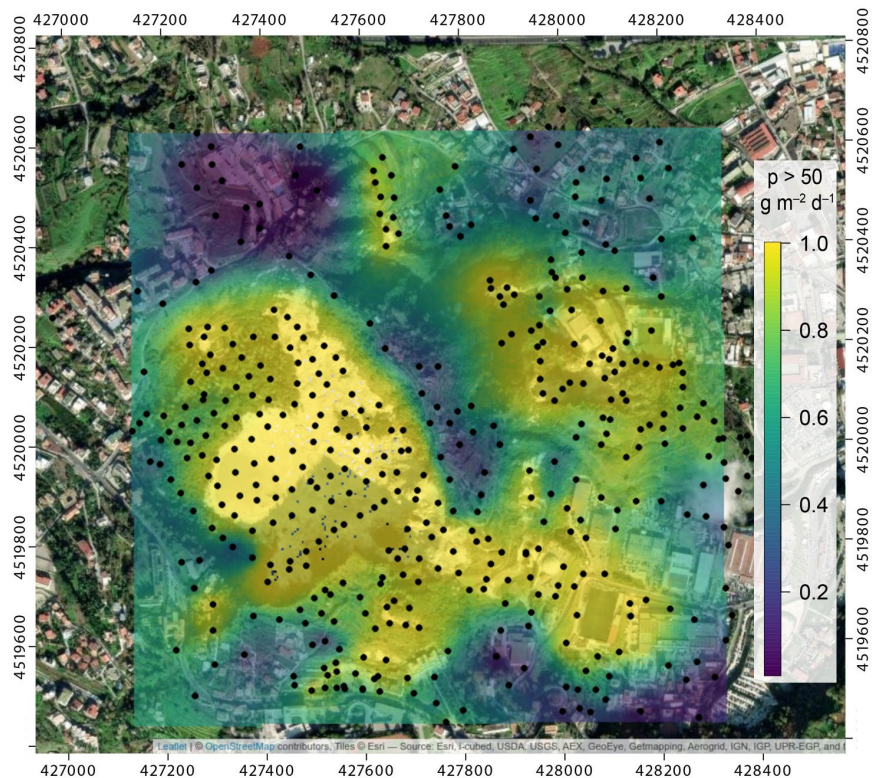


Figura 4.28 - Area investigata nelle campagne di misura del flusso di CO_2 dal suolo. È riportata l'ubicazione delle misure nelle aree di Solfatara e Pisciarelli (novembre 2024).

Figura 4.29 Mappa di probabilità del flusso diffusivo di CO_2 maggiore di $50 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.



ISCHIA

1 - MONITORAGGIO SISMOLOGICO

P. Ricciolino¹, M. Orazi¹, D. Galluzzo¹, E. Bellucci Sessa¹, A. Benincasa¹, A. Bobbio¹, C. Buonocunto¹, A. Caputo¹, A. Carandente¹, V. Convertito¹, P. Cusano¹, G. Dalla Via¹, D. Delle Donne¹, A. Di Filippo¹, R. Esposito¹, G. Gaudiosi¹, F. Liguoro¹, D. Lo Bascio¹, R. Manzo¹, S. Morabito¹, R. Nappi¹, L. Nardone¹, A. Tramelli¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

Il monitoraggio sismologico di Ischia viene svolto mediante l'uso di una Rete Permanente integrata da una Rete Sismica Mobile installata dopo il terremoto del 21 agosto 2017. Tali reti consentono di individuare e classificare transienti sismici legati a terremoti o altri fenomeni naturali ed artificiali.

1.1 RETE SISMICA PERMANENTE

La Rete Permanente di Monitoraggio Sismico di Ischia operativa nel 2024 consta di 8 siti di installazione sull'isola più 1 sull'Isola di Procida (Figura 1.1; Tabella 1.1). In ogni sito, secondo i casi, possono insistere più tipologie di stazioni e/o di sensori in base alle logiche di molteplicità e complementarità di sensori o di ridondanza strumentale.

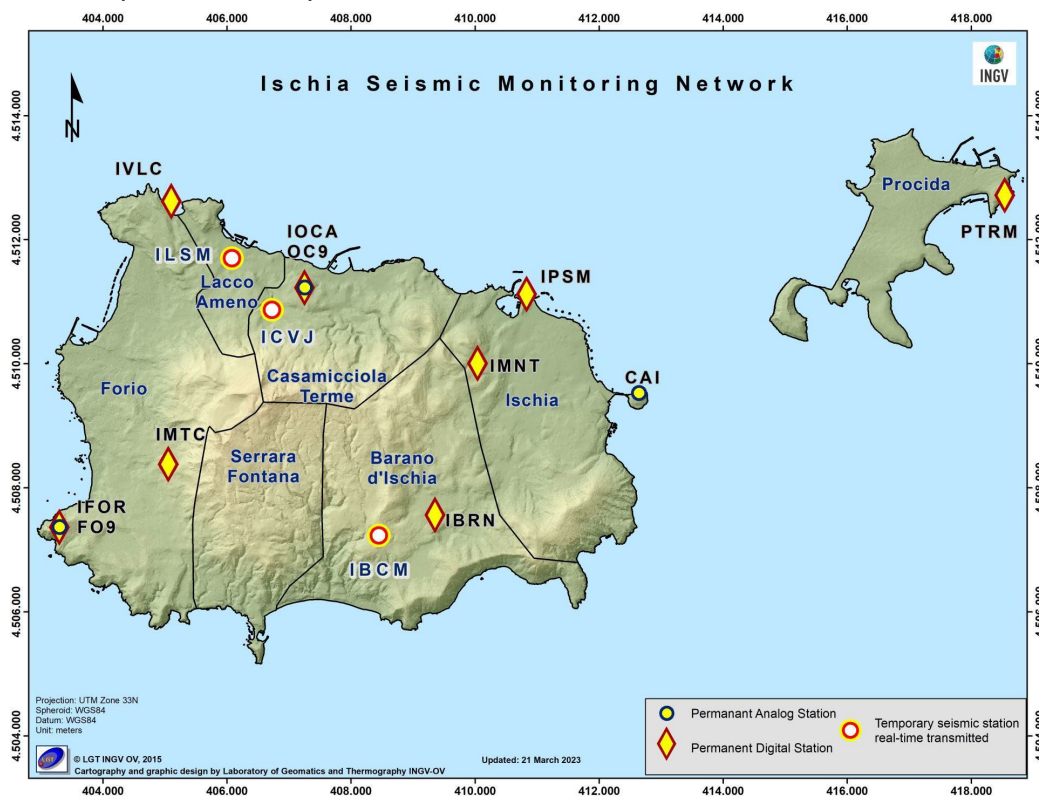


Figura 1.1 – Rete Sismica di Ischia.

La Tabella 1.1 sintetizza, per ogni sito, il tipo di sensore e di trasmissione presente.

Sono presenti 1 stazione analogica equipaggiata con sensore a corto periodo a 3 componenti. La stazione analogica FO9 è stata dismessa mentre la stazione CAI è al momento non operativa per questioni tecniche e logistiche connesse con il cambio di proprietà del sito di installazione.

Le stazioni digitali sono 8 di cui 2 basate sull'acquisizione GILDA, 1 equipaggiata con acquisitore Guralp Affinity a 8 canali e le rimanenti 5 con acquisitore Guralp DM24 a 7 canali.

I sensori che equipaggiano le stazioni digitali sono i seguenti: 4 velocimetri a larga banda (0.016-50 Hz), 3 velocimetri a larga banda (0.033-50Hz), 1 a banda molto larga (0.0083-175Hz) e 5 accelerometri di cui 4 con fondo scala impostato a 1g (quelli sull'isola di Ischia) e 1 con fondo scala impostato a 0.5g (sull'isola di Procida).

A questi si aggiungono un microfono infrasonico Infracyrus corto periodo (1-50Hz) (presso IOCA) e un microfono a larga banda (0.1-50Hz) Chaparral (presso IFOR).

Tabella 1.1 – Stato della Rete Sismica Permanente di Ischia.

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
CAI non operativa	40.7321N 13.9655E 136* m	Castello Aragonese	1996	MarkL4-3C	Analogica	Radio UHF analogica
OC9	40.7468N 13.9014E 165.5* m	Ischia Osservatorio Casamicciola	1993	MarkL4-3C	Analogica	Radio UHF analogica
IOCA			09/02/2011	Trillium 120PA Nanometrics Titan	Guralp Affinity (8ch)	Wi-Fi ADSL/LTE
FO9 dismessa IFOR	40.7115N 13.8551E 278* m	Forio Punta Imperatore	1995 - gennaio 2024 Ottobre 2009	MarkL4-3C velocimetro Guralp CMG-40T 60s, accelerometro Fortis, Sensore Infrasonico Chaparral 25V	Analogica Guralp DM24	Radio UHF Analogica Wi-Fi ADSL/LTE
IMTC	40.7209N 13.8758E 255.5* m	Forio Monte Corvo	17/04/2015	Guralp CMG-40T 60s	Guralp DM24	Wi-Fi
PTRM	40.7614N 14.0349E 134* m	Procida Terra Murata	Luglio 2018	Guralp CMG-40T 30s Episensor ES-T	Guralp DM24	Wi-Fi

IPSM	40.7462N 13.9438E 53.5* m	Ischia Porto	Luglio 2018	Guralp CMG-40T 30s Episensor ES-T	Guralp DM24	Wi-Fi
IVLC	40.7591N 13.8721E 92.5* m	Monte Zaro	Luglio 2018	Guralp CMG-40T 60s Episensor ES-T	Guralp DM24	Wi-Fi
IBRN	40.7140N 13.9268E 100 m	Barano	Luglio 2018	Guralp CMG-40T 30s	Guralp DM24	UMTS
IMNT non operativa	40.7362N 13.9343E 100 m	Montagnone	Luglio 2018	Guralp CMG-40T 60s	Guralp DM24	UMTS

Nota: le quote indicate con (*) riportano l'altezza rispetto al geoide WGS84.

1.2 RETE SISMICA MOBILE

La configurazione delle stazioni sismiche della Rete Mobile a Ischia è mostrata in Figura 1.1 e nella Tabella 1.2.

Attualmente la Rete Mobile installata a Ischia è composta da tre stazioni equipaggiate con 2 sensori a corto periodo, 1 accelerometro FBA-EST e un sensore Lennartz LE3D 5s. Nel corso dell'anno, è stato sostituito il digitalizzatore Gilda con una Atlas Lunitek ad ILSM. Inoltre, per problemi tecnici alla stazione IBCM, è stata installata in fase di test una stazione sismica presso il plesso scolastico in località Buonopane (Comune di Barano) poco distante dal sito che ospita IBCM.

Tutte e tre le stazioni trasmettono i dati alla Sala di Monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano integrando in tempo reale la Rete Permanente.

Tabella 1.2 – Stato della Rete Mobile installata a Ischia.

Stazione	Coordinate	Località	Data Installazione	Sensore	Acquisitore	Trasmissione
ILSM	40.7509N 13.8874E 20 m	Lacco Ameno Scuola Mennella	20/10/2020	Lennartz LE-3D/5s	Lunitek Atlas C	LTE
ICVJ	40.7435N 13.8952E 81 m	Casamicciola T. Hotel V.Jantò	05/10/2020	Lennartz LE-3Dlite	Lennartz MARSlite	LTE
IBCM	40.7109N 13.9161E 314 m	Barano Casolare Madonna	Settembre 2018 05/06/2020	Lennartz LE-3Dlite Episensor ES-T	Lunitek Atlas C	LTE

Nel corso del 2024, le stazioni della Rete Sismica installata ad Ischia hanno registrato 3 terremoti con una magnitudo massima $M_{d_{max}}=1.8\pm 0.3$ (evento del 30/07/2024 alle ore 21:19 UTC).

È stato possibile stimare i parametri ipocentrali di tutti e tre gli eventi registrati, le cui localizzazioni sono mostrate in Figura 1.2.

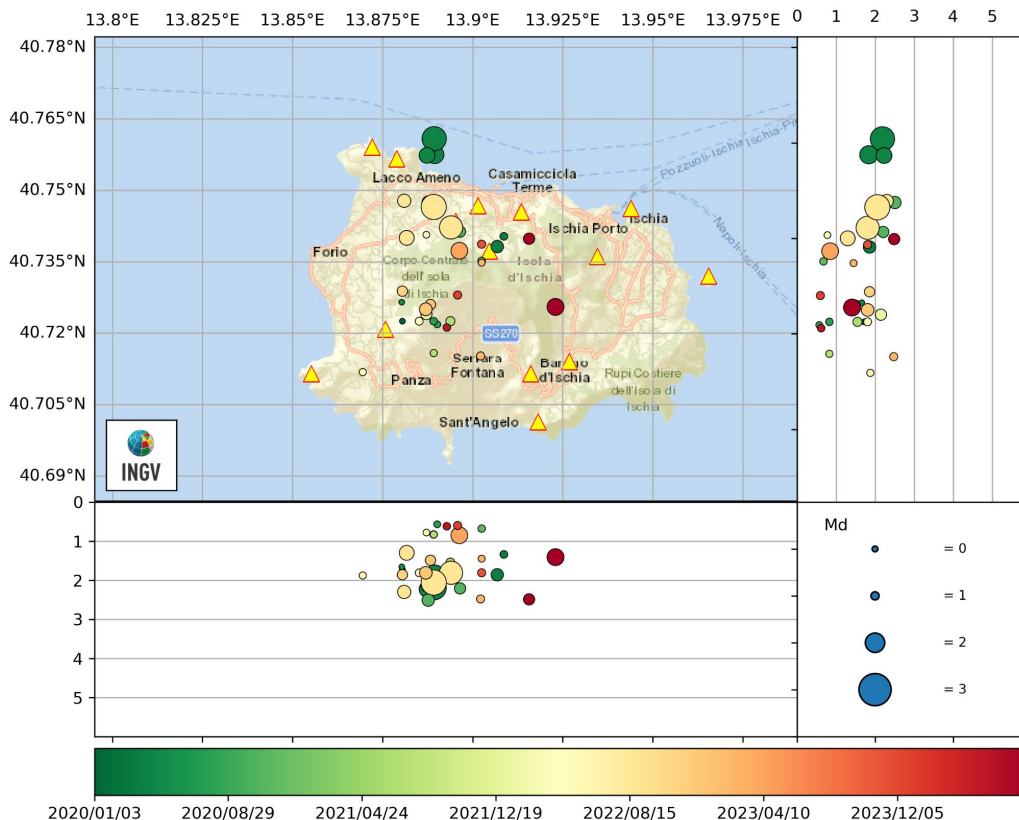


Figura 1.2 – Localizzazioni ipocentrali dei terremoti registrati ad Ischia dal 01/01/2020 al 31/12/2024.

Non si evidenziano variazioni significative nella frequenza di accadimento (Figura 1.3), nella distribuzione degli ipocentri (Figura 1.2), nelle profondità ipocentrali (Figura 1.4), nella distribuzione temporale delle magnitudo (Figura 1.5) e nel rilascio cumulativo di energia (Figura 1.6).

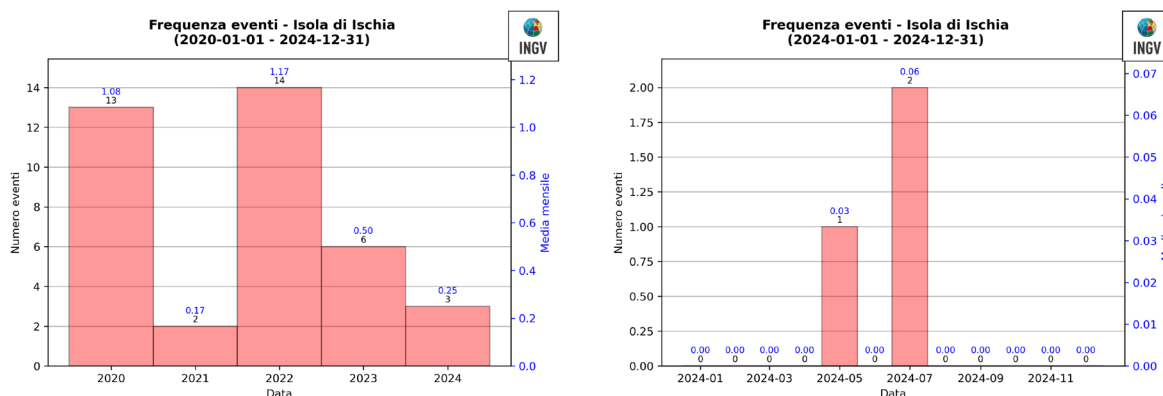


Figura 1.3 – Frequenza di accadimento dei terremoti registrati ad Ischia nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e nel 2024 (a destra).

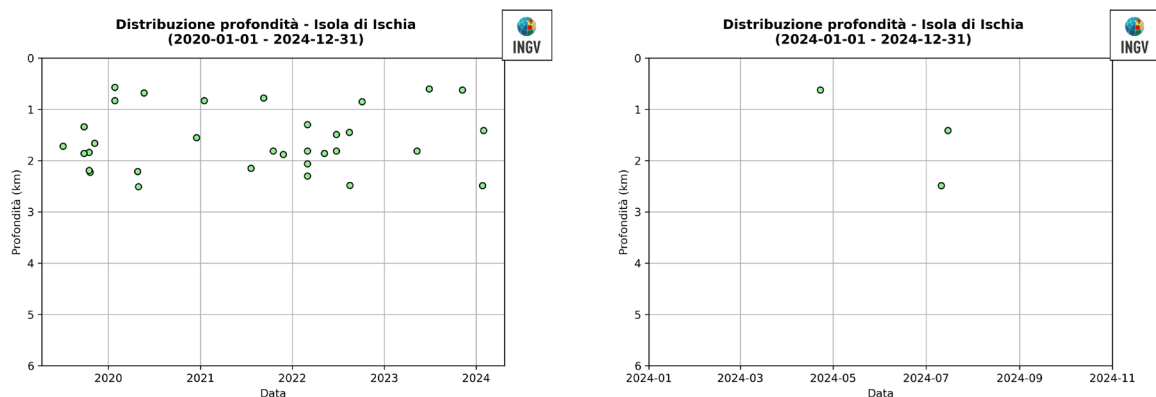


Figura 1.4 – Profondità ipocentrali dei terremoti localizzati a Ischia nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e nel 2024 (a destra).

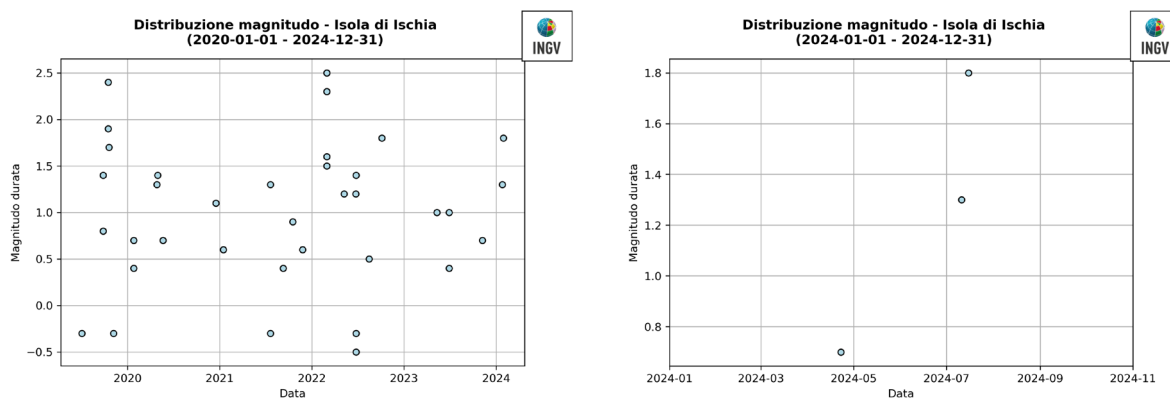


Figura 1.5 - Magnitudo dei terremoti registrati ad Ischia nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e nel 2024 (a destra).

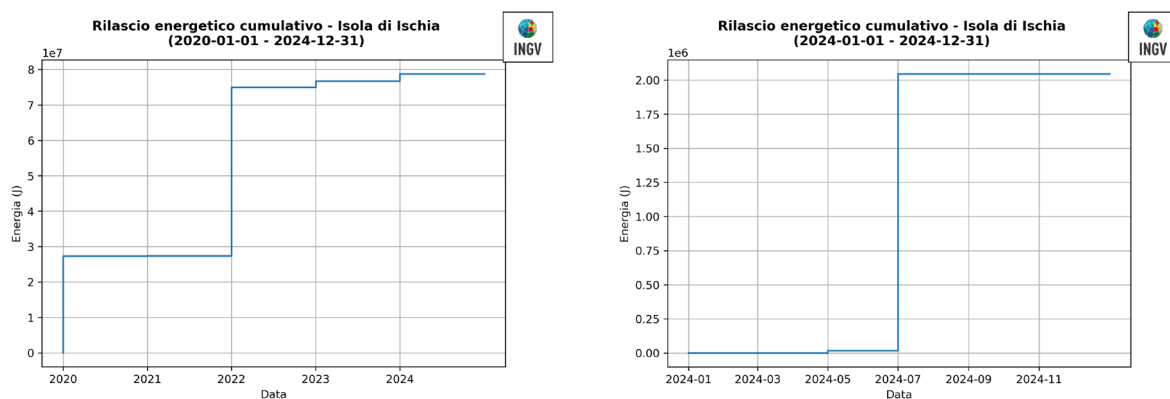


Figura 1.6 – Andamento cumulativo dell'energia rilasciata dai terremoti registrati ad Ischia nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e nel 2024 (a destra).

2 - MONITORAGGIO GEODETICO

Durante il 2024 il monitoraggio geodetico di Ischia è stato effettuato attraverso misure continue GNSS e tiltmetriche, una campagna gravimetrica ed elaborazioni di dati satellitari.

2.1 RETE GNSS

P. De Martino¹, M. Dolce¹, G. Brandi¹, A. Iorio¹, G. Scarpato¹, U. Tammaro¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano – Napoli

La rete GNSS permanente operante sull'isola di Ischia è costituita da sei stazioni a cui si aggiunge una stazione installata a Procida (Figura 2.1.1). A partire dal 2023 è stato realizzato un potenziamento della Rete attraverso l'upgrade di tutte stazioni da GPS a GNSS e un ammodernamento dei sistemi di alimentazione e trasmissione.

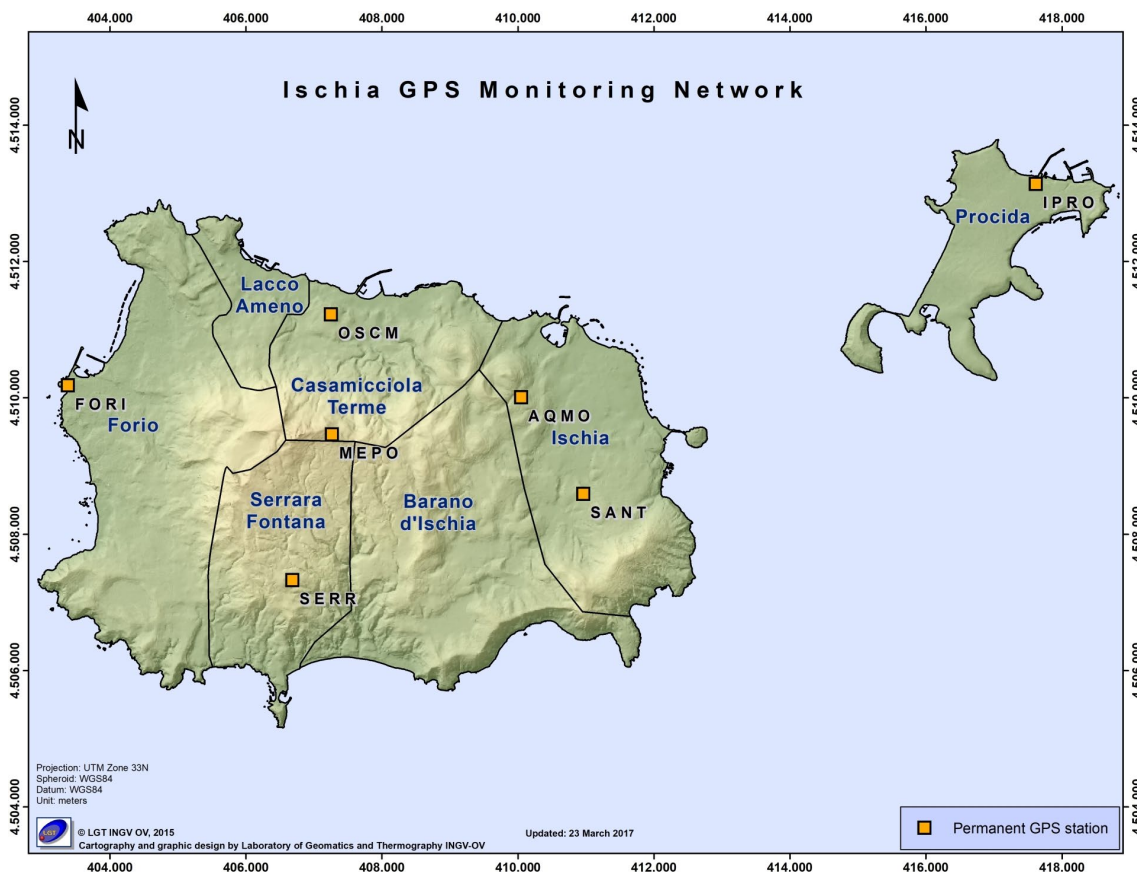


Figura 2.1.1 – Mappa della Rete GNSS permanente di Ischia.

In Tabella 2.1.1 sono riportati i nomi delle stazioni e le coordinate, le specifiche della strumentazione, gli intervalli di acquisizione dati ed i sistemi di trasmissione utilizzati. Cinque stazioni sono attrezzate con ricevitori GNSS di ultima generazione Leica GR10 e GR50 ed antenne Leica AR20. La stazione GNSS di SANT è stata temporaneamente

dismessa da maggio 2023 a causa di urgenti lavori di ristrutturazione dell'edificio scolastico sul quale è installata.

I dati vengono trasmessi con varie tecnologie in funzione della logistica del sito. I sistemi di trasmissione comprendono quattro stazioni che utilizzano la connettività LTE, due stazioni utilizzano la rete Wi-Fi dell'Osservatorio Vesuviano, una trasmette con tecnologia ADSL. Due stazioni sono alimentate con energia solare tramite pannelli fotovoltaici da 150W (SANT e MEPO). Le restanti stazioni sono alimentate tramite rete elettrica e dotate di batterie tampone per estenderne l'operatività in caso di blackout.

Tabella 2.1.1 – Stato della Rete GNSS di Ischia

Stazioni	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
AQMO	40.7361N 13.9346E	Acquedotto Montagnone (Ischia)	2001	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	LTE
FORI	40.7369N 13.8557E	Municipio di Forio d'Ischia	1999	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	Wi-Fi
MEPO	40.7309N 13.9018E	Monte Epomeo	2017	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	Wi-Fi
OSCM	40.7467N 13.9013E	Casamicciola Terme (Ischia)	2010	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	ADSL
SANT	40.7234N 13.9453E	Santantuono (Ischia)	2010	Leica GRX1200PRO LEIAT504 LEIT	1sec	LTE
SERR	40.7116N 13.8952E	Serrara (Ischia)	2001	Leica GR10 LEIAT504 LEIM	1sec	LTE
IPRO	40.76516N 14.0239E	Procida	2003	Leica GR50 LEIAR20 LEIM	1sec	LTE

Tutte le stazioni GNSS sono programmate con una doppia acquisizione in locale (file giornaliero a 30 sec ed orario ad 1 sec) e flusso dati ad 1 sec in tempo reale verso la Sala di Monitoraggio OV.

La gestione remota delle stazioni, la programmazione e download dei dati, la ricezione del flusso dati in tempo reale vengono effettuati tramite il software Spider della Leica Geosystems.

Procedure automatiche giornaliere provvedono alla verifica e validazione dei dati, all'archiviazione e al processamento dei dati GNSS, alla restituzione dei risultati (serie temporali delle variazioni lungo le componenti Nord, Est e Quota, campi di velocità e/o spostamento planimetrici e verticali).

Tutti i dati GNSS dal 2023 sono stati riprocessati in modalità Precise Point Positioning (PPP) con il software PRIDE PPP-AR. Le serie temporali sono analizzate tramite il software Hector per calcolare le velocità ed un realistico valore dell'errore associato, stimare i segnali periodici a carattere annuale e le eventuali discontinuità dovute a cambi di antenna.

Dal 2022 è operativo in Sala di Monitoraggio OV il sistema di processamento e visualizzazione in tempo reale dei dati ad alta frequenza (1 Hz) delle stazioni GNSS dell'area vulcanica napoletana (Figura 2.1.2) realizzato nell'ambito della Convenzione DPC-INGV 2019-2021 (Allegato B2, WP2-Task2).

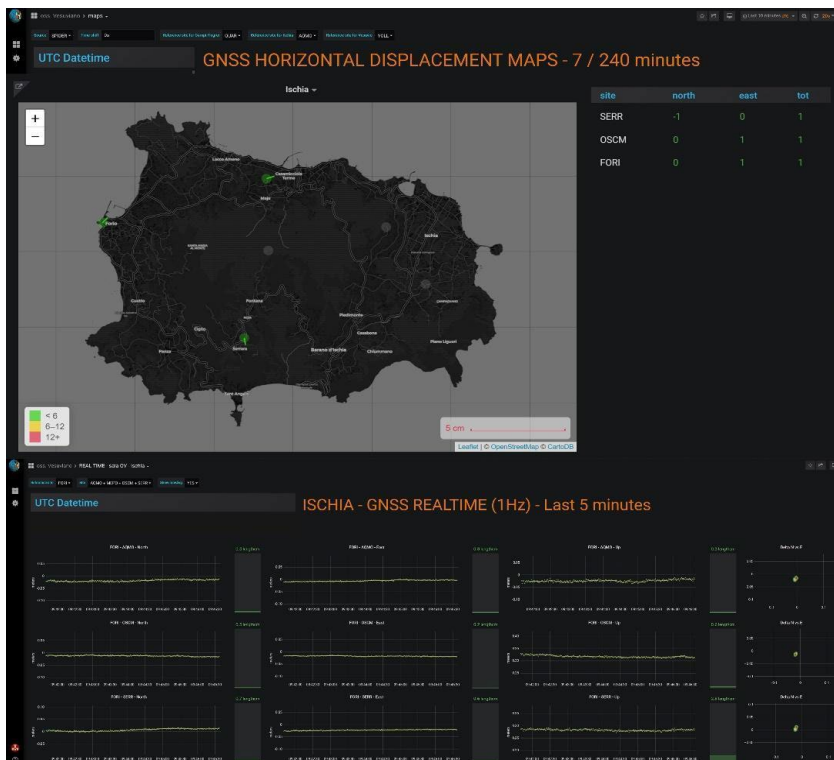


Figura 2.1.2 - (RTView_OV) Sistema di visualizzazione ed analisi in tempo reale dei dati GNSS ad alta frequenza (1 Hz) operativo in Sala di Monitoraggio per Ischia.

L'analisi delle serie temporali GNSS conferma la generale subsidenza dell'isola con valori più elevati nel settore centro-meridionale (Fig. 2.1.3), corrispondente al blocco del Mt. Epomeo. La velocità di subsidenza della stazione GNSS di Serrara Fontana (SERR) a partire dal 2023 è leggermente inferiore ai valori medi pluriennali riportati nei precedenti bollettini (circa -7 mm/anno).

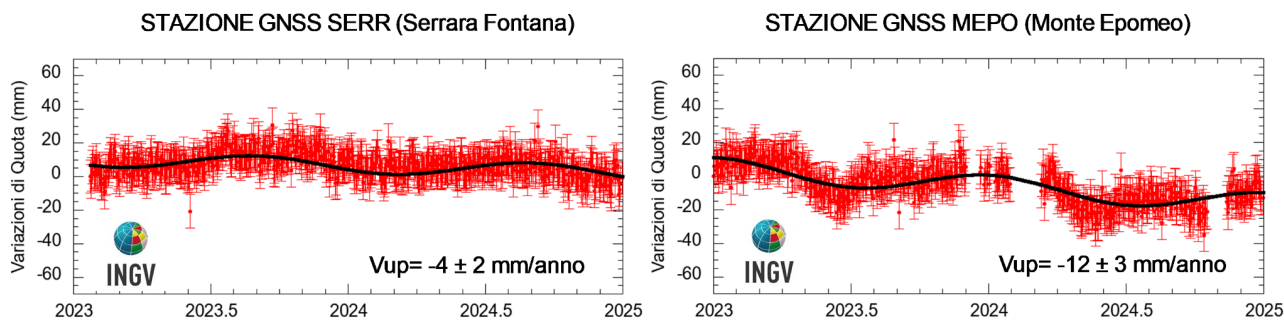


Figura 2.1.3 - Serie temporali delle variazioni giornaliere della componente verticale delle stazioni di SERR e MEPO (Ischia) da gennaio 2023 a dicembre 2024.

2.2 RETE TILTMETRICA

I. Aquino¹, V. Augusti¹, F. De Cicco¹, M. Papaccio¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano – Napoli

La rete tiltmetrica operante nell'area dell'isola di Ischia è costituita da 3 siti con sensori digitali borehole (da pozzo) mod. Lily (Jewell Instrument) e 2 siti aggiuntivi da attrezzare con ulteriori sensori digitali da pozzo, mod. Lily. La geometria della rete è mostrata in figura 2.2.1 e in Tabella 2.2.1 sono riportati i nomi delle stazioni, le coordinate, le specifiche della strumentazione, gli intervalli di acquisizione dati ed i sistemi di trasmissione utilizzati.

Il tiltmetro mod. Lily (della Jewell Instrument) è un sensore digitale borehole biassiale con una risoluzione inferiore a 5 nanorads, è dotato di sensore termico e di una bussola magnetica. Le stazioni tiltmetriche sono alimentate tramite rete elettrica dove è possibile, o tramite pannello solare e dotate di batterie tampone. Tutte le stazioni acquisiscono 1 dato al minuto, i dati vengono archiviati in un datalogger e inviati al Centro di Monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano.



Figura 2.2.1 – Mappa della Rete Tiltmetrica di Ischia.

I segnali registrati dalle stazioni tiltmetriche dell'isola di Ischia consistono in serie temporali delle variazioni di inclinazione del suolo lungo due piani ortogonali (NS ed EW), di temperatura e bussola magnetica (solo per i sensori digitali) e di pressione atmosferica (per i sensori analogici).

Le sequenze tiltmetriche considerate per il calcolo del campo di inclinazione del suolo derivano dai segnali originali registrati ad ogni stazione borehole.

L'alta risoluzione dei sensori tiltmetrici borehole consente di registrare variazioni di inclinazione del suolo anche associabili a variazioni locali dovute a migrazione di fluidi

in aree ad elevata fratturazione che si sovrappongono alle variazioni dovute al campo di deformazione principale.

Tabella 2.2.1 – Stato della Rete Tiltmetrica di Ischia

Stazione	Coordinate	Località	Sensore	Profondità	Acquisizione	Trasmissione
ISC	40.7362N 13.9343E 173 m s.l.m.	Acquedotto EVI, Ischia	Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri	1'	Router UMTS
BRN	40.7140N 13.9268E 145 m s.l.m.	Cimitero Comunale, Barano d'Ischia	Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri	1'	Router UMTS
FOR	40.7091N 13.8785E 157 m s.l.m.	Scuola D'Abundo, Forio	Jewell Instrument mod. Lily	-27 metri	1'	Router UMTS
FOC	40.7589 N 13.8731 E 65 m s.l.m.	Forio Colombaia loc. Zaro	Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri		
SRF	40.7198 N 13.8978 E 447 m s.l.m.	Serrara Fontana Centro Polifunzionale	Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri		

L'odografo di Fig. 2.2.2 riassume il tilting registrato dalle stazioni digitali funzionanti, i cui segnali sono filtrati delle periodicità inferiori ad 1 giorno. In tale figura la deformazione relativa ad ogni sito-stazione è rappresentata con segmenti orientati di colore diverso che rappresentano la variazione progressiva registrata dal sensore.

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 la data di fine anno e/o di fine acquisizione e 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.

Nel 2024 il pattern di deformazione registrato dalla rete tiltmetrica dell'isola d'Ischia mostra un'inclinazione polarizzata in direzione Nord soprattutto nel settore orientale dell'isola.

Le informazioni relative alla variazione tiltmetrica che si osserva nel 2024 è parziale in quanto si sono verificati problemi tecnici a due delle tre stazioni attualmente funzionanti. In particolare, alla stazione FOR (installata presso un edificio scolastico) il sistema di acquisizione è stato temporaneamente rimosso a causa di lavori di edilizia scolastica. Mentre alla stazione BRN si è verificato un malfunzionamento del sensore per cui la serie temporale si è interrotta il 31/3/2024. I pochi mesi di dati disponibili mostrano un'inclinazione del suolo in direzione NNW.

I segnali registrati alla stazione ISC mostrano, complessivamente, un'inclinazione del suolo in direzione Nord tranne nel periodo 25/8 – 3/9 durante il quale si è verificata una repentina inclinazione a Est legata presumibilmente a dissesti locali.

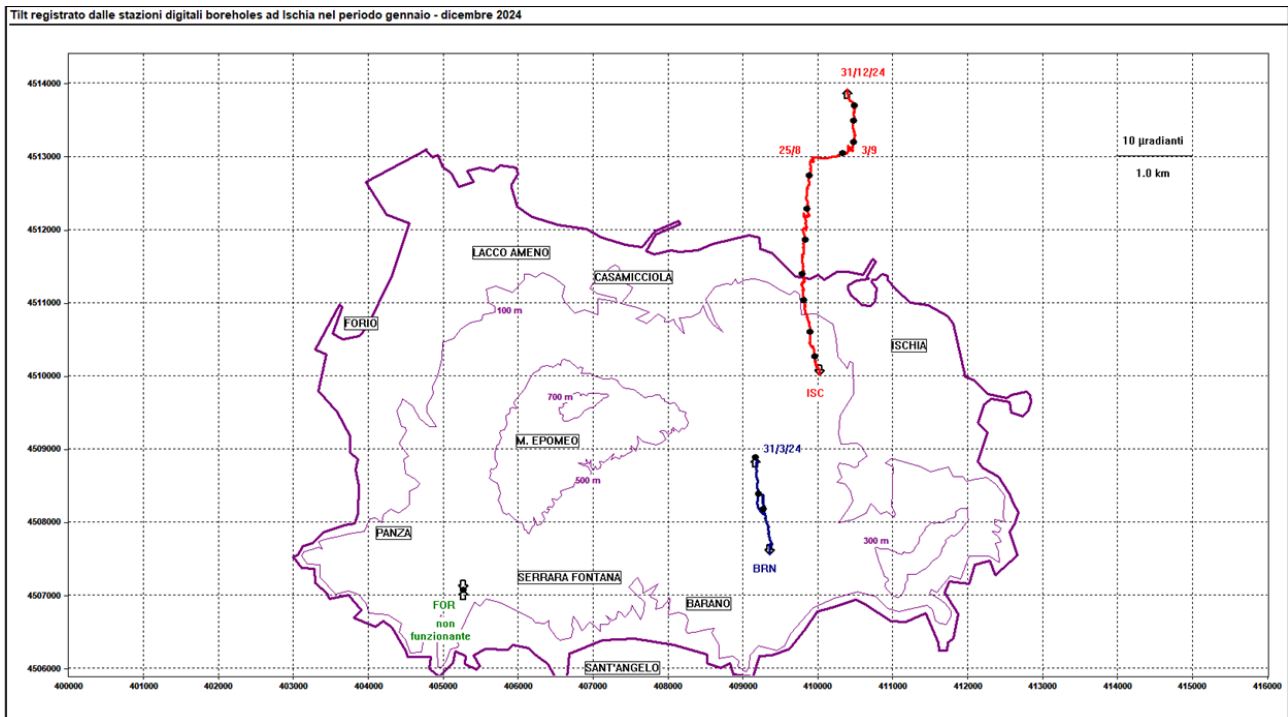


Figura 2.2.2 – Pattern tiltmetrico registrato all’isola d’Ischia nel 2024 dai sensori ISC (rosso), FOR (verde) e BRN (blu) ubicati a 25 m di profondità. Il lato di ogni maglia del reticolo equivale a 10 μ radianti o 1 km. I pallini neri sovrapposti ai vettori tilt indicano intervalli di un mese. FOR non funzionante, BRN si interrompe il 31/3/2024

Nella Tabella 2.2.2 sono riportati, per le 3 stazioni digitali i valori cumulativi della variazione di inclinazione del suolo in μ radianti, della variazione di temperatura registrata a fondo pozzo (\approx -25 m dal p.c.) e della direzione di tilting acquisite nel corso del 2024.

Tabella 2.2.2 - Tilt registrato, variazione termica e azimuth relativi alle stazioni digitali nel 2024.

Stazione	Inclinazione	Temperatura	Azimuth
Stazione FOR (157 m s.l.m.)	-	-	-
Stazione BRN (145 m s.l.m.)	13.3 μ radianti a NNW	-0.04 °C	351°
Stazione ISC (173 m s.l.m.)	38.9 μ radianti a N	0.05 °C	5°

2.3 RETE GRAVIMETRICA

S. Carlino¹, T. Pivetta¹, G. Ricciardi¹, A. Fedele¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

L'ultima campagna gravimetrica (misure relative) per l'Isola d'Ischia è stata svolta nel mese di maggio 2024. Le misure sono state eseguite su 29 vertici della rete (Figura 2.3.1), collegati alla stazione gravimetrica assoluta di Napoli (Largo San Marcellino), assunta come riferimento. Le misure gravimetriche relative sono state eseguite sia con il gravimetro LaCoste & Romberg modello D numero 85 (LCR-D85) che con il nuovo gravimetro Scintrex-CG6-574. Le osservazioni sono state corrette per gli effetti di variazione della marea solida, del carico atmosferico e della deriva strumentale.



Figura 2.3.1 - Vertici della rete gravimetrica dell'OV-INGV Isola d'Ischia (www.ov.ingv.it). Il caposaldo assoluto di riferimento della rete è localizzato presso il complesso di Largo San Marcellino (Napoli) e non è riportato in mappa.

La successiva compensazione degli errori di chiusura è stata eseguita su un numero di 5 circuiti concatenati dell'intera rete, avvalendosi del codice GSadjust (Kennedy, 2020), ottenendo un errore medio sulla rete pari a $\pm 12 \mu\text{Gal}$ ($1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{m/s}^2$, equivalente a 10^{-9}g) per quanto riguarda le misure effettuate con lo strumento LCR-D85 e di $\pm 6 \mu\text{Gal}$ per il CG6-574. Sono state in seguito calcolate le differenze dei valori di gravità, per ogni singola stazione della rete, rispetto alla stazione di riferimento di Napoli. La mappa delle differenze tra i valori di gravità della campagna del 2024 rispetto alla precedente del 2023 è riportata in figura 2.3.2. Viste le modeste deformazioni (subsidenza) dell'isola, dell'ordine di pochi millimetri all'anno, non sono state applicate correzioni di gravità per l'effetto delle variazioni di quota. Le variazioni spaziali di gravità mostrano in generale valori nel range $\pm 10 \mu\text{Gal}$ al limite dell'incertezza della misura, ad eccezione della zona dell'Epomeo nel settore sud di Serrara Fontana, dove si osservano variazioni positive fino a circa $30 \mu\text{Gal}$ (Figura 2.3.2). Come osservato dalle precedenti campagne gravimetriche il settore del blocco risorgente del Monte Epomeo è l'area dove

generalmente si verificano le maggiori oscillazioni delle variazioni di gravità, da correlare probabilmente alle variazioni nella circolazione del sistema idrotermale.

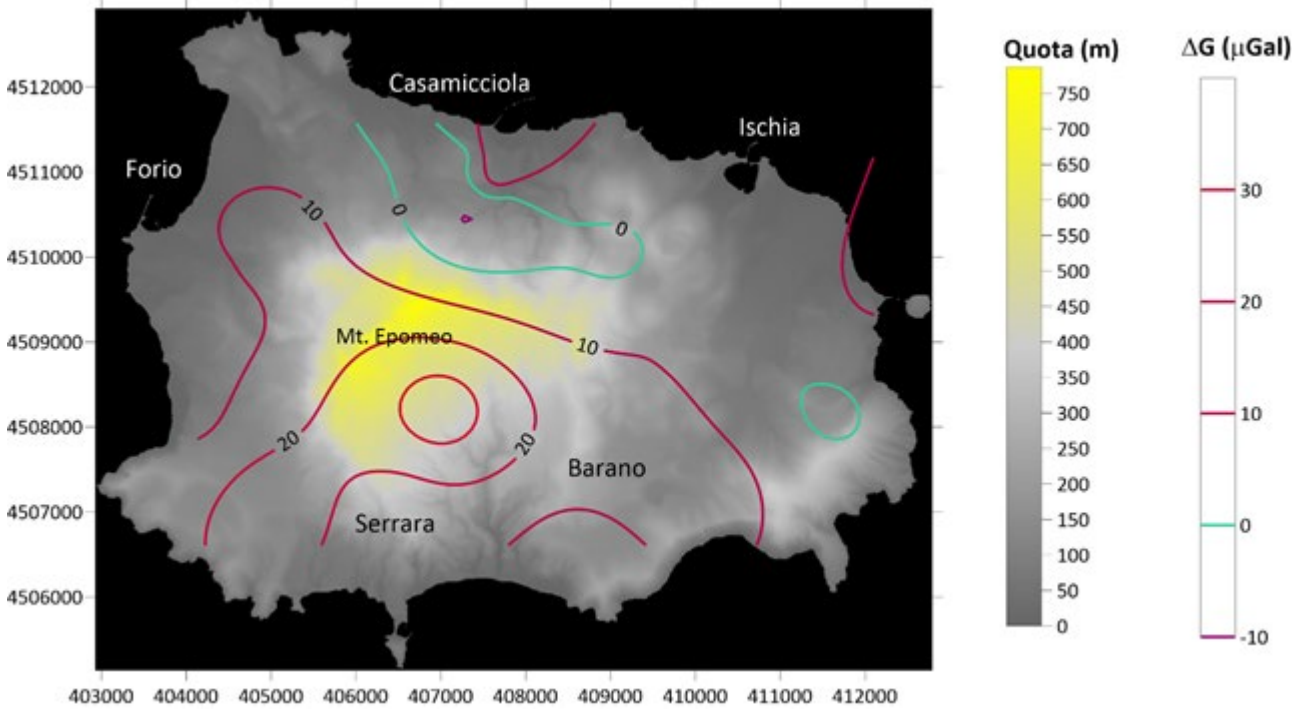


Figura 2.3.2 - Mappa delle variazioni di gravità in μGal , riferite al caposaldo di Napoli (Largo San Marcellino), misurate tra la campagna gravimetrica di maggio 2024 e quella di maggio 2023.

2.4 MONITORAGGIO SATELLITARE

V. Siniscalchi¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

Il monitoraggio interferometrico delle deformazioni del suolo dell'isola di Ischia utilizza i dati Radar ad Apertura Sintetica (SAR) acquisiti dai sensori Sentinel 1A dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA, European Space Agency) operanti in banda C ($\lambda=5.6$ cm) e disponibili a titolo gratuito sui canali web della stessa Agenzia.

L'elaborazione dei dati InSAR è stata eseguita con il supporto del software commerciale Sarscape®, operativo su piattaforma ENVI®. Per la rimozione del contributo topografico nella fase interferometrica è stato utilizzato un DEM SRTM dell'area con una risoluzione spaziale di 30 m.

ANALISI MULTI-TEMPORALE 2024

Il monitoraggio interferometrico in modalità multi-temporale dell'isola d'Ischia per l'anno 2024, è stato effettuato a partire da un *dataset* composto da 31 immagini in geometria ascendente (dallo 01.01.2024 al 26.12.2024, *track* 44) e 28 immagini in geometria discendente (dal 12.01.2024 al 25.12.2024, *track* 22). I dati utilizzati sono quelli acquisiti dal solo sensore Sentinel 1A poiché la missione di Sentinel 1B, a causa di anomalie al sistema di alimentazione riscontrate a partire dal 23.12.2021, è stata successivamente dichiarata conclusa.

L'elaborazione ha restituito una rete di 166 interferogrammi per l'orbita ascendente e 139 interferogrammi per l'orbita discendente, con Baseline temporale $B_{tmax} = 90$ gg e Baseline perpendicolare $B_{\perp max}$ in valore assoluto = 90.1m per l'orbita ascendente e 98.3m per l'orbita discendente.

Avendo a disposizione per lo stesso intervallo temporale, sebbene distanziati di un giorno, i dati provenienti da entrambe le orbite, è stato possibile scomporre lo spostamento in LoS (*Line of Sight*) nelle componenti Verticale ed Est-Ovest. Nella Figura 2.4.1 è riportata la sola mappa della velocità media di deformazione lungo la componente Verticale essendo la deformazione della componente Est-Ovest poco rilevante.

Avendo a disposizione per lo stesso intervallo temporale, sebbene distanziati di un giorno, i dati provenienti da entrambe le orbite, è stato possibile scomporre lo spostamento in LoS (*Line of Sight*) nelle componenti Verticale ed Est-Ovest. Nella Figura 2.4.1 è riportata la sola mappa della velocità media di deformazione lungo la componente Verticale essendo la deformazione della componente Est-Ovest poco rilevante

Nonostante la decorrelazione che interessa buona parte dell'isola e la presenza di effetti legati a residui atmosferici, dall'analisi della mappa della velocità media di deformazione verticale del suolo, si evidenzia la generale subsidenza che interessa l'isola e, in particolare, il settore nord-occidentale (Fig. 2.4.1, riquadro rosso) a ridosso del Monte Epomeo (zona Casamicciola – Fango). La serie temporale (Figura 2.4.2), estratta da un pixel coerente nella suddetta area, mostra un valore della subsidenza di circa -9.2 mm/anno, in accordo con i risultati riportati in letteratura.

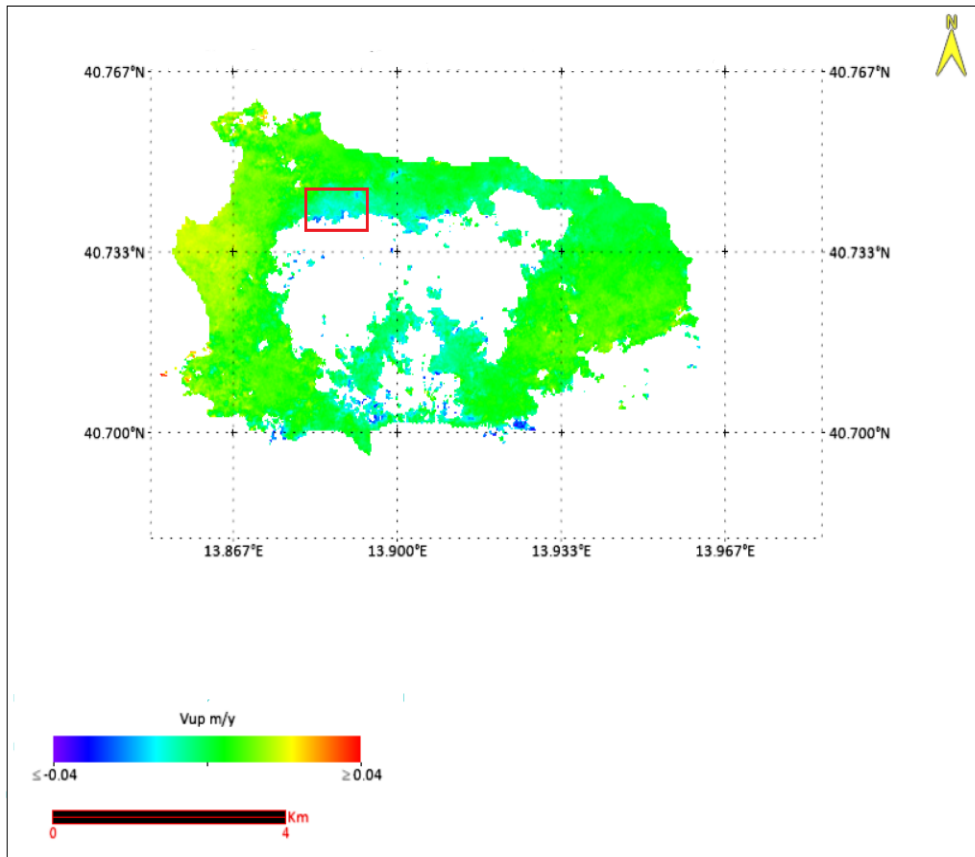


Figura 2.4.1 - Mappa della componente verticale della velocità media di deformazione del suolo, ottenuta per l'anno 2024 processando i dati provenienti da orbite ascendenti (track 44) e discendenti (track 22).

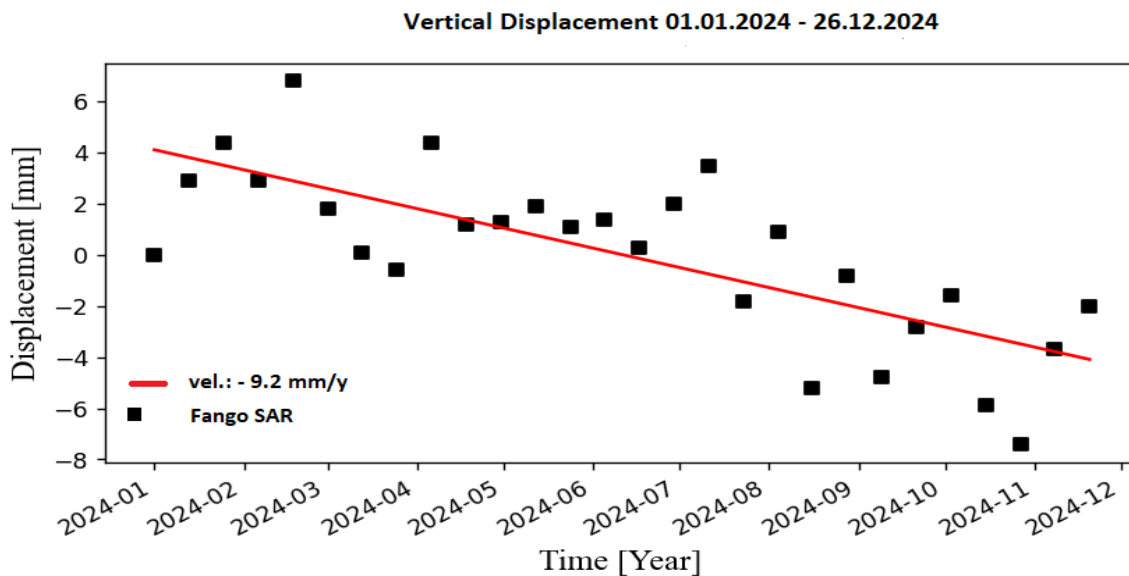


Figura 2.4.2 - serie temporale di un pixel coerente nell'area di Fango (riquadro rosso nella fig.2.4.1).

3- MONITORAGGIO VULCANOLOGICO

3.1 MONITORAGGIO TERMICO CON TERMOCAMERA MOBILE E TERMOCOPPIA

E. Marotta¹, R. Avino¹, G. Avvisati¹, P. Belviso¹, A. Carandente¹, R. Peluso¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano – Napoli

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

I rilievi sono eseguiti mensilmente effettuati in genere in nove punti stazione, ubicati in diversi contesti strutturali (Figura 3.1a-h), 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°C +30°C). La termocoppia utilizzata è di tipo K, con errore strumentale di circa 0.1°C nell'intervallo -200÷1260 °C. Le misure ottenute con la termocamera sono confrontate, quando possibile, con quelle eseguite con termocoppia rigida.

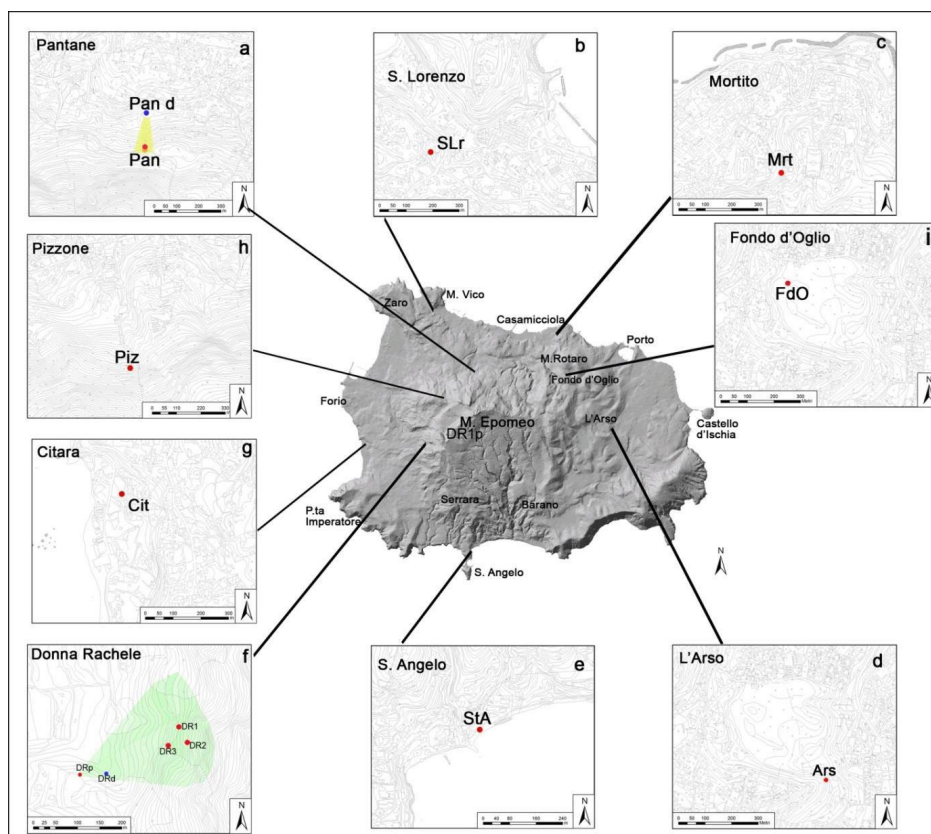


Figura 3.1 – Ubicazione dei punti di misura a Ischia.

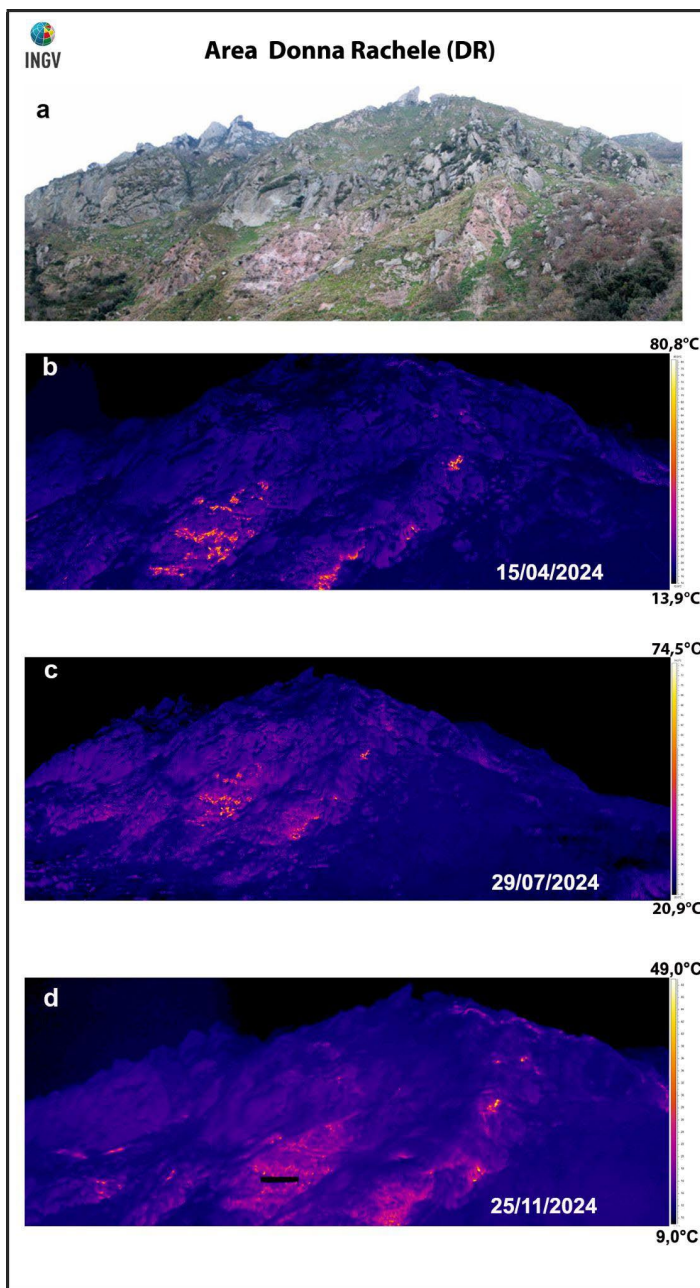
Da dicembre 2020 si utilizza una nuova termocamera FLIR T1020 a maggiore risoluzione (1024 x 768 pixel). Per circa un anno, contemporaneamente alla FLIR T1020 si è

continuato ad utilizzare anche la FLIR SC640. La doppia misura ha consentito di calibrare i valori rilevati con la nuova termocamera.

Da aprile 2022, in alcuni siti e quando le condizioni lo consentono, contestualmente alla FLIR T1020, le misure di temperatura possono essere rilevate anche con l’ausilio di un drone equipaggiato con una termocamera FLIR VUEPRO ad alta risoluzione (640x512 pixel) e precisione ± 5 °C.

Nel corso del 2024, in generale, non ci sono significative variazioni di temperatura massima e modificazioni nella distribuzione areale del campo fumarolico nei diversi punti di misura.

LOCALITÀ DONNA RACHELE – FORIO



La comparazione delle fotocomposizioni di immagini termiche del versante occidentale del Monte Epomeo, riprese dal punto stazione DRp (Fig. 3.1f) durante il 2024, non evidenzia significative variazioni nella distribuzione areale del campo fumarolico (Fig. 3.2 b, c, d) anche rispetto ai mesi precedenti.

Figura 3.2 - Versante in località Donna Rachele a Ischia. Fotocomposizioni di immagini nel visibile (a) e delle corrispondenti immagini termiche relative al 15/04/2024 (b), 29/07/2024 (c) e 25/11/2024 (d) dal punto stazione DRp di Figura 3.1.

S. ANGELO

In località S. Angelo, nel settore meridionale di Ischia (Figura 3.1e), i valori di temperatura massima misurati con termocamera e quelli misurati con termocoppia rigida sono simili e si attestano intorno ai 100 °C (Figura 3.3c). Non si segnalano variazioni significative rispetto agli anni precedenti.

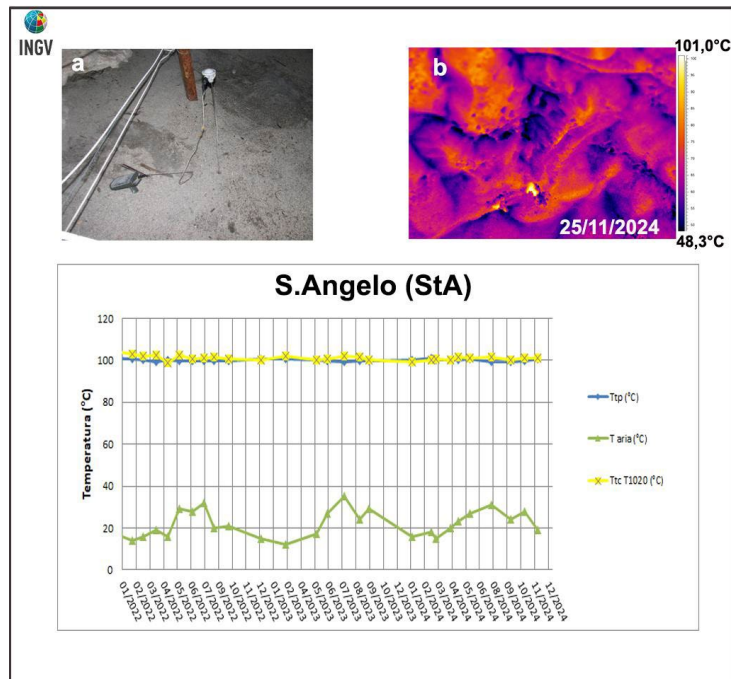
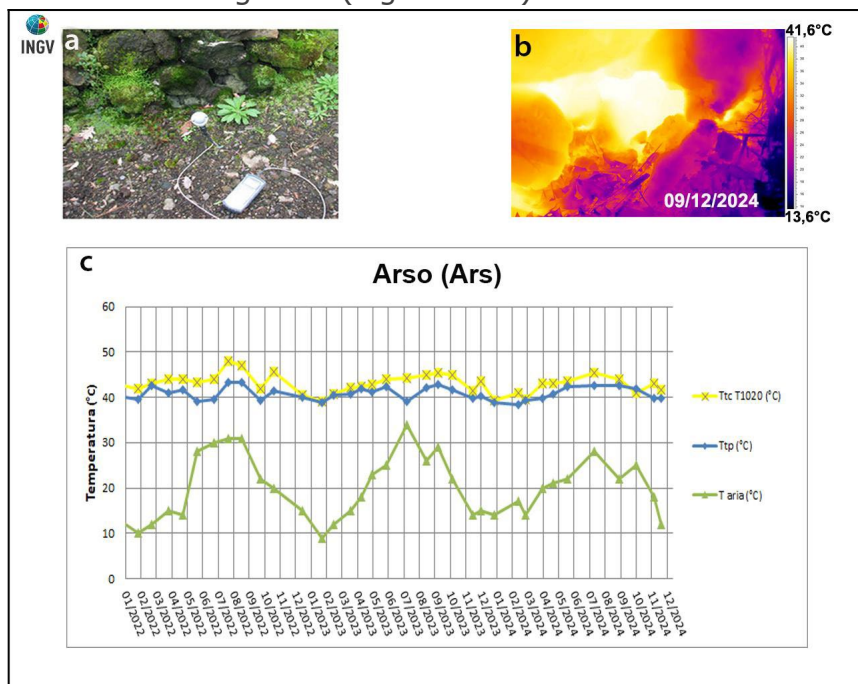


Figura 3.3 – Fumarola in località S. Angelo a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione StA di Figura 3.1e. Valori massimi di temperatura con termocamera FLIR T1020 (TtcT1020) e valori di temperatura della termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell’aria (Taria) misurata nel momento del rilievo termico, da gennaio 2021 a dicembre 2024 (c).

CRATERE DELL’ARSO

All’interno del cratere dell’Arso, nel settore orientale dell’isola di Ischia (Figura 3.1d), i valori di temperatura massima misurati con termocamera e i valori di temperatura misurati con termocoppia rigida sono piuttosto stabili, confermando l’andamento dei mesi precedenti, a meno delle variazioni stagionali (Figura 3.4c).

Figura 3.4 - Cratere dell’Arso a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione Ars di Figura 3.1d. Valori massimi di temperatura con termocamera FLIR T1020 (TtcT1020) e con termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell’aria (Taria) misurata nel momento del rilievo termico, da gennaio 2022 a dicembre 2024 (c).



PANTANE

In località Pantane, a nord del Monte Epomeo (Fig. 3.1a), i valori di temperatura massima misurati con termocamera e i valori di temperatura misurati con termocoppia rigida sono piuttosto stabili, confermando l'andamento dei mesi precedenti, a meno delle variazioni stagionali (Figura 3.5c).

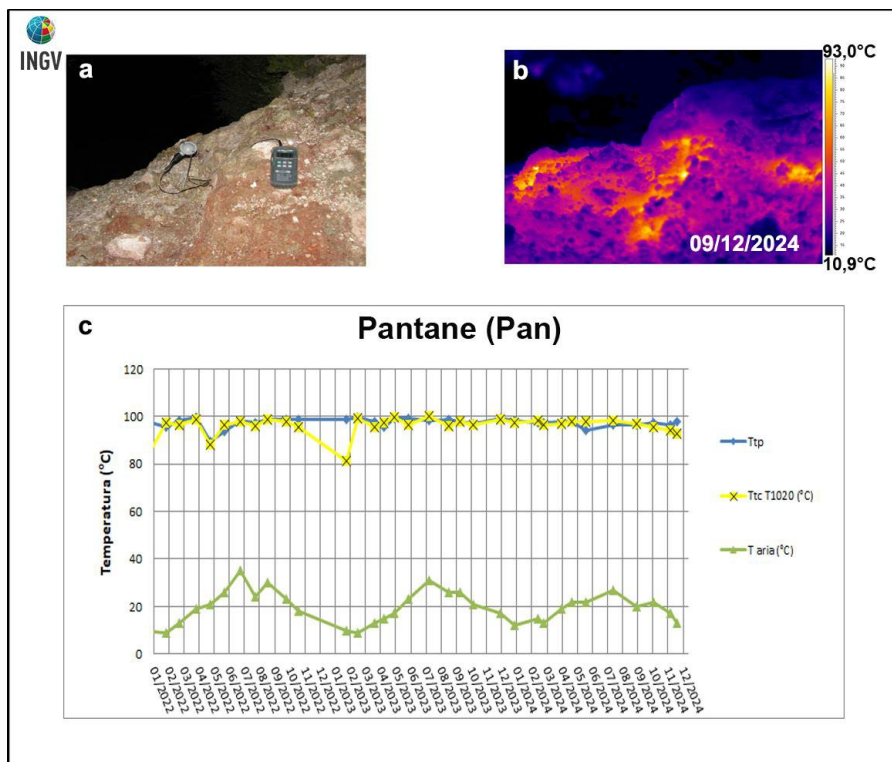


Figura 3.5 – Fumarola in località Pantane a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto di misura Pan di Fig. 3.1a. Valori massimi di temperatura (in °C) con termocamera FLIR T1020 (TtcT1020) e con termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell'aria (Taria) misurata nel momento del rilievo termico, da gennaio 2022 a dicembre 2024 (c).

In Figura 3.6a è mostrata una delle fotocomposizioni di immagini termiche rilevate da drone sul versante di Pantane, in cui si distinguono due aree a maggiore temperatura: una in basso che presenta la temperatura massima dell'intera fotocomposizione (linea rossa sul grafico), ed una sulla parte alta relativa al punto di misura "Pan" delle figure 3.1a (linea viola sul grafico 3.6b).

In Figura 3.6b è riportato un grafico con tutte le temperature massime misurate nel tempo con termocamera, termocoppia e da drone confrontate con la temperatura dell'aria rilevata al momento del rilievo. I voli sono stati eseguiti mantenendo un'altezza costante di 55 m dal suolo con una restituzione di pixel a terra di circa 10,4 cm. La temperatura massima rilevata da drone nel corso del 2023 è di circa 90°C.

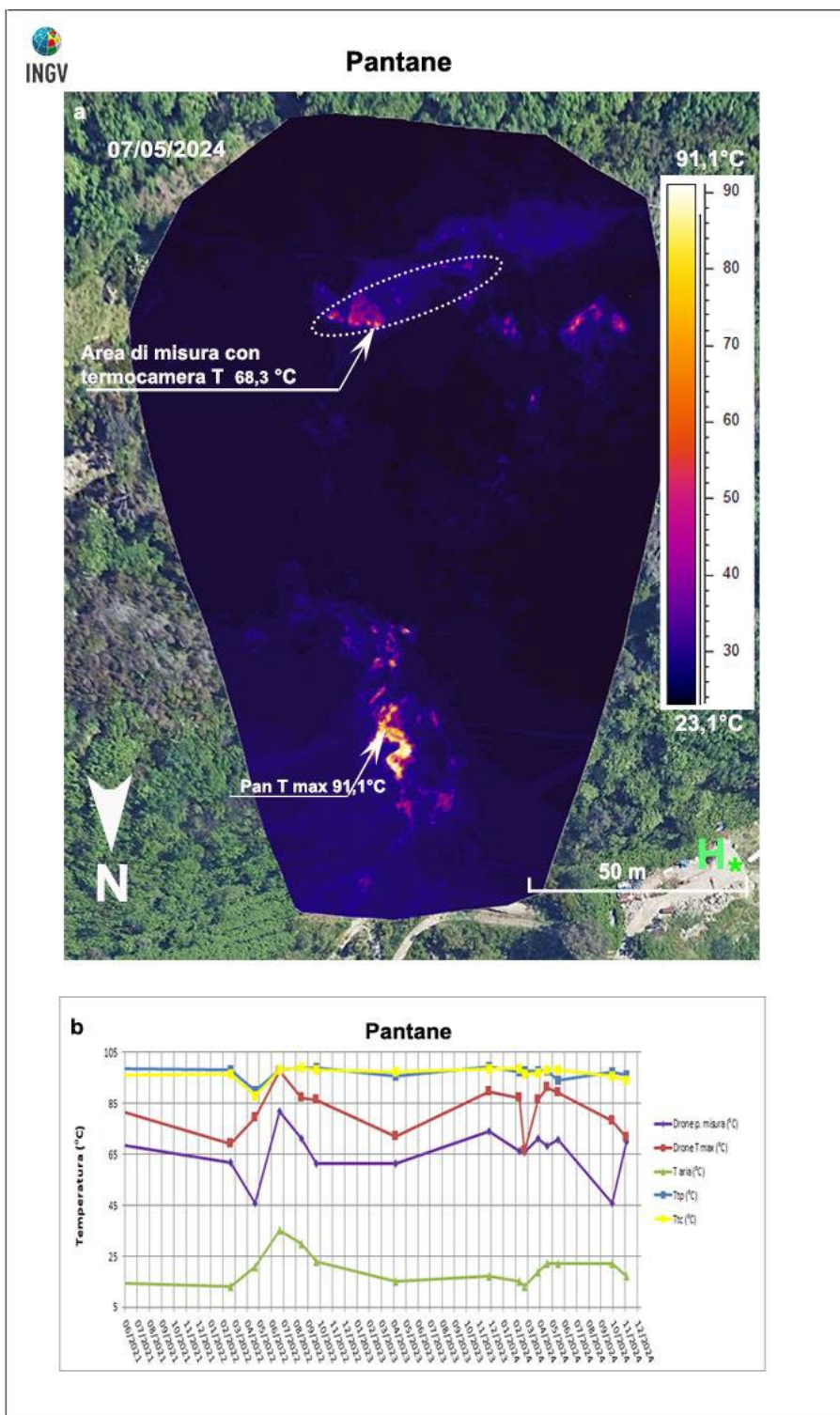


Figura 3.6 – Fotocomposizione di immagini termiche rilevate da drone nel mese di maggio 2024. H* indica il sito di decollo e di atterraggio del drone. L’area racchiusa dalla linea tratteggiata bianca è quella dove vengono effettuate le misure termiche mensili (sito “Pan” di Figura 3.1a). Il grafico (c) mostra i valori massimi di temperatura da giugno 2021 a dicembre 2024, rilevati: con il drone sia sull’intera area mappata (“Drone Tmax”) sia all’interno dell’area corrispondente ai punti di misura con termocamera mobile e termocoppia (“D misura”); con la termocamera FLIR T1020 (Ttc); con la termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell’aria (Taria) misurata nel momento del rilievo termico.

PIZZONE

In località Pizzone, a nord-ovest del Monte Epomeo (Figura 3.1h), i valori di temperatura massima misurati con termocamera e quelli misurati con termocoppia rigida sono piuttosto stabili e confermano l’andamento dei mesi precedenti, a meno delle variazioni stagionali (Figura 3.7c).

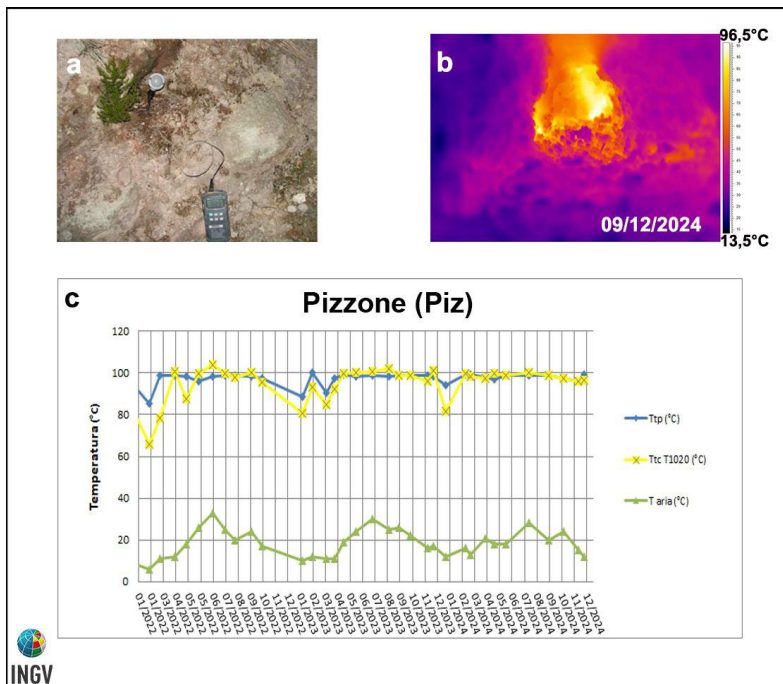


Figura 3.7 – Fumarola in località Pizzone a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione Piz di Fig. 3.1h. Valori massimi di temperatura con termocamera FLIR T1020 (TtcT1020) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell’aria (Taria) misurata nel momento del rilievo termico, da gennaio 2022 a dicembre 2024 (c).

In Figura 3.8 è mostrata una delle fotocomposizioni di immagini termiche rilevate da drone sull’area di Pizzone, in cui si distinguono due aree a maggiore temperatura: una in basso che presenta la temperatura massima dell’intera fotocomposizione, ed una sulla parte alta relativa al punto di misura “Piz” delle figure 3.1h e 3.7c (area racchiusa dal tratteggio bianco). I voli sono stati eseguiti mantenendo un’altezza costante di 55 m dal suolo con una restituzione di pixel a terra di circa 10,4 cm. La temperatura massima rilevata da drone nel corso del 2024 è di circa 69°C.

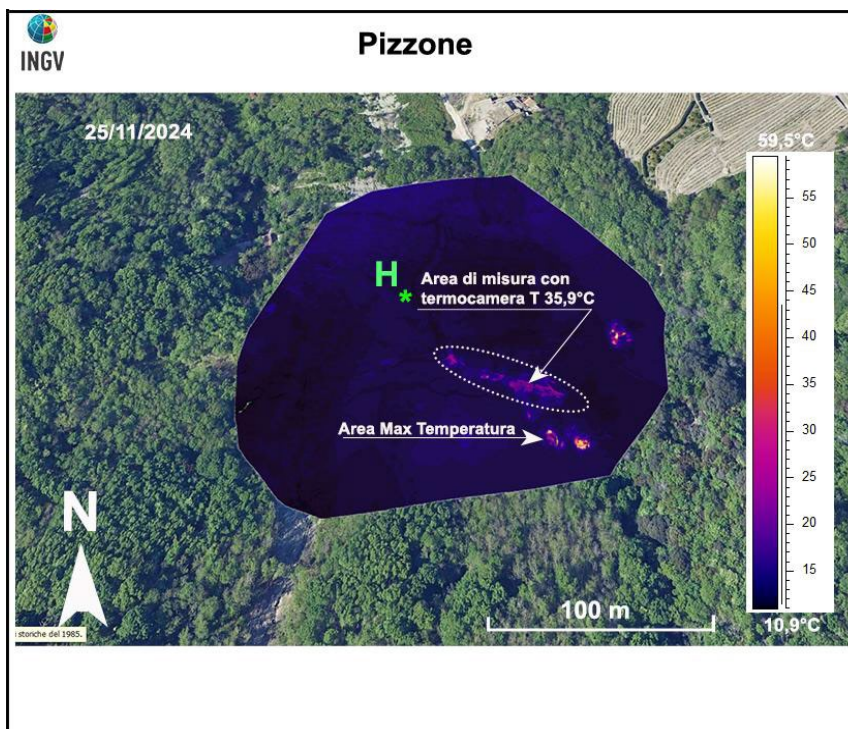
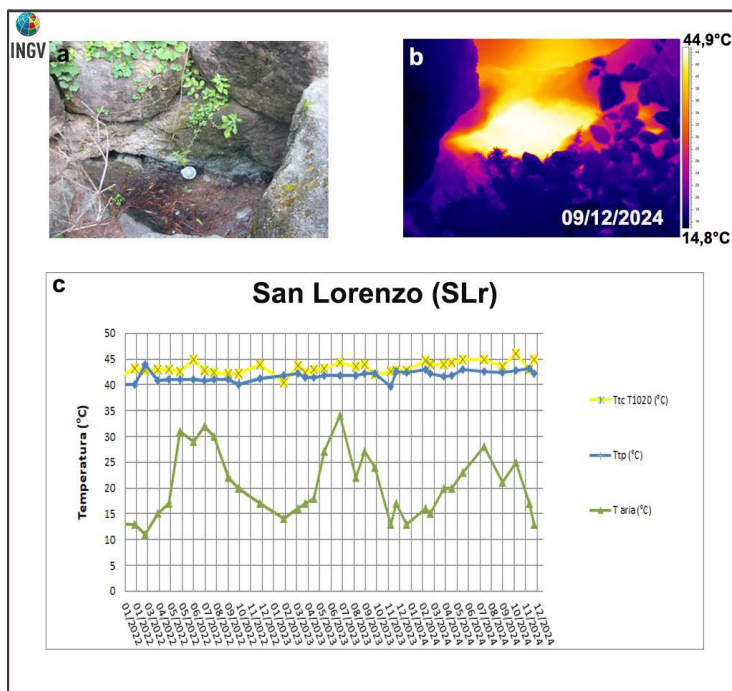


Figura 3.8 – Fotocomposizione di immagini termiche rilevate da drone nel mese di novembre 2024. H* indica il sito di decollo e di atterraggio del drone. L’area racchiusa dalla linea tratteggiata bianca è quella dove vengono effettuate le misure termiche mensili (sito “Piz” di Figura 3.1h).

S. LORENZO

In località S. Lorenzo, nel settore nord-occidentale di Ischia (Figura 3.1b), i valori di temperatura massima misurati con termocamera e quelli misurati con termocoppia rigida sono piuttosto stabili a meno delle variazioni stagionali e confermano l'andamento dei mesi precedenti (Figura 3.9c).

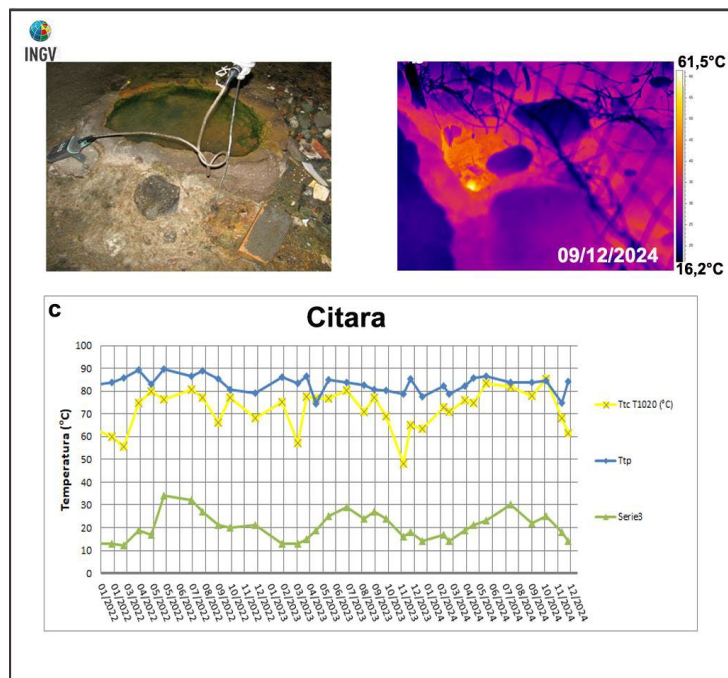
Figura 3.9 – Fumarola in località S. Lorenzo. Immagini nel visibile (a) e termico (b) riprese dal punto di stazione SLr di Fig. 3.1b. Valori massimi di temperatura con termocamera FLIR T1020 (TtcT1020) e con termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell'aria (Taria) misurata nel momento del rilievo termico, da gennaio 2022 a dicembre 2024 (c).



CITARA

In località Citara, nel settore occidentale di Ischia (Figura 3.1g), i valori di temperatura massima misurati con termocamera e con termocoppia rigida sono piuttosto stabili e confermano l'andamento dei mesi precedenti, a meno delle variazioni stagionali (Figura 3.10c).

Figura 3.10 – Fumarola in località Citara a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione Cit di Fig. 3.1g. Valori massimi di temperatura misurati con termocamera FLIR T1020 (TtcT1020) e con termocoppia (Ttp) confrontati con la temperatura dell'aria (Taria) misurata nel momento del rilievo termico, da gennaio 2021 a dicembre 2024 (c).



FONDO D’OGLIO

In località Fondo d’Oglio, nel settore nordorientale di Ischia (Figura 3.1i), i valori di temperatura massima misurati con termocamera e con termocoppia rigida sono

piuttosto stabili a meno delle variazioni stagionali e confermano l’andamento dei mesi precedenti (Figura 3.11c).

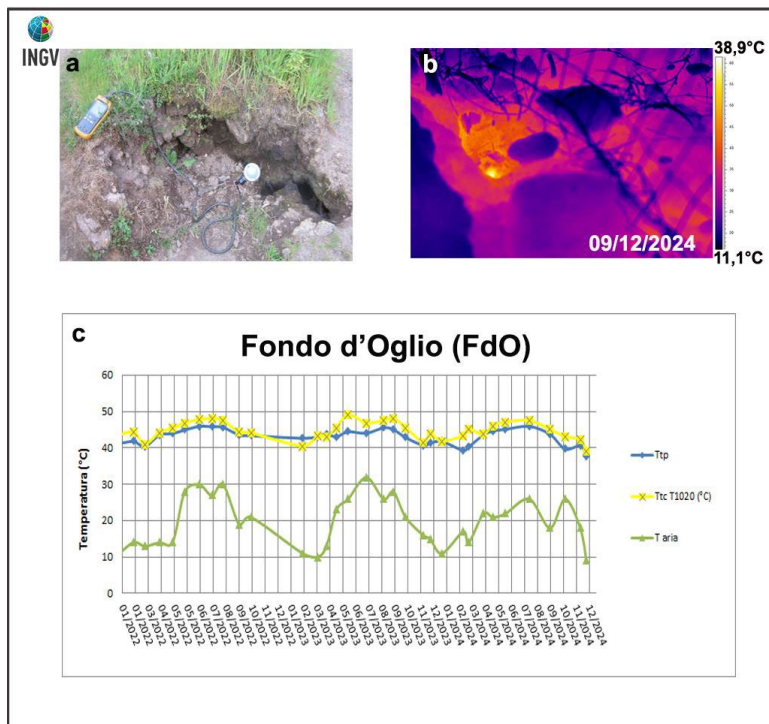


Figura 3.11 – Fumarola in località Fondo d’Oglio a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione FdO di Fig. 3.1i. Valori massimi di temperatura con termocamera FLIR T1020 (TtcT1020) e con termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell’aria (Taria) misurata nel momento del rilievo termico, da gennaio 2022 a dicembre 2024 (c).

MORTITO

In località Mortito, nel settore nord settentrionale di Ischia (Figura 3.1c), i valori di temperatura massima misurati con termocamera e con termocoppia rigida sono piuttosto stabili a meno delle variazioni stagionali e confermano l’andamento dei mesi precedenti (Figura 3.12c).

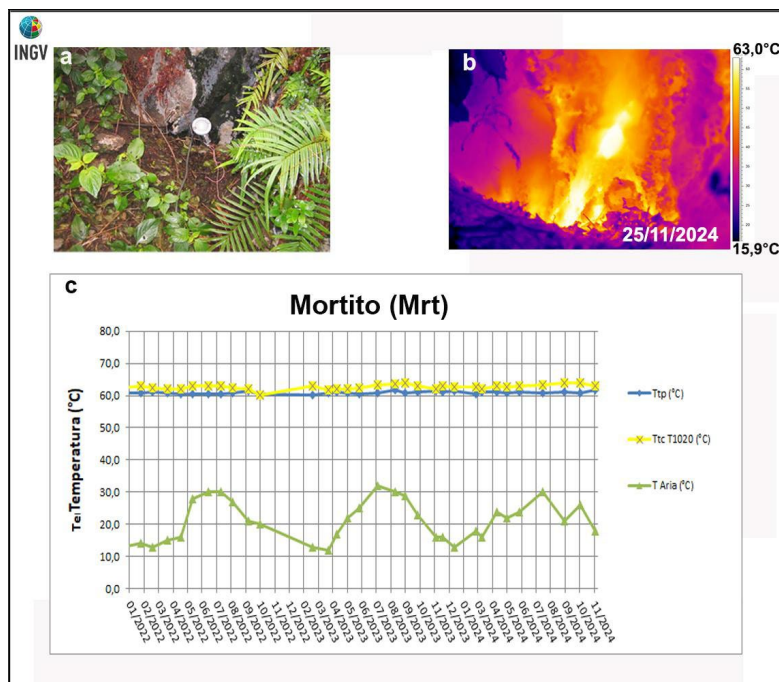


Figura 3.12 – Fumarola in località Mortito a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione Mrt di Fig. 3.1c. Valori massimi di temperatura con termocamera FLIR T1020 (TtcT1020) e con termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell’aria (Taria) misurata nel momento del rilievo termico, da gennaio 2022 a dicembre 2024 (c).

4 - MONITORAGGIO GEOCHIMICO

Le attività di sorveglianza geochimica all'Isola d'Ischia sono di competenza della Sezione INGV di Palermo e sono integrate da attività svolte dall'Osservatorio Vesuviano.

4.1 MONITORAGGIO GEOCHIMICO DELLA SEZIONE DI PALERMO

G. Pecoraino¹, S. Bellomo¹, W. D'Alessandro¹, L. La Pica¹, C. Scaletta¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

L'attività di sorveglianza geochimica dell'isola d'Ischia svolta dalla Sezione di Palermo consiste nel prelievo semestrale di di acque termali e di gas. Nell'ambito del programma di sorveglianza sono state campionate 14 acque termali (pozzi e sorgenti) e 2 emissioni gassose (Fig. 4.1.1). Dopo il sisma del 21 agosto 2017, sono stati aggiunti alla rete di monitoraggio 4 nuovi siti (3 pozzi e una sorgente) che hanno subito variazioni termiche prima del sisma.

Le variazioni chimico-fisiche dei gas e delle acque forniscono importanti indicazioni sulla circolazione dei fluidi e sulle dinamiche del sistema geotermico.

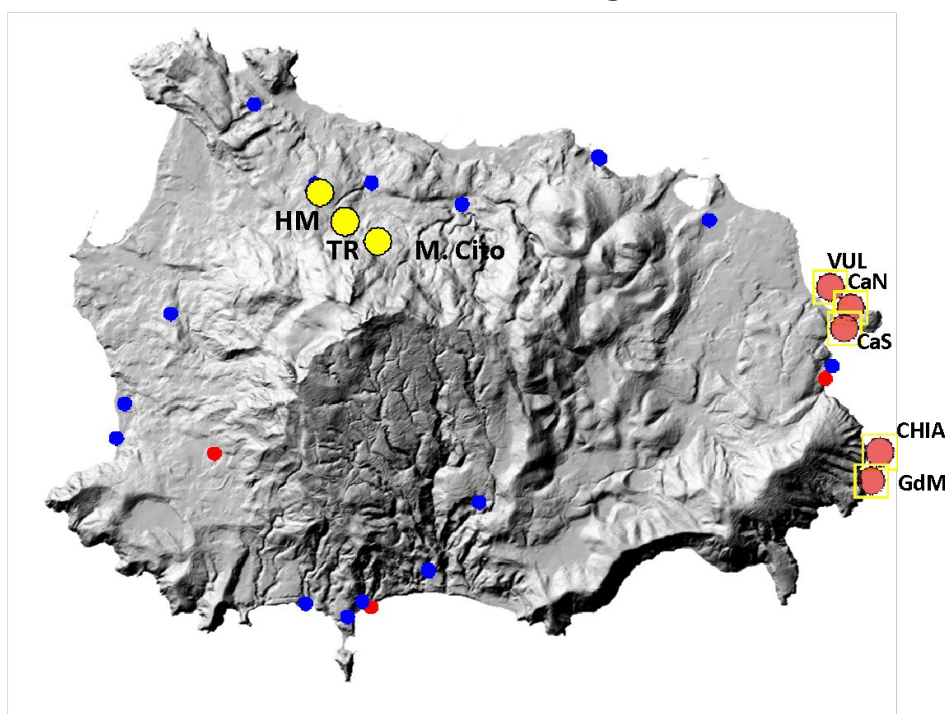


Figura 4.1.1 – Ubicazione dei punti di campionamento (cerchi blu acque, rossi gas, arancioni emissioni sottomarine).

I reservoir che costituiscono il sistema idrotermale dell'isola di Ischia alimentano settori differenti dell'isola: il più profondo (> 1000m), caratterizzato da temperature tra 150 e 300°C (Di Napoli et al., 2009, 2011) e bassa salinità, alimenta il settore di Casamicciola,

il più superficiale (150-300 m sotto il livello del mare), caratterizzato da temperature intorno a 150-200°C, alimenta i settori di Serrara Fontana e Citara.

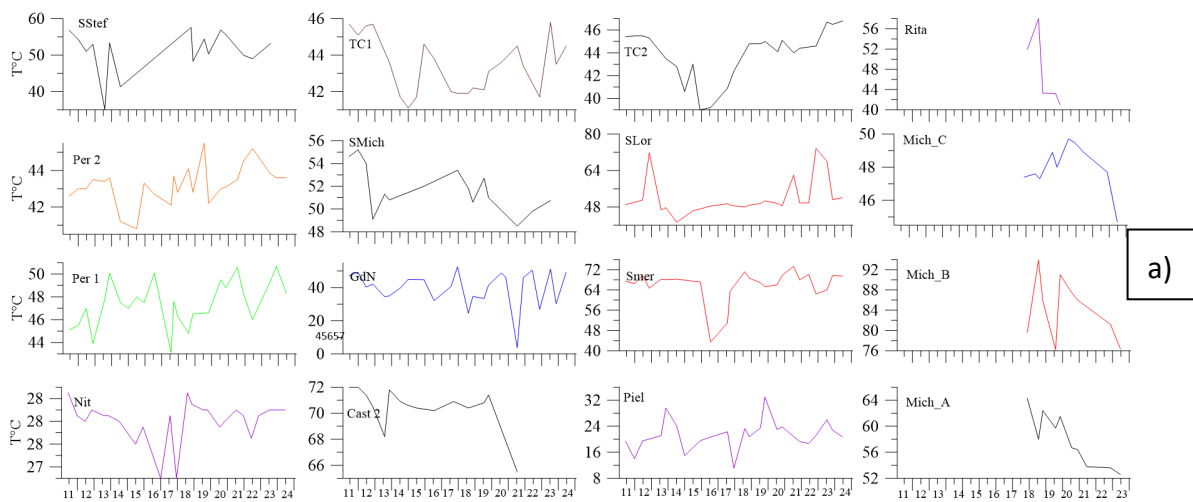
La composizione chimica delle acque termali riflette queste differenze ed è il risultato del mixing tra: acque idrotermali di origine meteorica di Casamicciola e Serrara Fontana caratterizzate da bassa salinità e quella di origine marina di Citara caratterizzata da acque a più alta salinità; acqua meteorica e acqua marina. La composizione delle acque sotterranee è determinata dal mescolamento in varie proporzioni tra due o più componenti e anche a fenomeni di interazione con rocce.

L'interazione tra fluidi di origine magmatica e i fluidi superficiali è confermata dalla composizione isotopica di C della CO₂ (tra 0 ‰ e -3.0 ‰) e dell'He (~ 3.5 R/Ra) nei fluidi campionati.

Durante il 2024 per il campionamento delle acque termali e dei gas fumarolici e gorgoglianti appartenenti alla rete geochimica di monitoraggio, come di consueto sono stati determinati sul campo i parametri chimico-fisici delle acque (pH, EC, T, Eh) e le temperature dei gas fumarolici. Nei laboratori dell'INGV-PA sono stati determinati: per le acque la composizione chimica (elementi maggiori e minori) e la composizione isotopica del δ²H e δ¹⁸O; per i gas la composizione chimica (CO₂, O₂, N₂, CO, H₂, CH₄) e le composizioni isotopiche di CO₂ (δ¹³C) ed He (Rc/Ra).

I dati chimico-fisici acquisiti non mostrano valori anomali, ma si attestano su range che rientrano nella variabilità stagionale (Fig. 4.1.2a, b, c).

Anche le composizioni chimiche delle acque nell'anno in esame non mostrano valori anomali e si attestano su variazioni che rientrano nella variabilità stagionale



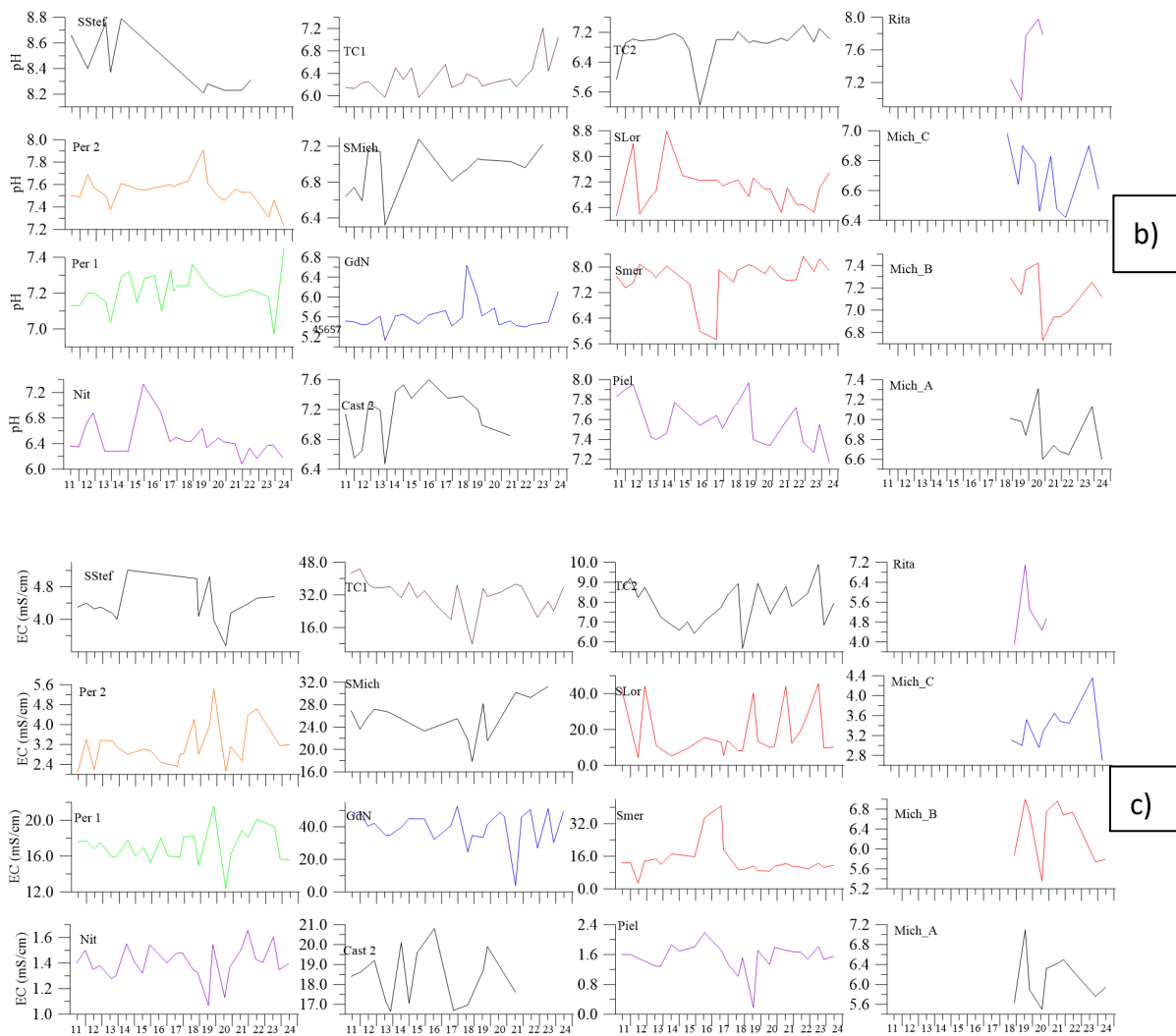


Figura 4.1.2 – Variazioni temporali di a) temperatura (°C), b) pH e c) conducibilità (EC, mS/cm²) delle acque campionate dal 2011 ad oggi.

L'interazione tra la CO₂ magmatica e la falda termale, evidenziata dalle concentrazioni di alcalinità totale (HCO₃⁻ e CO₃²⁻, Fig. 4.1.3) non presenta variazioni significative.

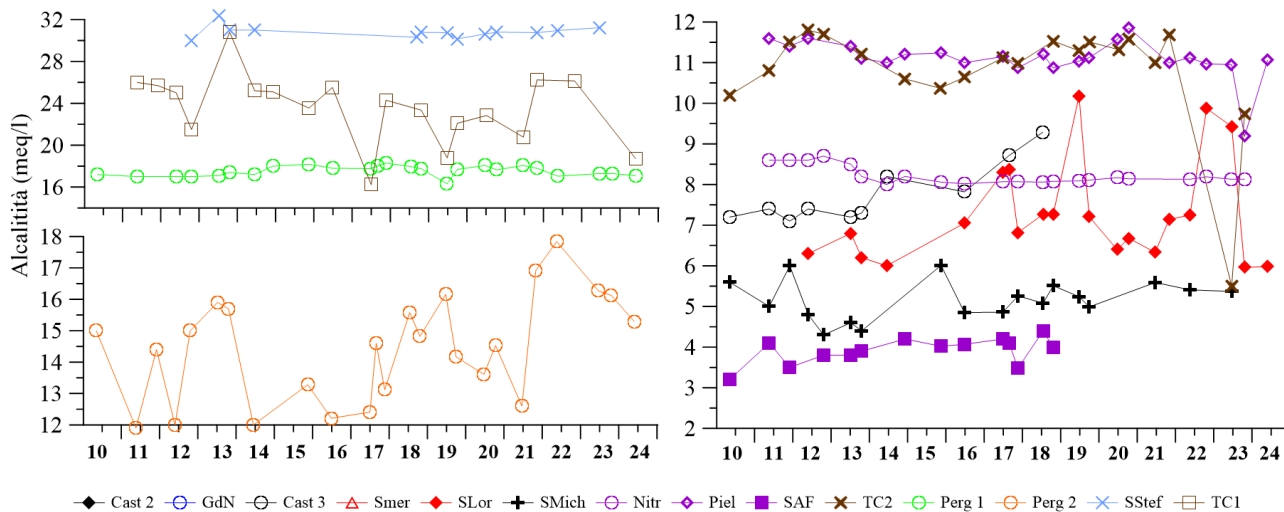


Figura 4.1.3 - Variazione temporale dell'alcalinità totale (meq/l) nelle acque campionate dal 2010 ad oggi.

Su tutti i campioni prelevati sono state effettuate stime di temperatura. I valori ottenuti non evidenziano variazioni di rilievo nel tempo riflettendo la stabilità del sistema vulcanico e geotermico (Fig. 4.1.4).

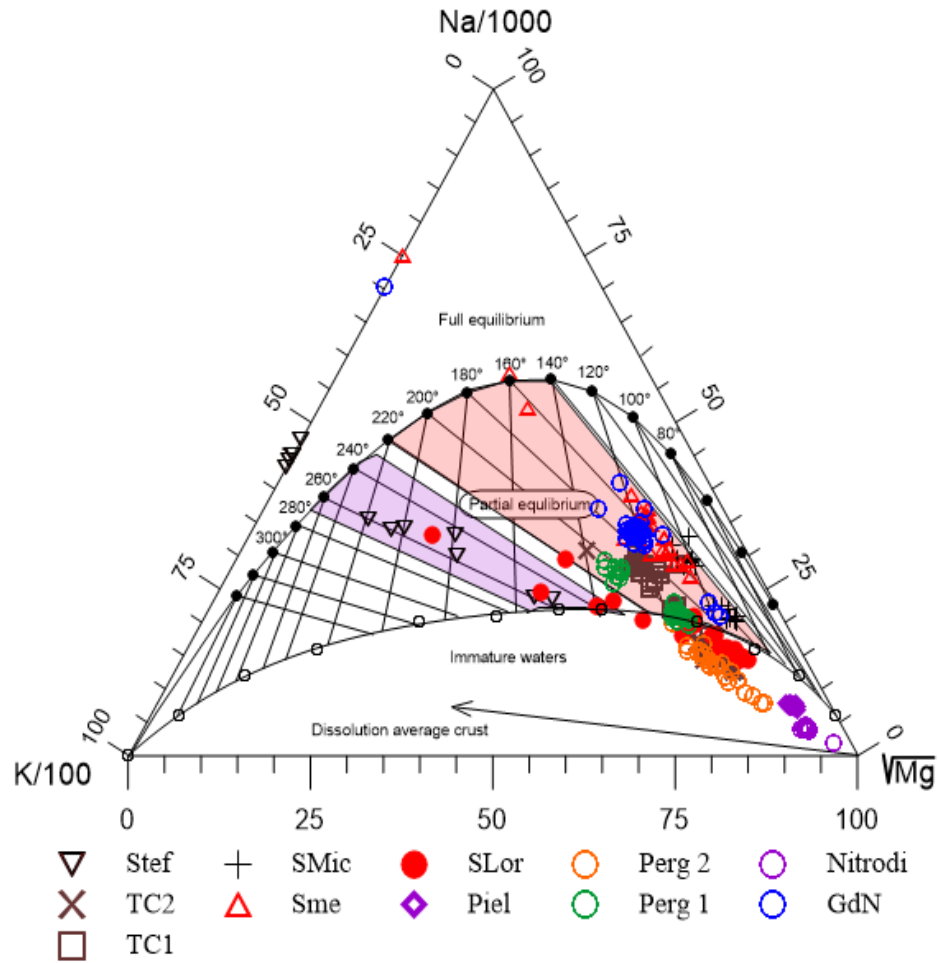


Figura 4.1.4 - Geotermometri in fase liquida.

La stabilità nei parametri sopra descritti, che perdura dall'ultimo decennio, indica una sostanziale stabilità delle condizioni dei reservoir geotermali.

4.2 ATTIVITÀ DELL'OSSERVATORIO VESUVIANO - STUDIO E MONITORAGGIO DELL'AREA FUMAROLIZZATA DI MT. CITO

S. Caliro¹, R. Avino¹, A. Carandente¹, E. Cuoco¹, C. Minopoli¹, F. Rufino¹, A. Santi¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano – Napoli

Durante il 2024 sono proseguite le attività di studio e monitoraggio dell'area fumarolizzata del Mt. Cito (località Pizzone), dove erano state segnalate variazioni dell'attività di degassamento in concomitanza con gli eventi sismici di agosto 2017. In particolare, era stato segnalato un aumento di temperatura delle fumarole e la presenza di vegetazione secca nelle aree limitrofe. A settembre 2017 era stata campionata per la prima volta in tempi recenti la maggiore emissione fumarolica nell'area in località Pizzone, caratterizzata da un elevato flusso e da una temperatura di emissione di ~98 °C. La composizione dei campioni raccolti indicava per il serbatoio idrotermale che alimenta queste manifestazioni condizioni di equilibrio a temperatura di ~230 °C e una bassa frazione di vapore separata. Temperature di equilibrio più basse rispetto alle condizioni stimate per le fumarole di "Donna Rachele" (Mt. Epomeo), dove le condizioni di equilibrio suggeriscono $T >$ di 300 °C con una frazione di vapore separata molto elevata, indicativa di una ebollizione energetica del sistema idrotermale (Figura 4.2.1; Chiodini et al., 2004).

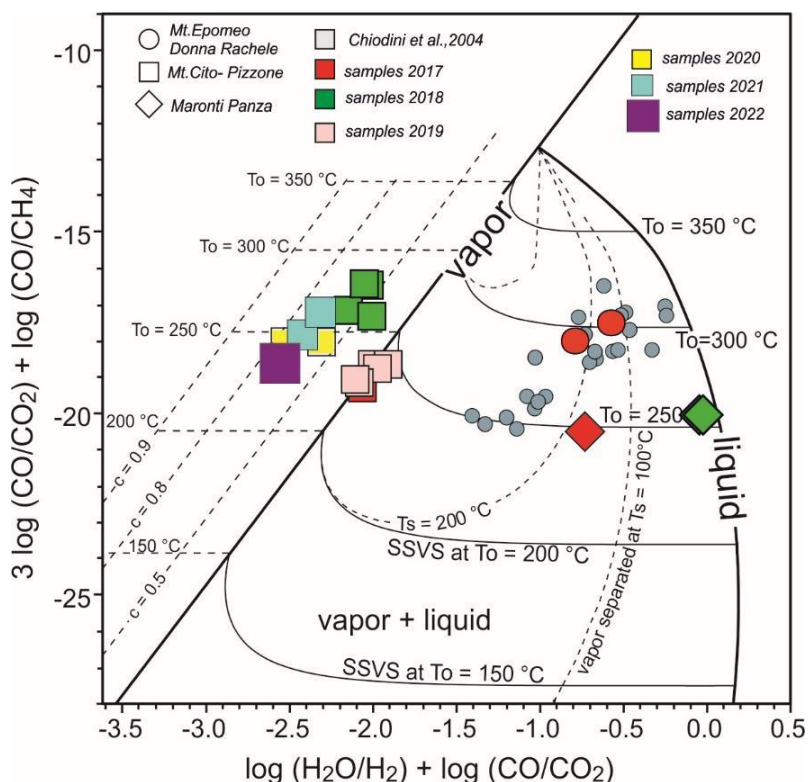


Figura 4.2.1 - Diagramma di equilibrio $3\text{Log}(X_{\text{CO}}/X_{\text{CO}_2}) + \text{Log}(X_{\text{CO}}/X_{\text{CH}_4})$ vs $\text{Log}(X_{\text{H}_2\text{O}}/X_{\text{H}_2}) + \text{Log}(X_{\text{CO}}/X_{\text{CO}_2})$ nel sistema H-C-O. Nel diagramma sono riportati i valori teorici di una fase di vapore satura (linea di vapore) e di una fase liquida satura (linea liquido); i vapori che sono generati per ebollizione di un liquido a temperatura fissa e a diverse temperature di separazione T_s (linee SSVS); i vapori che si generano per ebollizione di un liquido a diverse temperature originarie e a temperatura di separazione fissa T_s (linee 100 °C e 200 °C T_s); le composizioni dei fluidi fumarolici di Ischia (Donna Rachele, simboli grigi) sono da Tedesco, (1996); Chiodini et al. (2004) e dati non pubblicati INGV-OV.

Nel diagramma geotermometrico di Figura 4.2.1, (Chiodini e Marini, 1998; Chiodini et al., 2004) sono riportate le composizioni chimiche dei campioni prelevati dopo gli eventi sismici di agosto 2017 insieme alle composizioni disponibili delle fumarole di “Donna Rachele”.

È da segnalare che per le manifestazioni del Mt. Cito nei periodi seguenti il campionamento di settembre 2017 sono state rilevate diminuzioni della temperatura di emissione dei fluidi e dell’attività fumarolica fino alla scomparsa di alcune manifestazioni, che in più occasioni non ha permesso il prelievo di campioni di gas rappresentativi (non contaminati, condensati o frazionati). I campioni prelevati durante il 2024 sono risultati frazionati e non utilizzabili per stime geotermometriche.

Le variazioni dell’attività fumarolica osservate in questa area risultano sicuramente anomale e di difficile interpretazione. Poiché l’area è stata oggetto di numerose segnalazioni avvenute in concomitanza e in precedenza degli eventi sismici di agosto 2017 e riconducibili a variazioni dell’attività di degassamento, si è provveduto a installare una stazione temporanea, per la misura della temperatura della principale manifestazione fumarolica dell’area e a partire dal gennaio 2020 le misure sono state estese alla pressione atmosferica e a un numero maggiore di sensori di temperatura per un controllo di una più estesa area (Fig. 4.2.2).



Figura 4.2.2 - Ubicazione in località Pizzone Mt. Cito della stazione e dei punti di misura della temperatura.

La stazione ha funzionato regolarmente fino a luglio 2020, ed a partire da tale data a causa di una serie di malfunzionamenti è in grado di registrare solo la temperatura di un'unica area e la pressione atmosferica. Inoltre, è stata integrata da un datalogger in registrazione locale ed i dati ottenuti sono riportati in Figura 4.2.3a. Nel grafico per problemi tecnici sono riportati i dati fino a marzo 2023. È prevista l’installazione di una stazione multiparametrica del nuovo tipo utilizzato per la rete di monitoraggio geochimico ai Campi Flegrei e al Vesuvio.

Nell'ambito del POR FESR "Preserve": Rafforzamento dei Sistemi di Monitoraggio dei Vulcani attivi dell'area Napoletana (Vesuvio - Campi Flegrei - Ischia) RISORSE DEL PROGRAMMA OPERATIVO FESR CAMPANIA 2014-2020 - Azione di Potenziamento AP3 Monitoraggio Geochimico e Termico, è prevista l'installazione nel sito di una stazione multiparametrica.

Le temperature registrate localmente con frequenza oraria dal 2020 hanno mostrato ripetute oscillazioni, da valori di ~98 °C (temperatura di ebollizione del fluido fumarolico) fino a raggiungere un minimo di ~25 °C (Fig. 4.2.3a). Le temperature monitorate hanno mostrato una marcata correlazione inversa con la pressione atmosferica, evidenziando l'origine delle variazioni osservate (Fig. 4.2.3b).

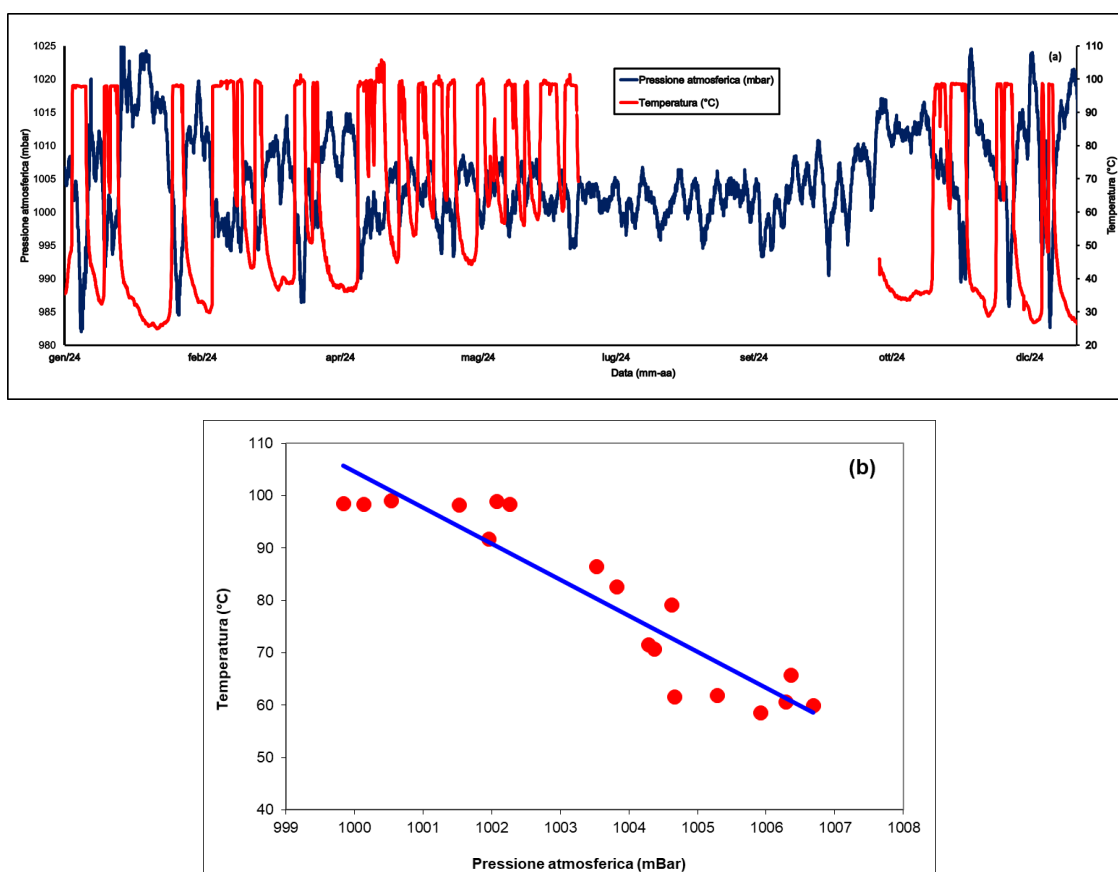


Figura 4.2.3 - a) Valori di temperatura dell'emissione fumarolica di Mt. Cito (Pizzone) e della pressione atmosferica misurati in continuo. La buona correlazione inversa dei due parametri è osservabile nel diagramma (b) dove sono riportate le medie giornaliere dei parametri relativi al periodo dal 13 al 30 giugno 2024.

Alla luce del comportamento rilevato, le segnalazioni effettuate in concomitanza degli eventi sismici di agosto 2017 relative ad aumenti di temperatura delle fumarole e alla presenza di vegetazione secca nelle aree limitrofe, notata anche nei periodi precedenti gli eventi sismici, potrebbero essere legate al comportamento del sistema, caratterizzato da condizioni di equilibrio instabili, in risposta a un aumento di pressione del sistema idrotermale. Le eventuali relazioni di queste variazioni con l'attività sismica sono comunque tutte da dimostrare. Lo studio di questi segnali è in ogni caso promettente per evidenziare possibili anomalie legate a variazioni di attività del sistema idrotermale. È tuttavia necessario un più lungo periodo di osservazione.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia tutto il personale dell'Osservatorio Vesuviano e delle altre Sezioni INGV che a vario titolo ha contribuito al mantenimento del Sistema di Monitoraggio dei vulcani campani e alle attività di Sorveglianza garantendo sempre un elevato livello di funzionamento degli apparati e la qualità delle elaborazioni e analisi dei dati.

Bibliografia

I riferimenti bibliografici presenti in questo documento possono essere consultati al seguente link:

<https://www.ov.ingv.it/index.php/ricrcanew/pubblicazioni/pubblicazioni-scientifiche>

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 nella convenzione biennale attuativa per le attività di servizio in esecuzione dell'Accordo Quadro tra il Dipartimento della Protezione Civile e l'INGV (Periodo 2022-2025), alle attività previste nell'ambito del Sistema Nazionale di Protezione Civile. In particolare, questo documento, redatto in conformità all'Allegato Tecnico 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.

Questo documento rientra nella categoria di livello 3 come definita nei "Principi della politica dei dati dell'INGV (D.P. n. 200 del 26.04.2016)"



Publicato sotto licenza Creative Commons

