



ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Il Monitoraggio dei Vulcani Campani

Secondo semestre 2021

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Napoli | OSSERVATORIO VESUVIANO



Editor:

**Francesca Bianco
Mario Castellano**

Marzo 2023

<http://hdl.handle.net/2122/16418>



INDICE

INTRODUZIONE	3
IL SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI E LA SALA DI MONITORAGGIO	5
1 – Trasmissione e Acquisizione dei Dati	5
1.1 – Acquisizione Rete Sismica	5
1.2 – Acquisizione Rete cGNSS	7
2 – La Sala di Monitoraggio	7
VESUVIO	9
1 – Monitoraggio Sismologico	9
1.1 – Rete Sismica Permanente	9
1.2 – Rete Sismica Mobile	14
2 – Monitoraggio Geodetico	18
2.1 – Rete GPS (GNSS)	18
2.2 – Rete Tiltmetrica	21
2.3 – Interferometria SAR	25
3 – Monitoraggio Vulcanologico	28
3.1 – Rete Permanente Monitoraggio Termico ad Immagine	28
3.2 – Monitoraggio Termico con Termocamera Mobile e Termocoppia	30
4 – Monitoraggio Geochimico	33
4.1 – Monitoraggio Geochimico della Sezione di Napoli “Osservatorio Vesuviano”	33
4.2 – Monitoraggio Geochimico della Sezione di Palermo	37
CAMPI FLEGREI	42
1 – Monitoraggio Sismologico	42
1.1 – Rete Sismica Permanente	42
1.2 – Rete Sismica Mobile	49
2 – Monitoraggio Geodetico	54
2.1 – Rete GPS (GNSS)	54
2.2 – Rete Tiltmetrica	58
2.3 – Rete Gravimetrica	62
2.4 – Interferometria SAR	65
3 – Monitoraggio Vulcanologico	69
3.1 – Rete Permanente Monitoraggio Termico ad Immagine	69
3.2 – Monitoraggio Termico con Termocamera Mobile e Termocoppia	74
3.3 – Comparazione della temperatura superficiale da dati satellitari e Rete TIRNet	78
4 – Monitoraggio Geochimico	85
ISCHIA	98
1 – Monitoraggio Sismologico	98
Rete Sismica	98
2 – Monitoraggio Geodetico	103
2.1 – Rete GPS	103
2.2 – Rete Tiltmetrica	105
2.3 – Interferometria SAR	108
3 – Monitoraggio Vulcanologico	111
Monitoraggio Termico con Termocamera Mobile e Termocoppia	111
4 – Monitoraggio Geochimico	117
4.1 – Monitoraggio Geochimico della Sezione di Palermo	117
4.2 – Attività fuori Convenzione: Studio e monitoraggio dell’area fumarolizzata di Mt.Cito	121
RINGRAZIAMENTI	124
DISCLAIMER – Responsabilità e proprietà dei dati	124

Il Monitoraggio dei Vulcani Campani

Secondo semestre 2021

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 decennio 2012-2021 e sono dettagliate negli Allegati A e B 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 secondo semestre 2021. 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 SECONDO SEMESTRE 2021

VESUVIO

SISMOLOGIA - Nel corso del secondo semestre 2021 sono stati registrati 483 terremoti vulcano-tettonici ($M_{dmax}=2.2\pm 0.3$) di cui 442 (91.5%) con $M_d < 1.0$ o non determinata. I terremoti sono generalmente localizzati al di sotto dell'area craterica, con ipocentri fortemente concentrati nel primo chilometro di profondità.

DEFORMAZIONI DEL SUOLO - Le deformazioni del suolo da dati GPS 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.

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.

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

TERMOGRAFIA - L'analisi della serie temporale della telecamera termica evidenzia andamento sostanzialmente stabile delle temperature superficiali dell'area monitorata.

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 ed ancora non chiaramente interpretabili, rientrando 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 - Nel corso del secondo semestre 2021 ai Campi Flegrei sono stati registrati 909 terremoti ($M_{dmax} = 2.2 \pm 0.3$) di cui 886 (97.47%) con $M_d < 1.0$ o non determinabile.

E' stato possibile localizzare 527 eventi, la maggior parte dei quali ricade nell'area compresa tra Astroni, Solfatara-Pisciarelli-Agnano, Pozzuoli e il Golfo di Pozzuoli con profondità prevalentemente concentrate nei primi 2 km e profondità massime fino a circa 4 km.

DEFORMAZIONI DEL SUOLO - Nel secondo semestre 2021 il valore medio del sollevamento a partire da luglio 2020 è di circa 10 ± 2 mm/mese, in diminuzione rispetto al valore di circa 13 ± 2 mm/mese registrato precedentemente a partire da settembre 2020. Il sollevamento registrato alla stazione GPS di RITE è di circa 89 cm a partire da novembre 2005, di cui circa 55 cm a partire da gennaio 2016.

Tale andamento è visibile anche nel campo tiltmetrico che ripropone una geometria radiale della deformazione con un andamento polarizzato lungo le direzioni NNW e NE.

L'evoluzione delle deformazioni del suolo nel secondo semestre 2021 è anche confermata dalle analisi di telerilevamento satellitare che mostra valori di sollevamento confrontabili con quelli GPS.

La campagna di misure gravimetriche relative evidenziano una correlazione ben visibile tra variazioni negative di Δg e sollevamento Δh . Residui positivi superiori alla soglia di errore osservati nella zona della Solfatara possono essere correlati alla diffusione e circolazione di fluidi nella parte più superficiale del sistema idrotermale.

TERMOGRAFIA - Le analisi dei dati delle telecamere termiche permanenti e 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 in particolare nelle aree di Solfatara e Pisciarelli. Tali variazioni, osservate già a partire dai primi anni 2000 e 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:

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

Inoltre, nel 2021 il flusso di CO_2 dal suolo dell'intera area di degassamento è stato stimato in circa 3000 t/d, valori paragonabili al flusso medio di CO_2 nel *plume* di vulcani attivi a degassamento persistente.

ISCHIA

SISMOLOGIA - Nel corso del secondo semestre 2021 è stato registrato un solo terremoto ($M_d = 0.6 \pm 0.3$).

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

Le direzioni d'inclinazione del suolo confermano il pattern d'inclinazione prevalente verso N-NNE.

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

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

GEOCHIMICA - I dati geochimici acquisiti nel secondo semestre 2021 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.

Si rimanda alla lettura del Rapporto per i dettagli sulle Reti di Monitoraggio e le analisi dei dati acquisiti.

Francesca Bianco

Mario Castellano

IL SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI E LA SALA DI MONITORAGGIO

R. Peluso¹, G. Scarpato¹, V. Augusti¹, A. Benincasa¹, A. Bobbio¹, G. Borriello¹, P. Cantiello¹, F. Cirillo¹, A. D'Alessandro¹, W. De Cesare¹, A. Di Filippo¹, C. Martino¹, V. Torello¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

1 - TRASMISSIONE E ACQUISIZIONE DEI DATI

Il Sistema di Monitoraggio in continuo dei vulcani campani gestito dall'Osservatorio Vesuviano, 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 2.4 e 5.0 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 apparati radio UHF (analogici e digitali), linee telefoniche CDA e ADSL o connessioni LTE/4G.

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 ridondati per l'acquisizione dei dati *raw* e accessi protetti per i successivi trattamenti e analisi.

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

1.1 Acquisizione Rete Sismica

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 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 ridondati, 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.

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 4G.

I dati provenienti dalle stazioni o dai siti remoti confluiscono all'interno del Centro di Calcolo della Sede dell'Osservatorio Vesuviano, dove sono acquisiti da un sistema triplo in Alta Affidabilità (i server grigio/marroni di Figura 1.1.1). Questa è una generalizzazione con tre macchine del sistema in *master/slave* utilizzato nei siti periferici: ognuna delle tre macchine ospita in via preferenziale un "servizio" virtuale di acquisizione, *storage* o distribuzione dei dati. Nel caso una delle tre macchine non dovesse essere più disponibile, una delle due rimaste è in grado di prenderne il ruolo assumendo due ruoli contemporaneamente. A causa di una limitazione del sistema DRBD utilizzato per la condivisione dei dispositivi fisici ad ogni master corrisponde una sola macchina che può farne da slave, questo significa che il cluster, per poter funzionare correttamente, ha bisogno di almeno due delle tre macchine in funzione.

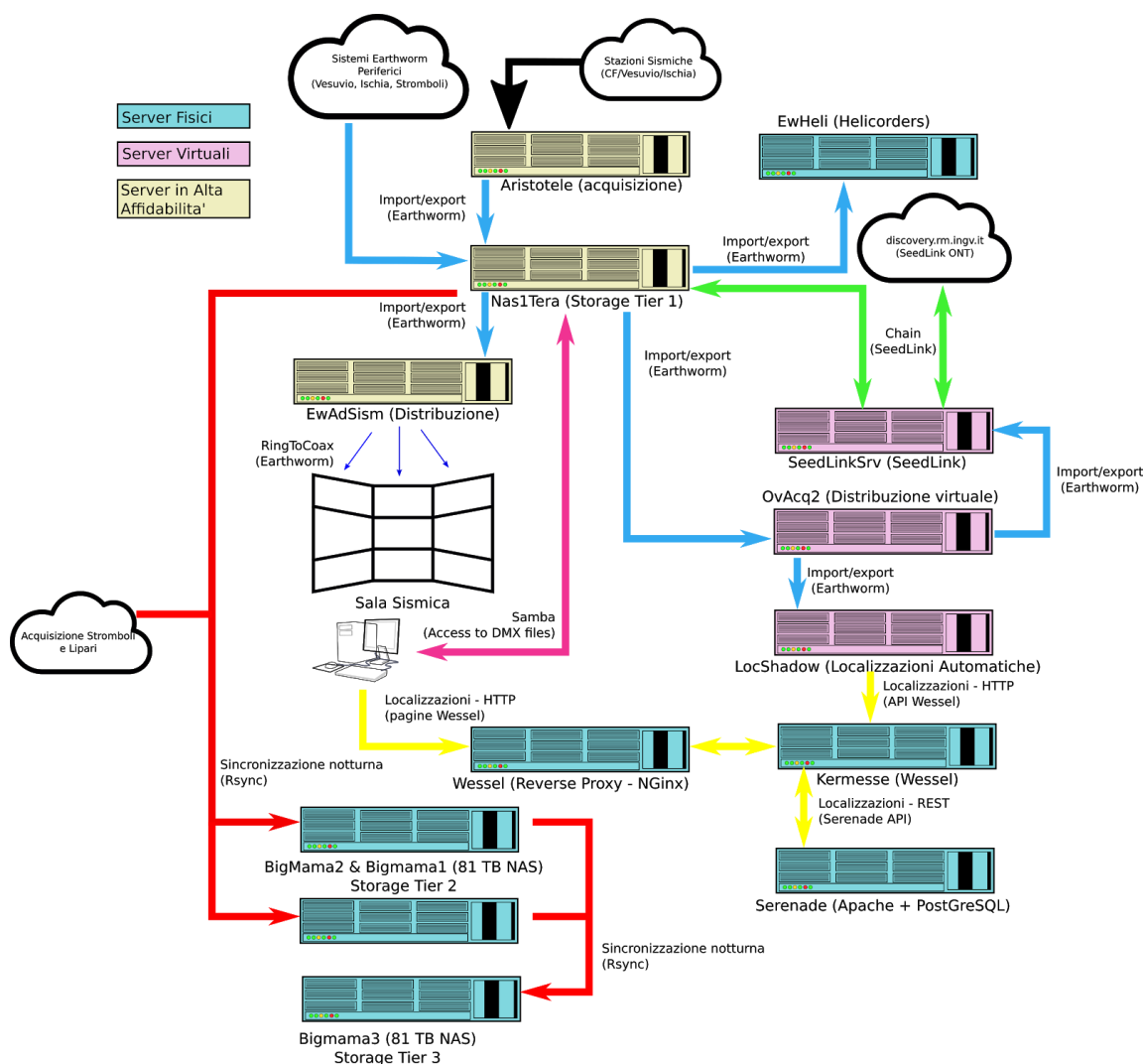


Figura 1.1.1 - Schema dei sistemi di acquisizione, analisi e storage della Sede dell'Osservatorio Vesuviano.

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.

1.2 Acquisizione Rete cGNSS

Ogni giorno, per ogni stazione della Rete GNSS (con frequenza di campionamento di 30s e 10 gradi di angolo di cut-off) sono scaricati nella Sala di Monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano i dati multi-frequenze e multi-costellazioni di 24 ore di acquisizione mediante diverse tipologie di trasmissione: Hyperlan, LTE/4G o HDSL. Per tutte le stazioni GNSS è disponibile anche un flusso dati con campionamento a 1Hz per le applicazioni di monitoraggio in tempo reale.

La qualità dei dati GNSS deve essere velocemente ed accuratamente controllata prima delle analisi e successiva archiviazione nel data-base e questo viene effettuato mediante un applicativo appositamente realizzato (SETA) per un controllo di qualità veloce ed automatico. La procedura fa uso del software TEQC per convertire il formato binario del ricevitore nel formato standard RINEX, realizzando un rapido controllo di qualità dei dati e li trasferisce in un archivio.

Tutte le procedure per la gestione remota delle stazioni, lo scarico dei dati raw, la generazione dei file RINEX e il controllo di qualità dei dati vengono effettuate in automatico.

L'analisi dei dati è realizzata usando l'applicativo Bernese Processing Engine (BPE) del software Bernese GNSS v. 5.0 in modalità doppie differenze. I dati vengono elaborati quotidianamente utilizzando i prodotti Ultra-rapid International GNSS Service (IGS) in una catena di elaborazione completamente automatizzata. Una volta che le orbite finali IGS e i parametri di rotazione terrestre (ERPs) diventano disponibili, i dati vengono rielaborati settimanalmente.

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* (Giudicepietro, 2000; 2001);
- 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'ONT sul territorio nazionale;
- 12 monitor ausiliari per la visualizzazione di segnali di stazioni in test e per la verifica di nuovi software in sviluppo.

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.

VESUVIO

1 - MONITORAGGIO SISMOLOGICO

P. Ricciolino¹, M. Orazi¹, D. Galluzzo¹, E. Bellucci Sessa¹, G. Borriello¹, C. Buonocunto¹,
A. Caputo¹, A. Carandente¹, P. Cusano¹, R. Esposito¹, G. Gaudiosi¹,
F. Liguoro¹, D. Lo Bascio¹, 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 VARP e VTVA non sono funzionanti per manutenzione dei sensori da pozzo). 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.

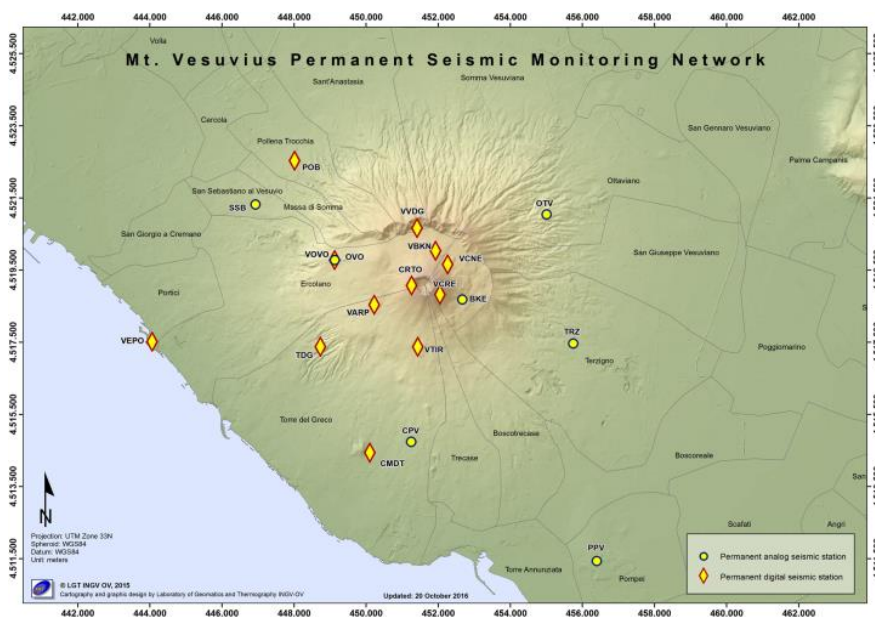


Figura 1.1.1 – Rete Sismica Permanente del Vesuvio.

Ad oggi sulla rete sono presenti 7 stazioni di tipo analogico equipaggiate con sensori da 1Hz di cui tre utilizzano sensori a tre componenti mentre le rimanenti sono a singola componente. Le stazioni di tipo digitale sono 11 (12 con l'apparato digitale della stazione OVO) e sono basate prevalentemente sull'acquisitore GILDA progettato e prodotto dall'INGV Osservatorio Vesuviano.

I sensori che equipaggiano le stazioni digitali sono i seguenti: 8 velocimetri a larga banda (Broadband: 0.016-50 Hz), un velocimetro a banda molto larga (120 s), un sensore da pozzo Guralp 3TB/5TB costituito da velocimetro Very Broadband (0.008–50 Hz) accoppiato ad un accelerometro, un velocimetro a larga banda Lennartz 3D/20s e un sensore velocimetrico da 1Hz.

A questi si aggiungono 2 accelerometri da superficie, 6 microfoni infrasonici Infracyrus (progettati e prodotti dall'INGV Osservatorio Vesuviano) e un microfono broadband 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
BKE	40.8185N 14.4387E 872m	Vesuvio Bunker Est	Febbraio 1992	3 Geotech S13	Analogica	Radio UHF analogica
CMDT	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 14.4220E 1097m	Cratere Vesuvio Ovest	Settembre 2006	Guralp CMG-40T 60s, Infracyrus	GILDA	Wi-Fi
OTV	40.8393N 14.4663E 372m	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 Microfono Larga Banda Chaparral	Analogica GILDA	Radio UHF analogica Wi-Fi
VOVO (pozzo)	40.8283N 14.3956E 493m	Sede Storica	11/3/2015	Guralp 3TB/vel120s 5TB/accelerometro	2 GILDA	Intranet e Wi-Fi
POB	40.8522N 14.3833E 170m	Pollena	9/7/2014	Guralp CMG-40T 60s	GILDA	Radio UHF digitale
PPV	40.7535N 14.4836E 30m	Pompei Scavi	2/3/2004	Mark-L4C	Analogica	Radio UHF analogica
SSB	40.8416N 14.3704E 176m	San Sebastiano	Febbraio 1993	Mark L4-3D	Analogica	Radio UHF analogica
TDG	40.8065N 14.3920E 305m	Torre Del Greco	7/6/2016	Guralp CMG-40T 60s	GILDA	Radio UHF digitale
TRZ	40.8070N 14.4753E 176m	Terzigno	Agosto 1994	Mark-L4C	Analogica	Radio UHF analogica
VARP non operativa	40.8164N 14.4098E 671m	Parco Vesuvio Zona Baracche Forestale	9/2/2009	Guralp CMG-40T 60s, Infracyrus	GILDA	Wi-Fi
VBKN	40.8299N 14.4298E 860m	Vesuvio Bunker Nord	12/5/2009	Guralp CMG-40T 60s, Infracyrus	GILDA	Wi-Fi
VCNE	40.8266N 14.4340E 942m	Vesuvio Cratere Nord Est	19/11/2014	Lennartz-3D 1Hz	GILDA	Wi-Fi
VCRE	40.8190N 14.4314E 1130m	Vesuvio Cratere Est	15/10/2008	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
VTIR	40.8059N 14.4242E 619m	Vesuvio Località Tirone	19/6/2009	Guralp CMG-40T 60s, Infracyrus	GILDA	Wi-Fi
VTVA non operativa	40.7971N 14.4396E 366m	Trecase Ingresso Forestale	18/12/2014	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

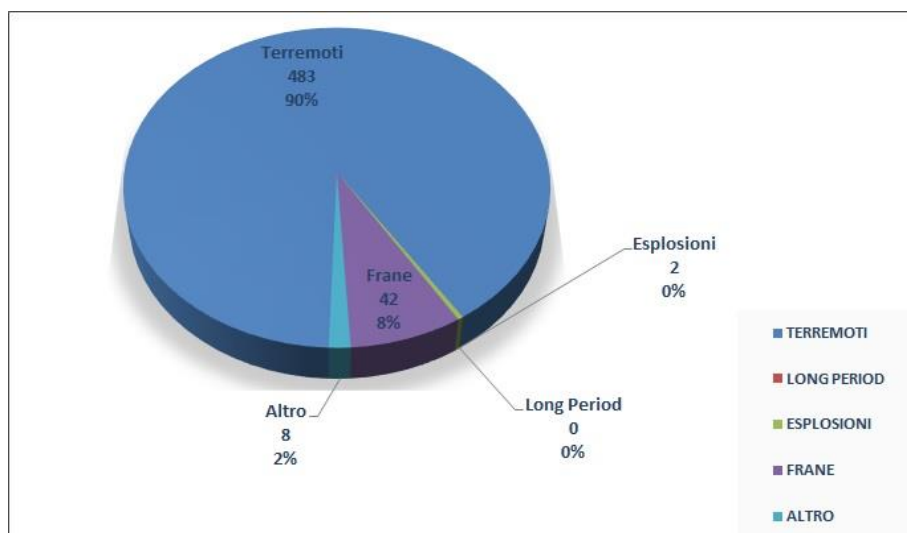
Nel corso del secondo semestre 2021, sono stati registrati un totale di 535 eventi locali, ripartiti nelle diverse tipologie riportate in Figura 1.1.2.

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. 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 483 terremoti vulcano-tettonici di bassa magnitudo ($M_{dmax} = 2.2 \pm 0.3$) (Tabella 1.1.2).

È stato possibile determinare i parametri ipocentrali di 328 eventi. Il numero totale di eventi registrati non si discosta significativamente da quello medio degli anni precedenti (Figura 1.1.3).

Figura 1.1.2 – Distribuzione percentuale degli eventi per tipologia nel secondo semestre 2021. Le esplosioni riportate sono tutte di origine artificiale.



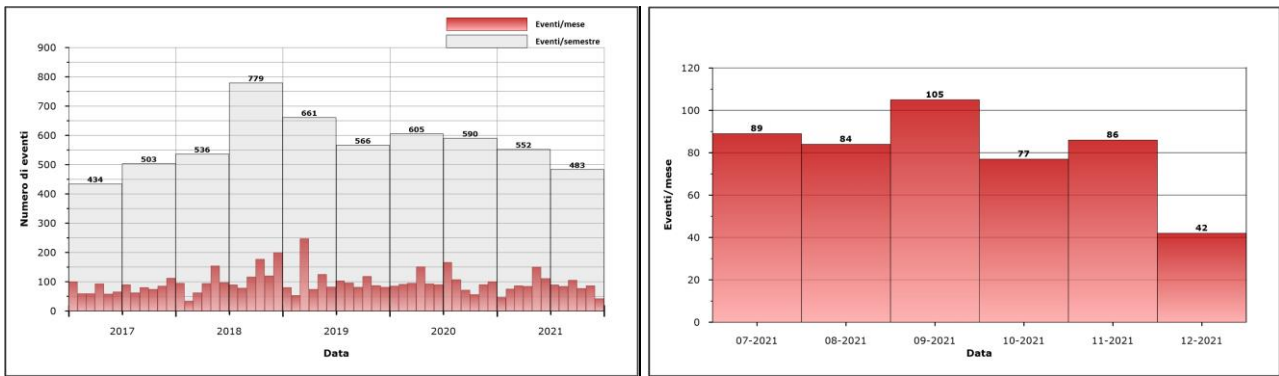


Figura 1.1.3 – Frequenza di accadimento dei terremoti vesuviani nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2021 (a destra).

I terremoti sono generalmente localizzati al di sotto dell'area craterica, con ipocentri fortemente concentrati nei primi due chilometri di profondità e con una profondità massima di circa 5 km (Figure 1.1.4 e 1.1.5).

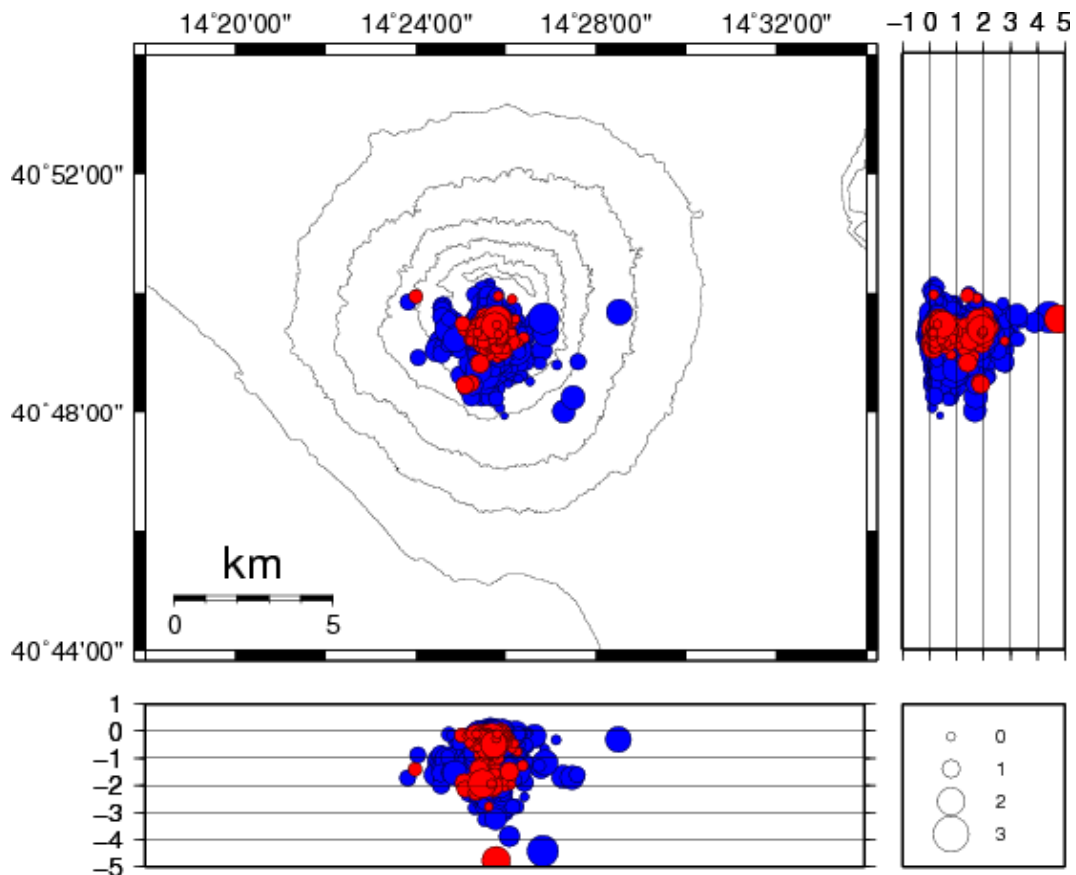


Figura 1.1.4 – Localizzazione degli ipocentri nell'area vesuviana durante gli ultimi 5 anni (in blu) e nel secondo semestre 2021 (in rosso).

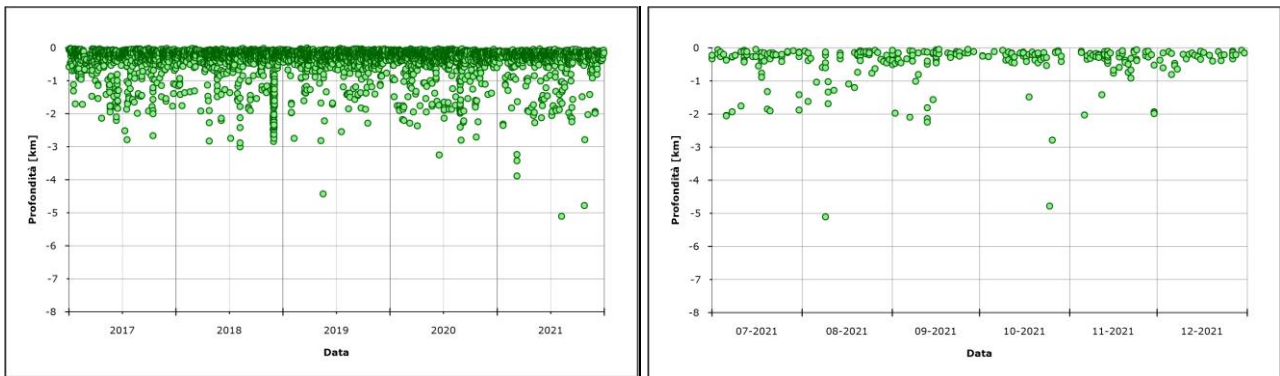


Figura 1.1.5 – Variazione temporale della profondità ipocentrale dei terremoti vesuviani localizzati nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2021 (a destra).

Non si evidenziano particolari andamenti 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).

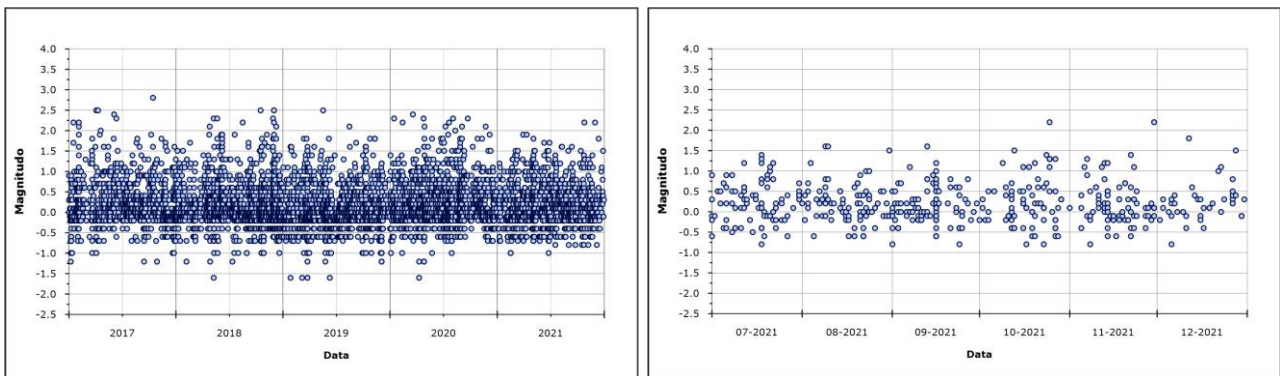


Figura 1.1.6 - Variazione temporale della magnitudo dei terremoti vesuviani nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2021 (a destra).

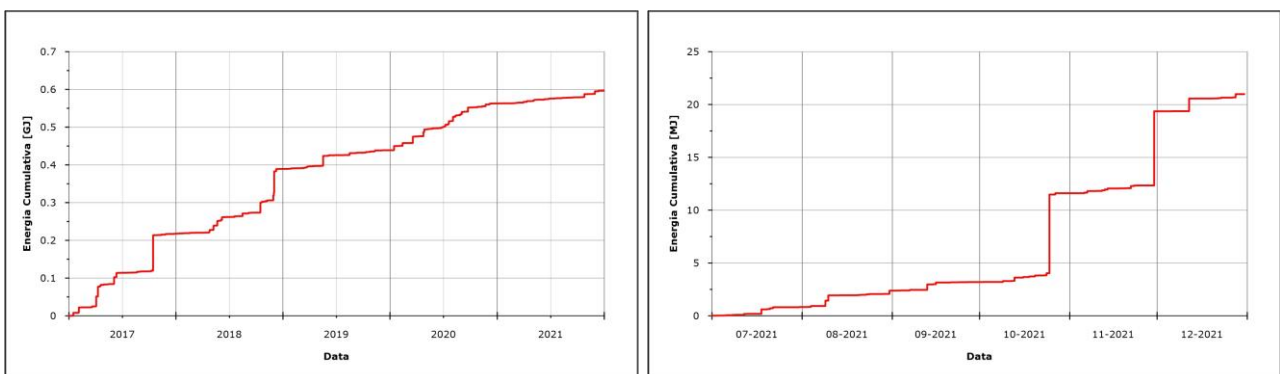


Figura 1.1.7 – Andamento cumulativo dell'energia rilasciata dai terremoti vesuviani nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2021 (a destra).

Tabella 1.1.2 – Riepilogo della sismicità registrata al Vesuvio nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2021 (a destra) suddivisa per classi di magnitudo e relative percentuali.

Numero totale terremoti: 5709 $M_{dmax}=2.8\pm 0.3$		Numero totale terremoti: 483 $M_{dmax}=2.2\pm 0.3$	
Numero terremoti con $M_d < 0.0$	2054 (35.98%)	Numero terremoti con $M_d < 0.0$	155 (32.09%)
Numero terremoti con $0.0 \leq M_d < 1.0$	2999 (52.53%)	Numero terremoti con $0.0 \leq M_d < 1.0$	279 (57.76%)
Numero terremoti con $1.0 \leq M_d < 2.0$	491 (8.60%)	Numero terremoti con $1.0 \leq M_d < 2.0$	39 (8.07%)
Numero terremoti con $2.0 \leq M_d < 2.5$	28 (0.49%)	Numero terremoti con $M_d \geq 2.0$	2 (0.41%)
Numero terremoti con $M_d \geq 2.5$	7 (0.12%)	Numero terremoti con M_d N.D.	8 (1.66%)
Numero terremoti con M_d N.D.	130 (2.28%)		

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

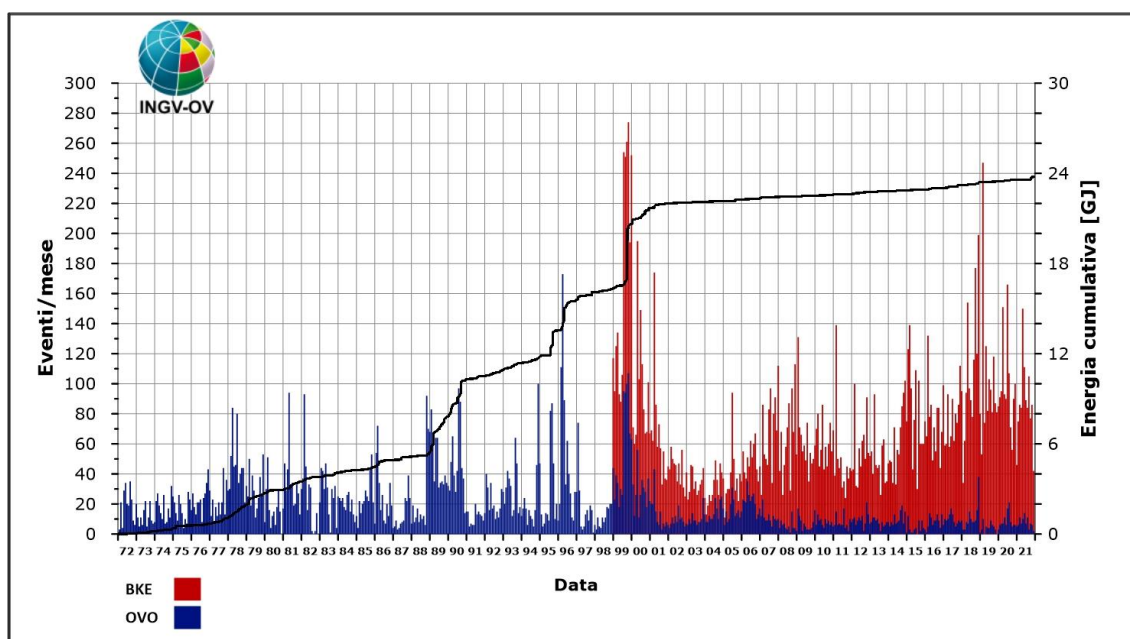


Figura 1.1.8 – Frequenza di accadimento dei terremoti registrati dal 1972 alla Stazione OVO (in blu) e dal 1999 alla stazione BKE (in rosso). La linea nera rappresenta l'energia cumulativa.

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 secondo semestre 2021 è mostrata in Figura 1.2.1, mentre le caratteristiche tecniche sono riassunte nella Tabella 1.2.1. A tutto dicembre 2021 nell'area del Vesuvio sono operative 7 stazioni sismiche stand-alone a larga banda di cui due dotate anche di accelerometro (l'accelerometro di BKW è disinstallato nei mesi novembre – aprile per carenza di energia solare). Tutta la strumentazione funziona in modalità di acquisizione locale.

Figura 1.2.1 – Stazioni della Rete Mobile operative al Vesuvio nel corso del secondo semestre 2021.

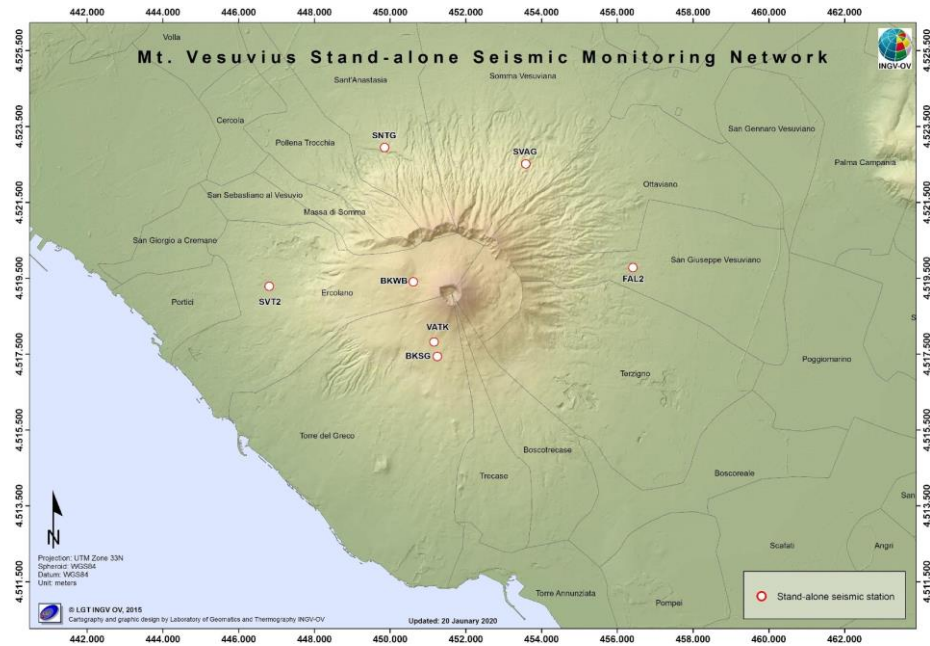


Tabella 1.2.1 – Stato della Rete Sismica Mobile operativa al Vesuvio.

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisitore	Trasmissione
BKSG	40.8065N 14.4220E 600m	Vesuvio Bunker Sud	Ottobre 2008	Guralp CMG-40T	Marslite	Locale
BKWG BKWK	40.8242N 14.4143E 834m	Vesuvio Bunker Ovest	Ottobre 2008	Guralp CMG-40T Episensor ES-T	Marslite Gilda	Locale
FAL2	40.8279N 14.4831E 176m	S.Giuseppe Vesuviano	Marzo 2013	Lennartz LE3D/20s	Marslite	Locale
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
SVT2	40.8229N 14.3692E 195m	San Vito	Novembre 2015	Lennartz LE3D/20s	Gilda	Locale
VATK	40.8099N 14.4210E 677m	Vesuvio Forestale	Settembre 2019	Episensor ES-T	Gilda	Locale

La maggior parte delle stazioni Rete Mobile ha acquisito con discreta continuità per tutto il secondo semestre 2021, il *data set* è costituito da rumore sismico, terremoti locali, regionali e telesismi.

E' stato effettuato il calcolo dell'RMS per la stazione sismica BKWG, equipaggiata con sensore broad band Guralp CMG40T. I risultati sono mostrati in Figura 1.2.2. Per le bande di frequenza 4-8 Hz e 2-4 Hz si notano valori di RMS inferiori rispetto alle stazioni flegree pur evidenziando una periodicità giornaliera.

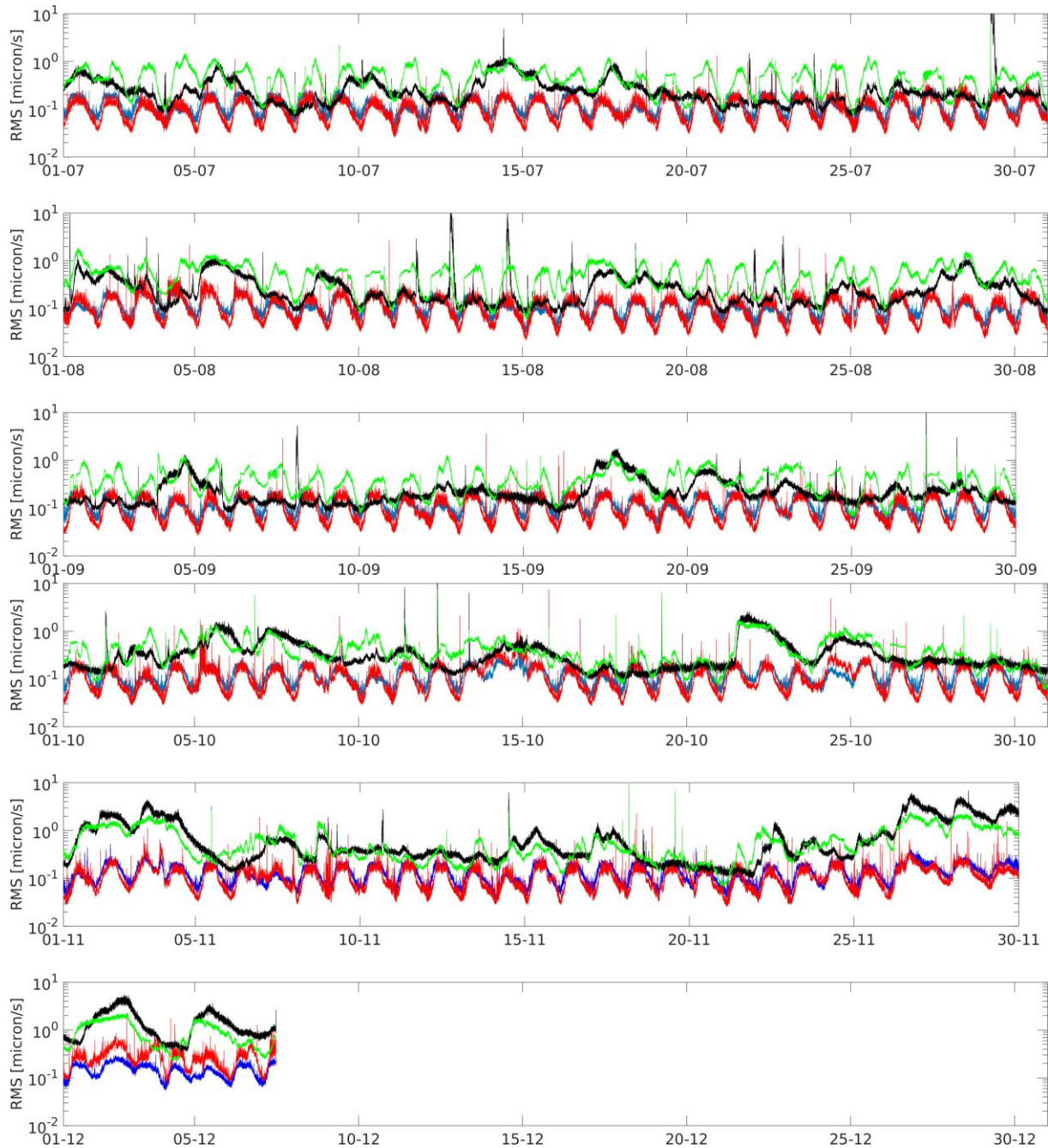


Figura 1.2.2 - RMS calcolato per i segnali della stazione sismica BKWG nel secondo semestre del 2021 in quattro bande di frequenza: 0.05-0.5 Hz (nero), 0.5-2 Hz (verde), 2-4 Hz (rosso), 4-8 Hz (blu).

In Figura 1.2.3 vengono mostrati gli accelerogrammi della stazione VATK per il terremoto di Md=2.3 del 30 novembre 2021. Il valore di PGA osservato è pari a 9.01 cm/s² registrato sulla componente Z.

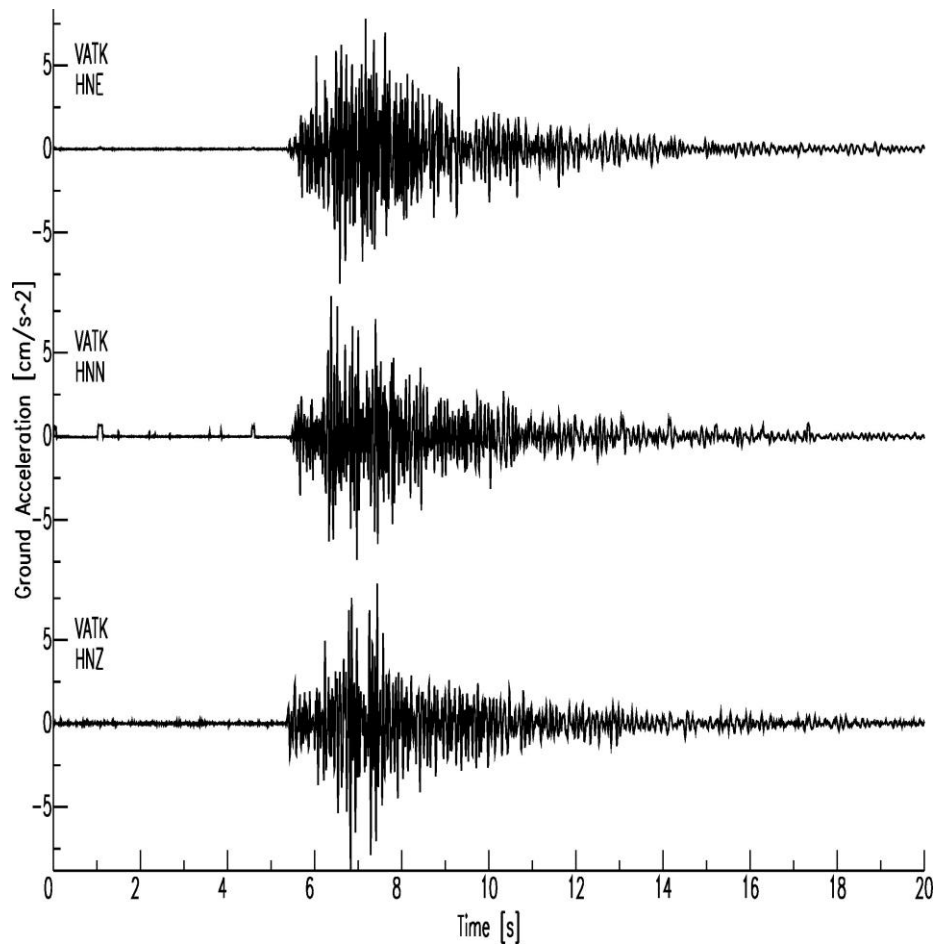


Figura 1.2.3 - Accelerogrammi non filtrati registrati dalla stazione VATK (Vesuvio Array Tirone) per il terremoto di Md=2.3 del 30/11/2021 ore 19:04 UTC.

2 - MONITORAGGIO GEODETICO

Durante il secondo semestre 2021 il monitoraggio geodetico del Vesuvio è stato effettuato attraverso misure continue GPS e tiltmetriche, nonché mediante elaborazioni di dati satellitari.

2.1 Rete GPS (GNSS)

P. De Martino¹, G. Scarpato¹, G. Brandi¹, M. Dolce¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

La rete GNSS permanente operante nell'area vesuviana è costituita da 11 stazioni (Figura 2.1.1). 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. Nove stazioni sono attrezzate con ricevitori Leica GRX1200PRO e 2 con ricevitori Leica GR10. I dati vengono trasmessi con varie tecnologie in funzione della logistica del sito. I sistemi di trasmissione comprendono 5 stazioni che si appoggiano alla rete Wi-Fi dell'Osservatorio Vesuviano, 3 che utilizzano la connettività LTE/4G, 2 che trasmettono con tecnologia ADSL e 1 che utilizza una linea GSM. Tre stazioni sono alimentate con energia solare tramite pannelli fotovoltaici da 100W (BKE1, BKNO, ONPI). Le restanti stazioni sono alimentate tramite rete elettrica e dotate di batterie a tampone per estenderne l'operatività in caso di blackout.

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 con il software scientifico Bernese e alla restituzione dei risultati (serie temporali delle variazioni lungo le componenti Nord, Est e Quota, campi di velocità e/o spostamento planimetrici e verticali)

Durante il 2021 è stato realizzato e sperimentato anche un nuovo sistema di processamento e visualizzazione in tempo reale dei dati ad alta frequenza (1 Hz) delle stazioni GNSS dell'area vesuviana (Convenzione DPC-INGV, Allegato B2, WP2-Task2). Tale sistema sarà operativo in Sala di Monitoraggio dal 2022.

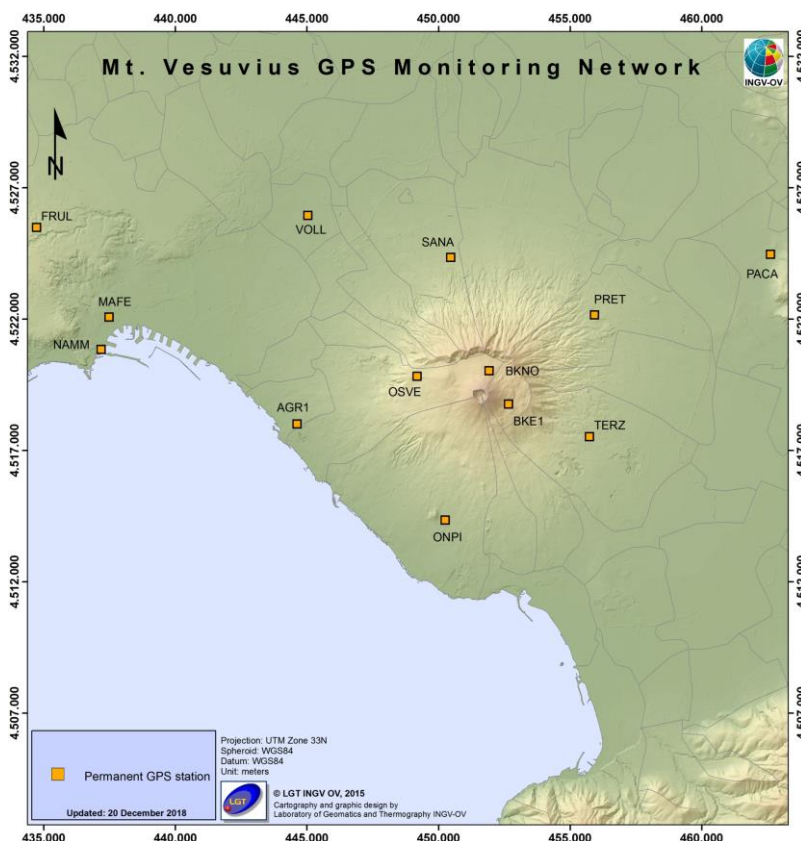


Figura 2.1.1 – Rete GNSS del Vesuvio.

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 d'Agraria	2003	Leica GRX1200GGPRO LEIAT504 LEIS	1sec	ADSL
BKE1	40.8185N 14.4387E 917m	Vesuvio Bunker Est	2006	Leica GRX1200PRO LEIAT504 LEIS	30sec	Wi-Fi
BKNO	40.8299N 14.4299E 1007m	Vesuvio Bunker Nord	2009	Leica GRX1200GGPRO LEIAT504GG LEIS	1sec	Wi-Fi
ENAV	40.5823N 14.3349E 541m	Punta Campanella	2003	Leica GR10 LEIAT504 LEIS	1sec	Wi-Fi
ONPI	40.7786N 14.4105E 178m	Torre del Greco	2001	Leica GRX1200PRO LEIAT504 LEIS	30sec	GSM
OSVE	40.8279N 14.3974E 677m	Sede Storica O. V.	2005	Leica GR10 LEIAT504 LEIS	1sec	Wi-Fi
PACA	40.8704N 14.5564E 128m	Palma Campania	2002	Leica GRX1200GGPRO LEIAT504 NONE	30sec	LTE/4G
PRET	40.8494N 14.7472E 256m	Municipio di Ottaviano	2001	Leica GRX1200PRO LEIAT504 LEIS	1sec	ADSL
SANA	40.8688N 14.4122E 203m	Sant'Anastasia	2001	Leica GRX1200PRO LEIAT504 LEIS	10sec	LTE/4G
TERZ	40.8075N 14.4752E 226m	Terzigno	2001	Leica GRX1200PRO LEIAT504 LEIS	1sec	Wi-Fi
VOLL	40.8828N 14.3476E	Volla	2018	Leica GRX1200PRO LEIAT504 LEIS	30sec	LTE/4G

Nell'area vesuviana non si evidenziano deformazioni del suolo imputabili a fenomeni vulcanici.

Le sole stazioni GPS ubicate nella parte alta dell'edificio vulcanico mostrano una significativa subsidenza (6-7 mm/anno) e spostamenti orizzontali coerenti con una fase di contrazione del Gran Cono (Figure 2.1.2 e 2.1.3), verosimilmente dovuta a processi di compattazione e/o scivolamento di terreni poco coerenti ed in forte pendenza ed effetti gravitativi (De Martino et al., 2021).

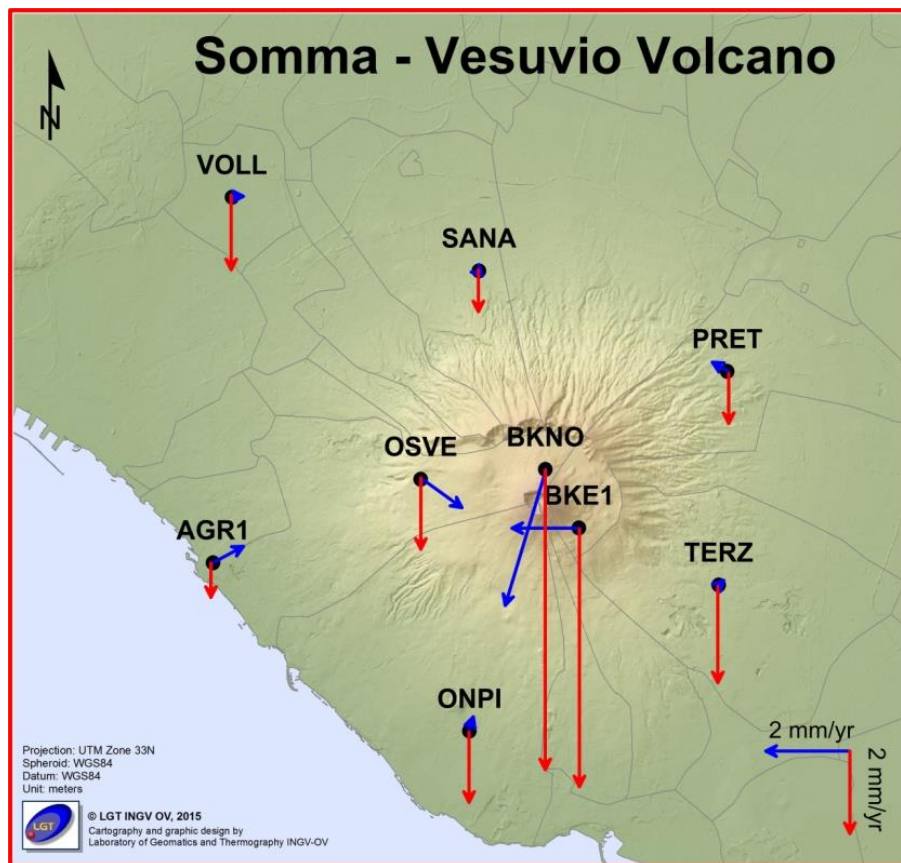


Figura 2.1.2 - Campo di velocità (in mm/anno) degli spostamenti orizzontali (in blu) e verticali (in rosso) nell'area del Somma-Vesuvio.

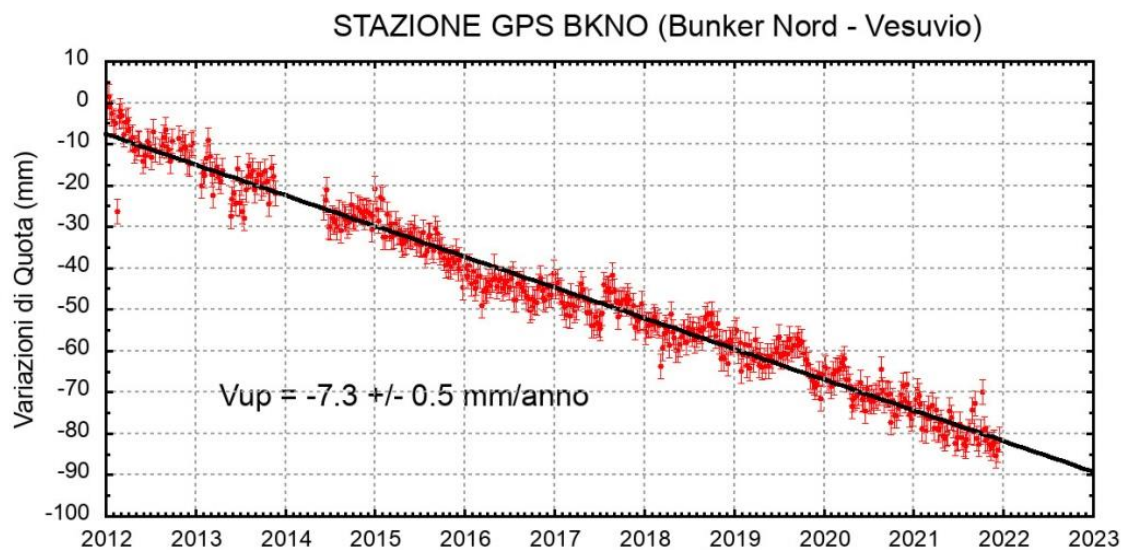


Figura 2.1.3 - Serie temporale delle variazioni settimanali in quota della stazione di BKNO (Vesuvio) da gennaio 2012 a dicembre 2021.

2.2 Rete Tiltmetrica

C. Ricco¹, I. Aquino¹, V. Augusti¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

L'attuale Rete Tiltmetrica del Vesuvio (Figura 2.2.1) consiste in 7 stazioni (le cui specifiche sono riportate nella Tabella 2.2.1), di cui 3 attrezzate con sensori analogici di superficie, mod. 702 (Applied Geomechanics Instruments) e 4 stazioni attrezzate con sensori digitali da pozzo, mod. Lily (Jewell Instrument) con passo di acquisizione ogni minuto. Tutte le stazioni tranne quella di Trecase (TRC) trasmettono quotidianamente alla Sala di Monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano i file dati.

Il sito CCR è stato perforato ma non ancora strumentato.

Figura 2.2.1 – Rete Tiltmetrica del Vesuvio.

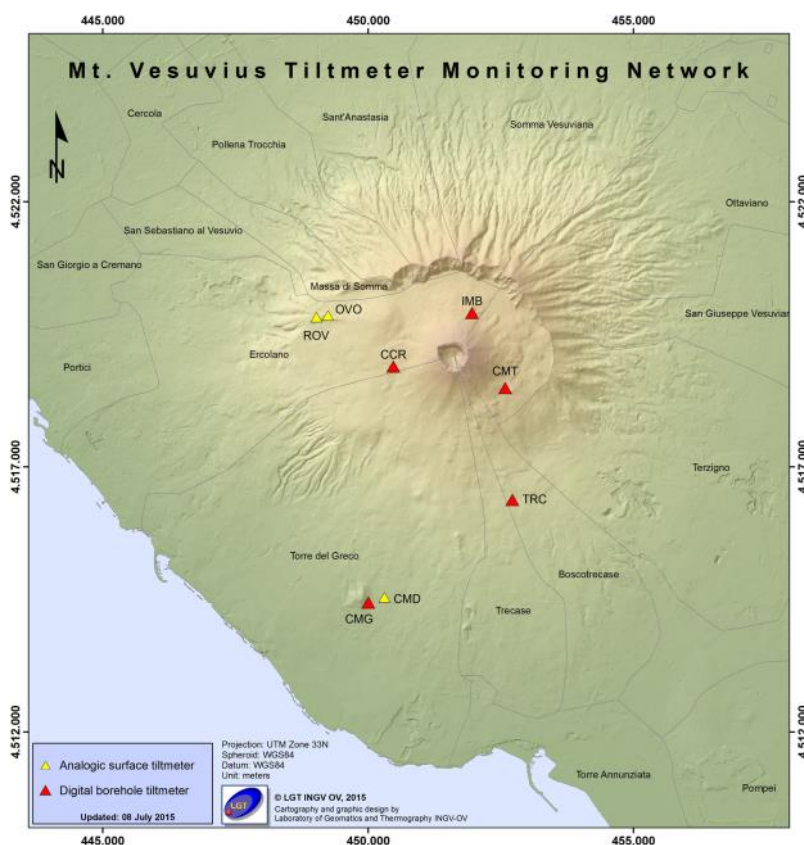


Tabella 2.2.1 – Stato della Rete Tiltmetrica del Vesuvio.

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Profondità	Acquisizione	Trasmissione
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'	Locale
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

I segnali registrati dalle stazioni tiltmetriche della rete Vesuvio vengono quotidianamente validati ed elaborati. Essi consistono in serie temporali di variazioni di inclinazione del suolo lungo due piani ortogonali (NS ed EW), di temperatura e di pressione atmosferica per i sensori analogici e bussola magnetica per i sensori digitali. Le sequenze tiltmetriche considerate per il calcolo del campo di inclinazione del suolo derivano dai segnali originali registrati sottoposti ad un trattamento statistico di decorrelazione dagli effetti termici. Tali segnali vengono singolarmente analizzati durante il corso dell'anno con delle routine di calcolo appositamente realizzate, in quanto mostrano caratteristiche specifiche dovute all'insolazione primariamente ed inoltre a effetti di sito di vario tipo.

Dalla metà di novembre la stazione IMB non acquisisce dati per un guasto del sensore che è attualmente in manutenzione.

Dai dati tiltmetrici registrati nel secondo semestre 2021 si evince una generalizzata subsidenza dell'edificio vulcanico. L'anomalia in direzione ed ampiezza al sito-stazione CMT osservata dal 12 maggio tende lentamente a rientrare già dalla metà di luglio. Il pattern di deformazione è visibile nell'odografo di Figura 2.2.2 che riassume il tilting registrato dalle 4 stazioni digitali funzionanti in area vesuviana, i cui segnali sono filtrati delle periodicità inferiori ad 1 giorno.

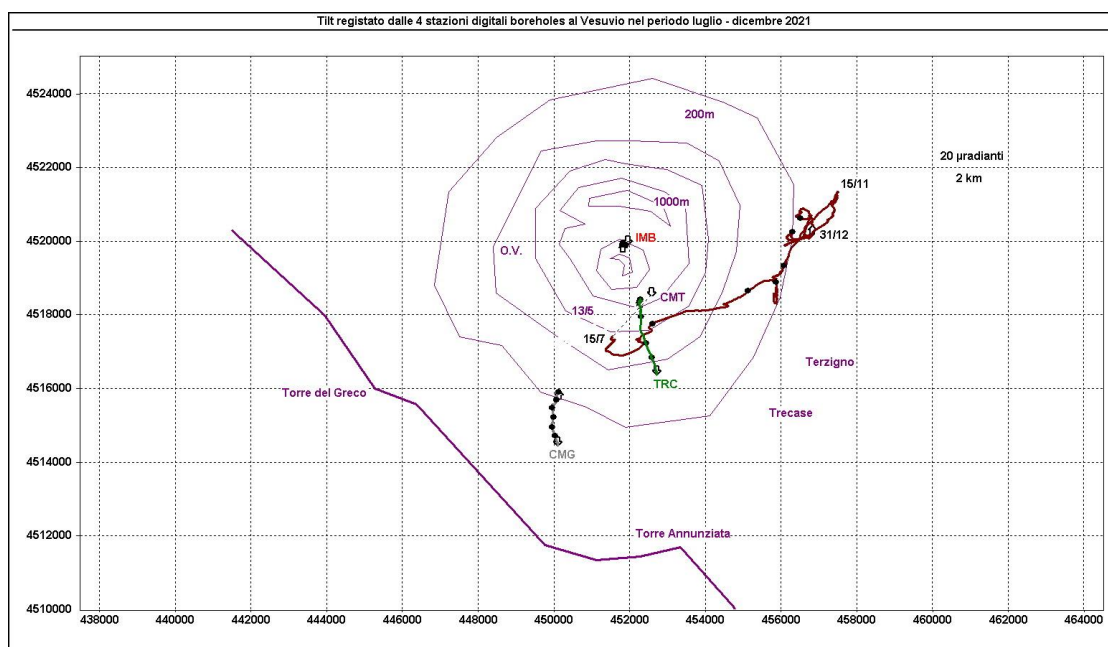


Figura 2.2.2 - Pattern tiltmetrico osservato al Vesuvio nel secondo semestre 2021. Per comodità di rappresentazione grafica e per una interpretazione più agevole, sono state selezionate in tale figura solo le 4 stazioni "borehole" con sensori ubicati a 25 m di profondità. Il lato di ogni maglia del reticolo equivale a 20 μ radianti o 2 km. I pallini in colore sovrapposti sui vettori tilt indicano intervalli di un mese. Inoltre, a causa delle forti oscillazioni registrate a CMT fino al 15 luglio, queste ultime sono state sostituite con una linea tratteggiata che ne rappresenta il valore medio.

In tale figura la deformazione relativa ad ogni sito-stazione è rappresentata con segmenti orientati di colore diverso; l'origine di ogni vettore tilt è siglata con il nome del sito stesso ed evidenziata con una freccia puntata verso il basso mentre l'estremo libero è indicato con una freccia puntata verso l'alto. Il verso di ogni vettore indica settori di crosta in abbassamento ed è univocamente definito dal suo estremo libero. I segnali registrati dalle 7 stazioni vesuviane (tra analogiche e digitali) sono mostrati in Figura 2.2.3 e non sono corretti del contributo delle stagionalità (essenzialmente di tipo termico).

Nella Tabella 2.2.2 sono riportate, per le sole stazioni digitali, la variazione di inclinazione del suolo, la direzione di tilting e la variazione di temperatura registrata a fondo pozzo (≈ -25 m dal p.c.) acquisite nel corso del 2021.

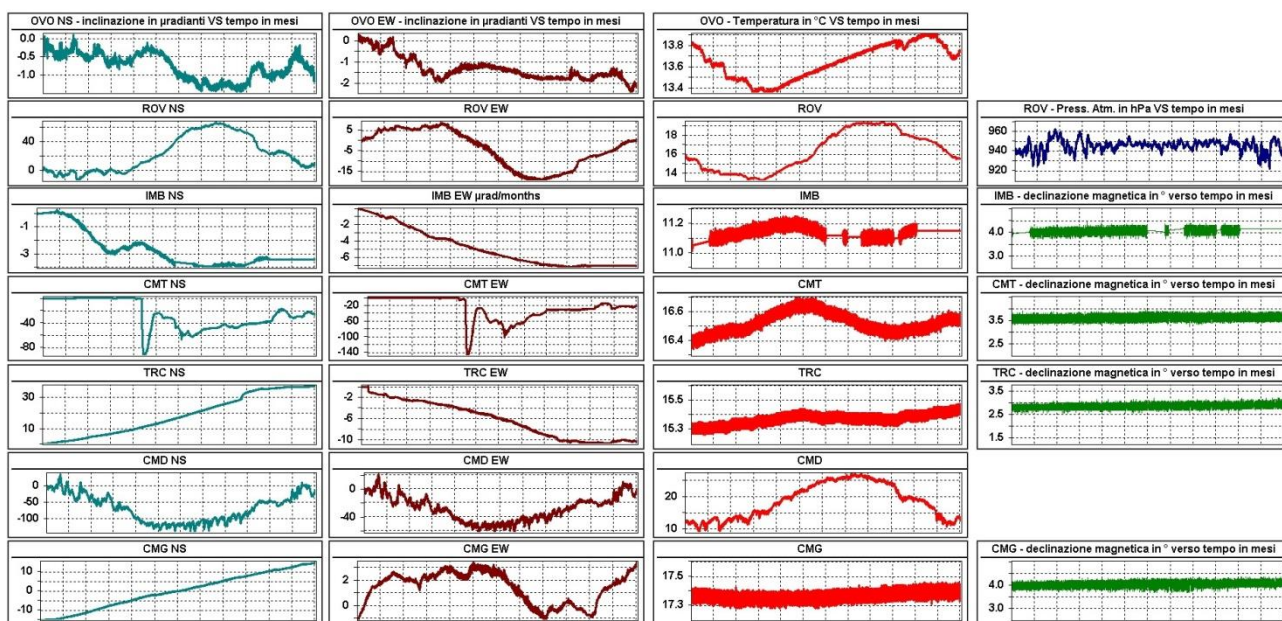


Figura 2.2.3 - Segnali registrati nel 2021 dai 7 sensori analogici e digitali della rete del Vesuvio; le stazioni tiltmetriche sono ordinate dal basso verso l'alto secondo la latitudine. Le prime 2 colonne riportano le componenti NS (ciano) ed EW (rosso scuro) in μ radianti i cui valori di tilt crescenti nel tempo indicano rispettivamente la variazione di inclinazione del suolo a N e ad E. La terza colonna riporta le temperature (rosso) in $^{\circ}$ C registrate da ogni sensore ed infine l'ultima colonna è riservata ai segnali non rilevati da tutte le stazioni, come la pressione atmosferica (blu scuro) in hPa acquisita a ROV e la declinazione magnetica (verde) in gradi registrata dai sensori Lily.

Tabella 2.2.2 - Tilt registrato e variazione termica associata relativi alle stazioni digitali durante il 2021.

Stazione	Inclinazione	Temperatura
Stazione TRC (372 m s.l.m.)	38.6 μ radianti a NNW	0.13 $^{\circ}$ C
Stazione IMB (974 m s.l.m.)	7.8 μ radianti a WSW (fino a metà novembre)	0.11 $^{\circ}$ C (fino a metà novembre)
Stazione CMG (117 m s.l.m.)	30.0 μ radianti a N	0.03 $^{\circ}$ C
Stazione CMT (842 m s.l.m.)	34.3 μ radianti a SW	0.15 $^{\circ}$ C

In Figura 2.2.4 sono riproposti gli andamenti delle componenti tiltmetriche (filtrate dalle periodicità giornaliere) e termica registrate da ognuna delle 4 stazioni borehole a partire dal 2020.

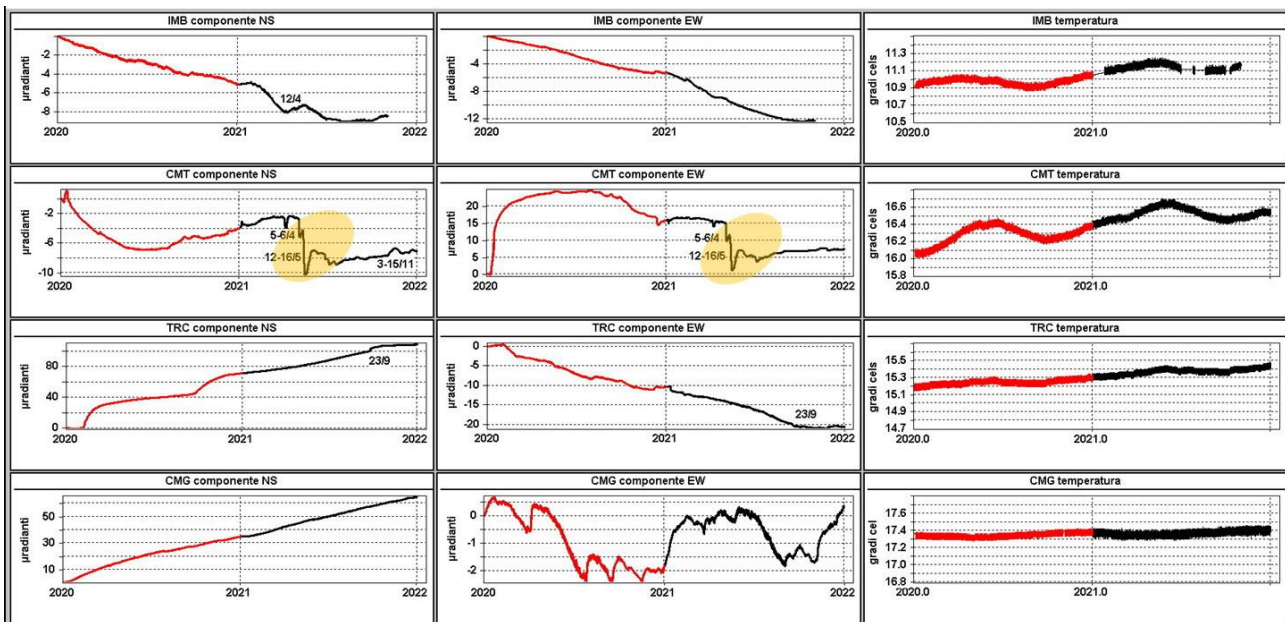


Figura 2.2.4 - Serie temporali dei segnali registrati a partire dal 2020 dalle 4 stazioni “borehole” della rete vesuviana ordinate dal basso verso l’alto secondo la latitudine. Le prime 2 colonne riportano le componenti NS ed EW in μ radianti i cui valori di tilt crescenti nel tempo indicano rispettivamente la variazione di inclinazione del suolo a N e ad E, mentre la terza colonna riporta la temperatura in $^{\circ}$ C registrata da ogni sensore. In rosso sono riportati i segnali relativi al 2020 mentre in nero sono rappresentati quelli registrati nel 2021. L’area evidenziata in arancione identifica l’anomalia nel segnale registrato a CMT dal 12 maggio fino alla fine di giugno; sempre dal 12 maggio quest’ultimo è stato ridotto in ampiezza di 20 volte per agevolarne la visualizzazione. Le date riportate sui segnali indicano le variazioni tiltmetriche più significative osservate negli ultimi 2 anni.

Le 3 direzioni prevalenti di tilting osservate nel secondo semestre 2021 sono:

- NNW-N alle stazioni CMG e TRC;
- ENE-NE alla stazione CMT;
- SW alla stazione IMB.

Dalla metà di luglio il sito di CMT interrompe la polarizzazione della sua direzione di tilting a SW per invertire il suo andamento ed inclinarsi verso ENE-NE.

La cinematica che caratterizza i 4 siti è riassunta vettorialmente nel plot di Fig. 2.2.2, in cui le curve in colore rappresentano la variazione tiltmetrica progressiva registrata dai tiltmetri durante gli ultimi sei mesi dell’anno in corso.

I pattern tiltmetrici osservati a IMB, TRC e CMG sono coerenti con la subsidenza dell’edificio vulcanico, mentre l’anomalia tiltmetrica in direzione ed ampiezza che caratterizza CMT sembra avere caratteristiche estremamente locali associabili a variazioni circoscritte al sito.

2.3 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 sfrutta i dati Radar ad Apertura Sintetica (SAR) acquisiti dalle principali costellazioni satellitari attualmente operative: Sentinel-1A/B (S1) del programma europeo Copernicus, gestito dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA) e COSMO-SkyMed (CSK) dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI). L'analisi dei dati viene effettuata dall'Osservatorio Vesuviano in collaborazione con l'Osservatorio Nazionale Terremoti

2.3.1 Sentinel-1A/B (S1) - Analisi multi-temporale (anno 2021)

Per tale analisi sono stati utilizzati i dati in banda C dei sensori Sentinel-1A/B dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) disponibili in rete attraverso i canali web della stessa Agenzia. La successiva elaborazione ha consentito di generare mappe della velocità media di deformazione del suolo e serie temporali di deformazione dell'area Vesuviana sfruttando l'algoritmo d'interferometria differenziale denominato SBAS (Small BAseline Subset).

Il monitoraggio interferometrico in modalità multi-temporale della suddetta area per l'anno 2021 (03.01.2021-29.12.2021), è stato effettuato a partire da un dataset composto da 61 immagini dei sensori Sentinel-1A/B dell'ESA, che hanno consentito di generare 177 interferogrammi (3 connessioni/scena).

Il software utilizzato per l'elaborazione dei dati interferometrici è rappresentato da due codici *public domain* reperibili in rete sui siti dei rispettivi sviluppatori e utilizzati su piattaforma Linux/Mac OS X.

In particolare, (i) il codice ISCE (*InSAR Scientific Computing Environment*) per la generazione di *stack* (pile) di interferogrammi ed (ii) MintPy (*Miami INsar Time-series software in PYTHON*) per la generazione delle serie temporali di deformazione.

I due parametri *Baseline* temporale (Btemp, gg) e perpendicolare (B_⊥, m) sono stati, rispettivamente:

- $6 \leq B_{temp} \leq 18$
- $3 \leq B_{\perp} \leq 210$

Altri parametri d'interesse sono:

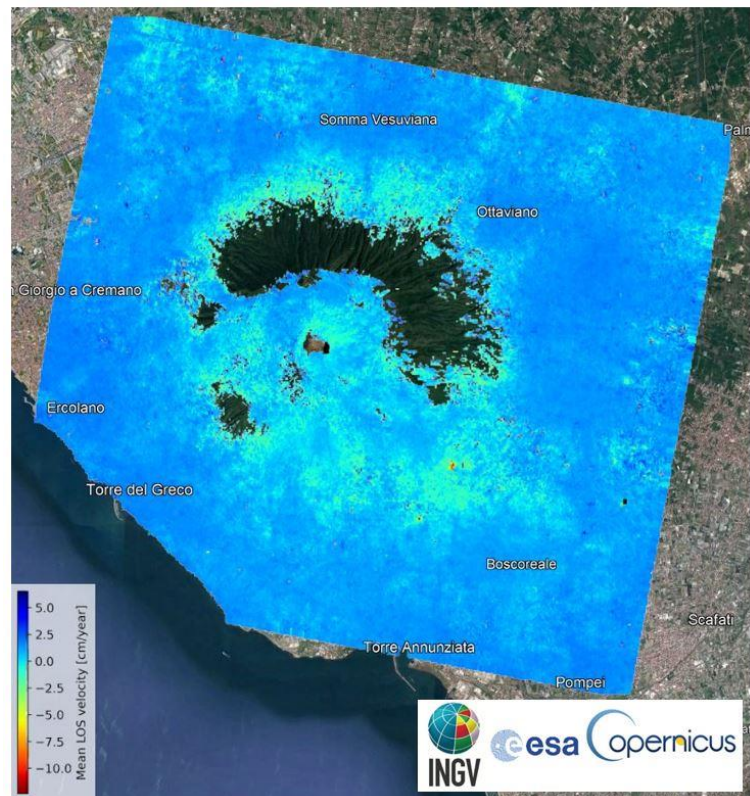
- Modalità d'acquisizione: TOPS mode, IWS (Interferometric Wide Swath)
- Orbita: Discendente (orbita 22, *swath* 1)
- Angolo di Incidenza (θ): $\sim 39^\circ$
- Fattore di multi-look: 8×2 (*range x azimuth*, dimensione del pixel a terra ~ 30 m)

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 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.

Il risultato di tale elaborazione ha consentito di generare per l'area Vesuviana la mappa della velocità media per il 2021 della deformazione del suolo nella linea di vista del sensore (LoS, *line-of-sight*) di cui alla Figura 2.3.1.

Figura 2.3.1 - Mappa della velocità media di deformazione nella linea di vista del sensore (Sentinel-1A/B) (03.01.2021-29.12.2021) per l'area Vesuviana. Dati IWS - TOPS mode, orbite discendenti (22), swath 1.



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

La rete GNSS in continuo dell'INGV-OV (De Martino et al., 2021) evidenzia come l'area Vesuviana sia caratterizzata da deformazioni del suolo con velocità dell'ordine di 1 mm/anno, ad eccezione della parte alta dell'edificio vulcanico (Gran Cono) che mostra una chiara subsidenza (6-7 mm/anno).

Le serie temporali della deformazione InSAR in LoS su pixel coerenti in area craterica (prossimi o coincidenti con le stazioni GNSS di BKE1 e BKNO), ridotti alla verticale tramite la relazione:

$$\text{deformazione verticale} \sim \text{deformazione LoS}/\cos \theta$$

(con $\theta = 39^\circ$ valore medio dell'angolo di incidenza del sensore) mostrano valori della velocità di subsidenza di circa 6-7 mm/anno (Figura 2.3.2), coerenti e confrontabili con quelli calcolati alle stazioni GNSS e dovuti a processi di compattazione e/o scivolamento di terreni poco coerenti ed in forte pendenza oltre ad effetti gravitativi.

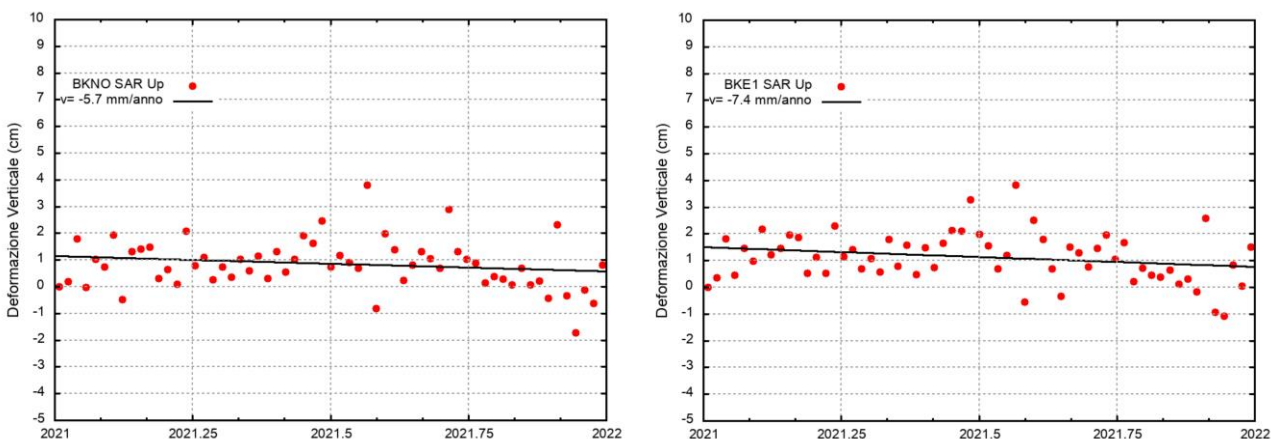


Figura 2.3.2 - Serie temporali (03.01.2021-29.12.2021) della deformazione verticale InSAR ricavata in corrispondenza delle stazioni GNSS in continuo BKNO e BKE1 in area craterica

Cosmo-SkyMed (CSK) - Analisi multi-temporale (2011-2021)

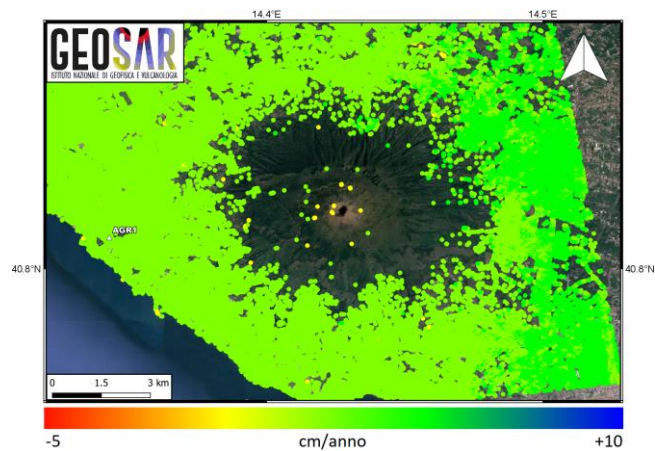
Questa attività è stata effettuata dal Laboratorio GeoSAR dell'INGV ed ha riguardato l'aggiornamento annuale delle serie temporali InSAR-CSK precedentemente stimate fino a dicembre 2020. Sono stati quindi aggiornati i risultati includendo le analisi ottenute con le 58 immagini acquisite nel 2021, a partire dal 10 gennaio fino al 28 dicembre 2021. Il software utilizzato per l'elaborazione dei dati interferometrici è rappresentato dal codice commerciale GAMMA utilizzato su piattaforma Linux.

Qui di seguito si riassumono i parametri inerenti la geometria di acquisizione delle immagini ed i parametri utilizzati nell'elaborazione InSAR:

- Orbita: Ascendente
- Angolo di Incidenza: ~49°
- Angolo di Azimuth: ~13°
- Dimensione Pixel: ~30x30m
- Tecnica di elaborazione: Multi-Temporal IPTA (*Interferometric Point Target Analysis*)
- DEM: 12m TanDEM-X
- Baseline perpendicolare massima: 280m
- Baseline temporale massima: 120 giorni

L'analisi InSAR ha prodotto la mappa delle velocità di deformazione del suolo (Figura 2.3.3) e le relative serie temporali per il periodo 2011-2021. A causa degli intensi fenomeni di decorrelazione temporale indotti dalla presenza di fitta vegetazione e neve, si registra una scarsa copertura del segnale SAR nell'area del cratere del Vesuvio. In generale, non si evidenziano significative deformazioni del suolo nell'area Vesuviana imputabili a fenomeni vulcanici.

Figura 2.3.3 - Mappa della velocità media di deformazione del suolo nella linea di vista del sensore (Cosmo-SkyMed) per l'area Vesuviana nel periodo dal 2011 al 2021.



Solo nella parte alta dell'edificio vulcanico (Gran Cono), probabilmente a causa di fenomeni gravitativi, si osserva una subsidenza con andamento quasi lineare a partire dal 2011 e con una velocità di circa 7 mm/anno in LoS (Figura 2.3.4), in accordo con i risultati delle stazioni GNSS presenti nell'area.

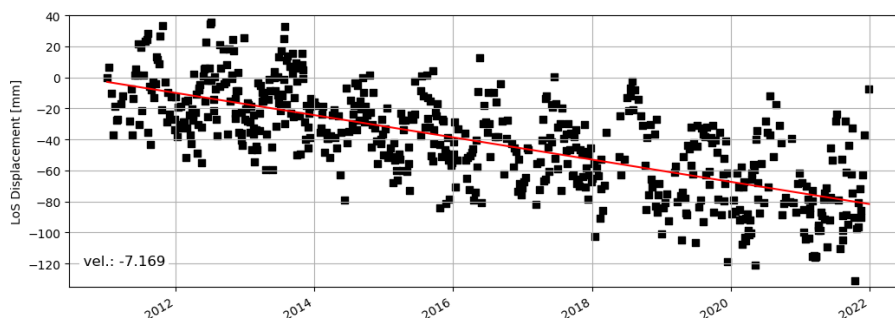


Figura 2.3.4 - Serie temporale (2011-2021) della deformazione InSAR nella linea di vista del sensore (Cosmo-SkyMed) di un target localizzato nell'area del Gran Cono (Vesuvio).

3 - MONITORAGGIO VULCANOLOGICO

Le attività di monitoraggio vulcanologico vengono svolte con una Rete Permanente di Telecamere Termiche e con campagne di misure con Termocamera Mobile e Termocoppia.

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 d'immagini all'infrarosso termico 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 consistente anomalia termica.



Figura 3.1.1 - Mappa della Rete Permanente di Monitoraggio Termico ad Immagine 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 Aggiornamento Giugno 2019	Termocamera FLIR A655 (640 x 480) FoV: 25° x 19°	Remote Monitoring System ICARO	Wi-Fi

La stazione, nella sua configurazione strumentale attuale, è stata installata nel 2013. Nella seconda metà del mese di giugno 2019 è stato effettuato un intervento di manutenzione straordinaria che ha riguardato, tra l'altro, la sostituzione della termocamera. La nuova termocamera con risoluzione geometrica di 640 x 480 pixel restituisce una immagine termografica con risoluzione spaziale quattro volte superiore rispetto alla precedente che era equipaggiata con un sensore radiometrico di 320 x 240 pixel.

In Figura 3.1.2 è riportata l'elaborazione delle serie temporali relative alle acquisizioni notturne effettuate con le due differenti termocamere.

Il risultato di tali elaborazioni è rappresentato dalle serie temporali dei valori di temperatura massima delle immagini IR ottenute mediante processamento effettuato con l'utilizzo dell'algoritmo di destagionalizzazione analitica STL (Seasonal Trend Decomposition) implementato nel software A.S.I.R.A.

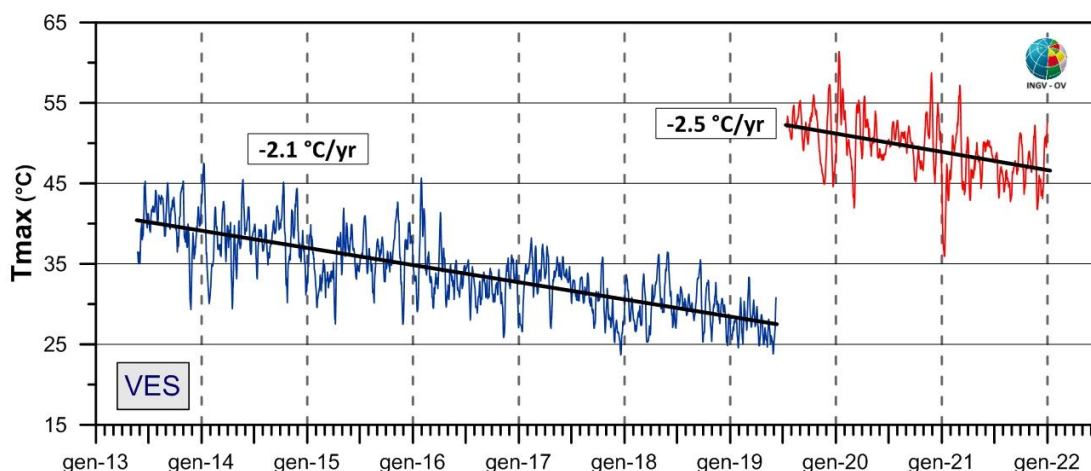


Figura 3.1.2 - Stazione Vesuvio (VES). Serie temporali dei valori di temperatura massima giornaliera rilevata nelle immagini IR destagionalizzate mediante applicazione dell'algoritmo STL [medie settimanali termocamera 320x240 (blu); medie settimanali termocamera 640x480 (rosso)].

In generale, i cronogrammi relativi all'elaborazione delle serie temporali delle temperature massime relative alle acquisizioni notturne effettuate con le due differenti termocamere evidenziano, anche per il secondo semestre 2021, il perdurare del trend pluriennale già identificato in precedenza (linea blu in Fig. 3.1.2), caratterizzato dalla presenza di oscillazioni di varia ampiezza e periodo e da un andamento a lungo termine in leggera e costante diminuzione.

La serie temporale dei valori di temperatura massima rilevati nella serie di immagini IR acquisite dal nuovo sensore IR mostra che i valori di temperatura massima rilevati da quest'ultimo risultano essere considerevolmente più elevati rispetto a quelli forniti dal vecchio sensore.

Le differenze nell'intensità della radiazione termica massima rilevate dalle due diverse termocamere è dovuta alla loro differente risoluzione spaziale. Infatti nel grafico di figura 3.1.3 i valori della temperatura media delle scene acquisite con la precedente strumentazione (linea blu) e con la nuova (linea rossa), sono del tutto confrontabili.

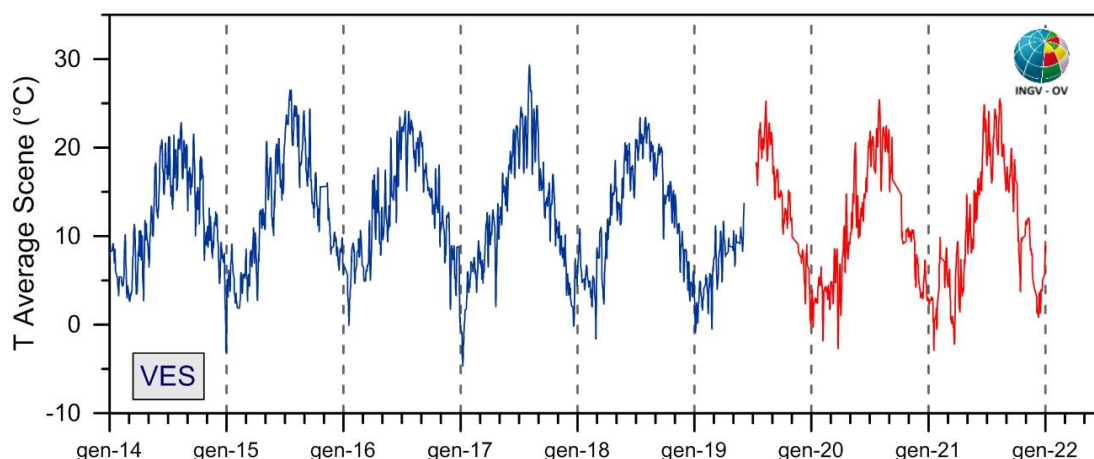


Figura 3.1.3 - Stazione Vesuvio: Serie temporale dei valori di temperatura media relativi ad ogni immagine acquisita con la precedente stazione (linea blu) e con quella di più recente installazione (linea rossa).

Tale osservazione suggerisce la stabilità dei valori di energia termica irradiata dall'intera area target e conferma pertanto il perdurare nel corso del secondo semestre 2021 di un andamento sostanzialmente stazionario delle temperature superficiali dell'area monitorata.

3.2 Monitoraggio Termico con Termocamera Mobile e Termocoppia

E. Marotta¹, R. Avino¹, P. Belviso¹, A. Carandente¹, R. Nave¹, R. Peluso¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

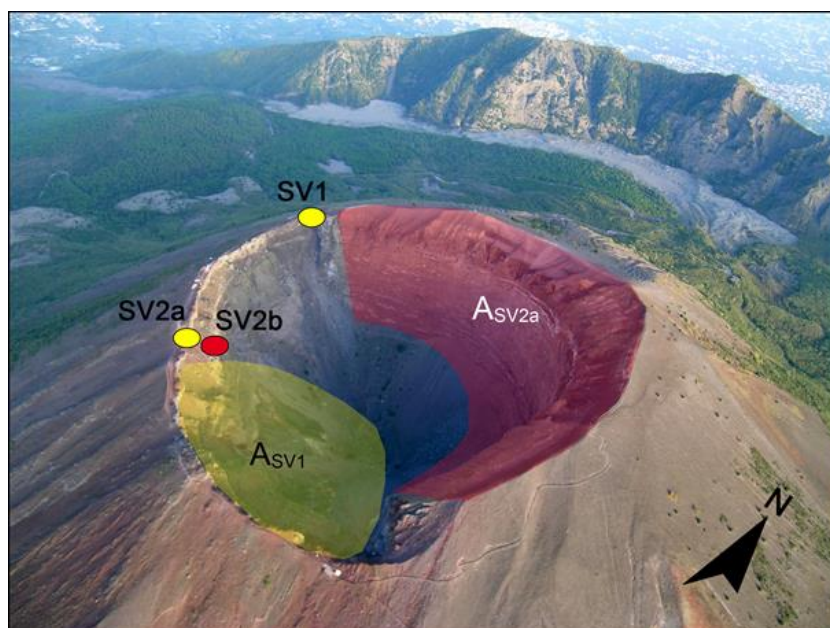
La sorveglianza vulcanologica tramite Telecamere Termiche Mobili (TTM) e termocoppie rigide ha come principale obiettivo l'individuazione di eventuali variazioni nel tempo dei valori di temperatura misurati al suolo in punti discreti e/o di aree a maggiore temperatura in modo da evidenziare eventuali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

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.

I rilievi vengono eseguiti solamente con telecamera termica dai punti stazione SV1 e SV2a, e con l'ausilio di termocoppia rigida al punto stazione SV2b (Fig. 3.2.1).

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.



La comparazione delle fotocomposizioni d'immagini termiche del versante interno orientale del cratere, riprese dal punto stazione SV2 (Figura 3.2.1) da luglio a dicembre 2021, non evidenzia significative modifiche nella distribuzione areale del campo fumarolico (Figura 3.2.2b, b1, b2).

La freccia gialla in Figura 3.2.2 indica il punto costantemente a più alta temperatura (che varia da circa 50 a circa 70 °C), il cui valore è piuttosto stabile all'interno delle variazioni stagionali.

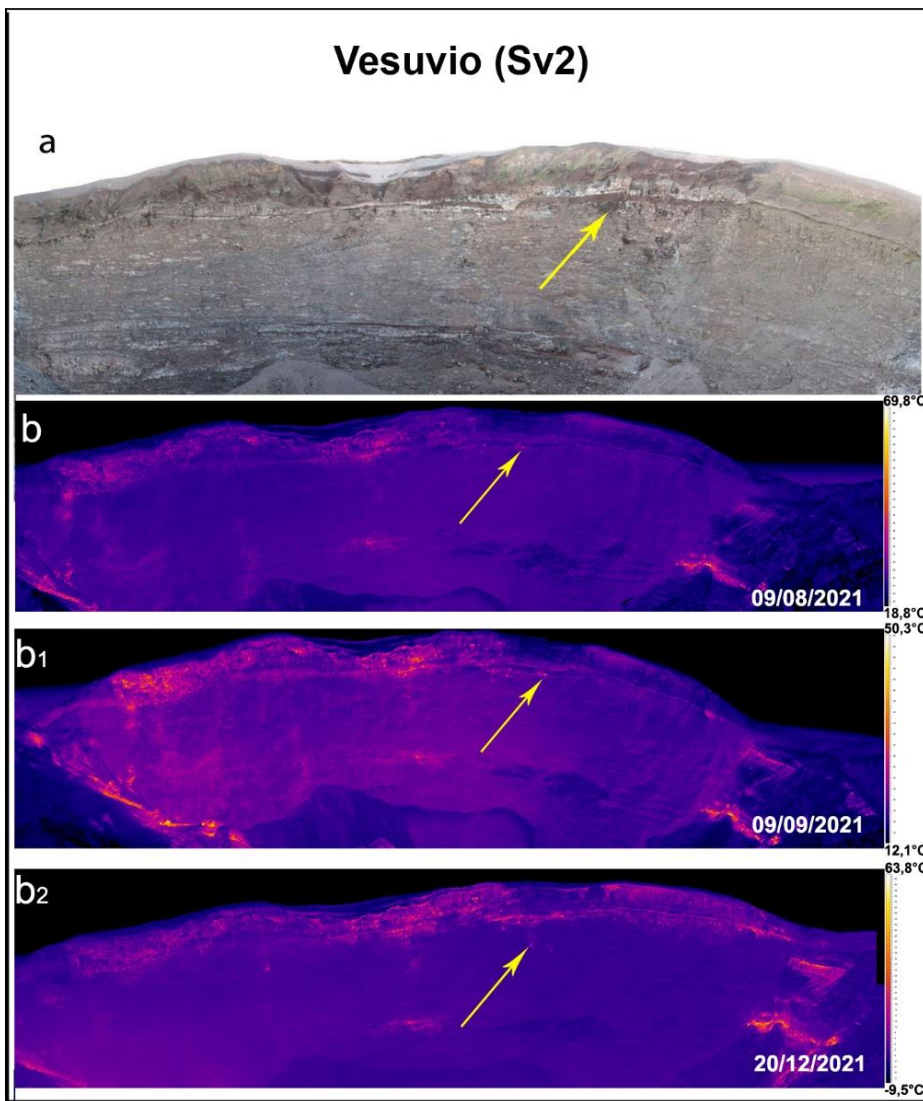
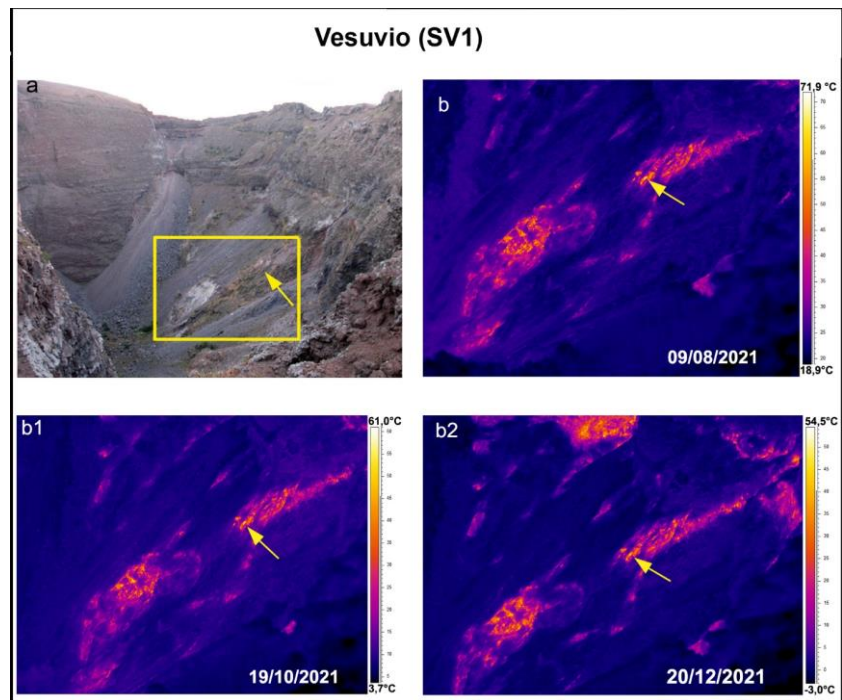


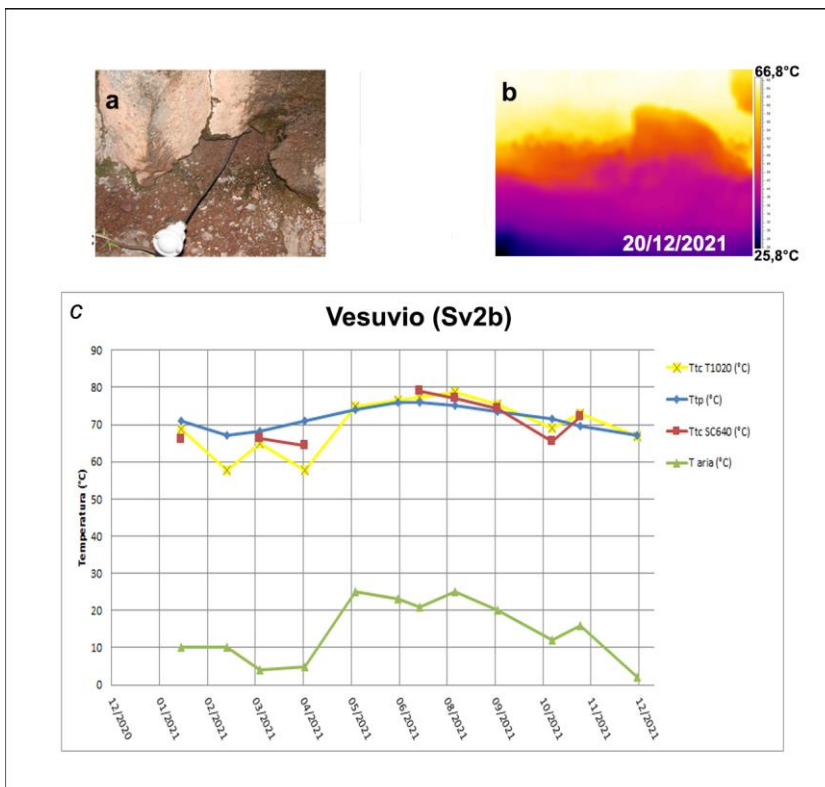
Figura 3.2.2 – Settore orientale del cratere del Vesuvio. Fotocomposizioni di immagini nel visibile (a) e delle corrispondenti immagini termiche relative al 09/08/2021 (b), 09/09/2021 (b1) e 20/12/2021 (b2) dal punto stazione SV2a di Fig. 3.2.1.

Anche la comparazione di fotocomposizioni delle immagini termiche effettuate dal punto stazione SV1 (Figura 3.2.1) durante il secondo semestre 2021 non evidenzia significative modifiche nella distribuzione areale del campo fumarolico (Figura 3.2.3b, b1, b2). La freccia gialla in figura 3.2.3 indica il punto costantemente a più alta temperatura (che varia da circa 50 a circa 60 °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 09/08/2021 (b), il 19/10/2021 (b1) e il 20/12/2021 (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. Le temperature rilevate rientrano nelle medie stagionali degli anni precedenti.



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 SC640 (TtcSC640), 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 dicembre 2020 a dicembre 2021 (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, E. Bagnato¹, A. Carandente¹, E. Cuoco¹, C. Minopoli¹, 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.

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, FC5), 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	40.8212N 14.4254E	Vesuvio Fondo Cratere	2017	OV	Flusso di CO ₂ , multiparametrica

L’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, δ¹⁵N_{N2}, δ¹³C_{CO2}; δ¹⁸O_{CO2}, δ²H_{H2O}, δ¹⁸O_{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.

Entrambe le stazioni sono basate 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 dell'Osservatorio Vesuviano.

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 nelle precedenti Relazioni 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/CO_2 che della p_{CO_2} stimata sulla base di ge indicatori gassosi. Contemporaneamente si è verificata la diminuzione del rapporto H_2/CO_2 e l'incremento del rapporto CO_2/CH_4 (Figura 4.1.2). Tali variazioni sono state interpretate come un incremento dell'input di fluidi magmatici più ossidanti, poveri in CH_4 e ricchi in He nel sistema idrotermale. 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 Figura 4.1.2, mostrano composizioni simili e variazioni composizionali contemporanee, pertanto i dati composizionali di questa fumarola possono essere utilizzati come una valida alternativa nel monitoraggio del sistema idrotermale.

Analogamente le stime di temperatura e di pressione parziale di CO_2 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.

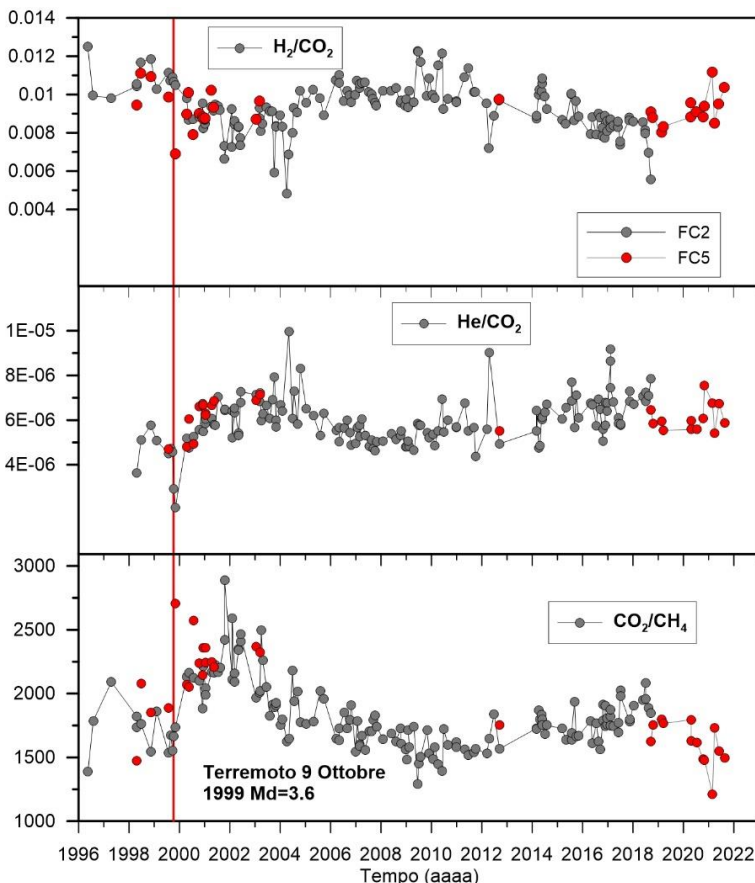
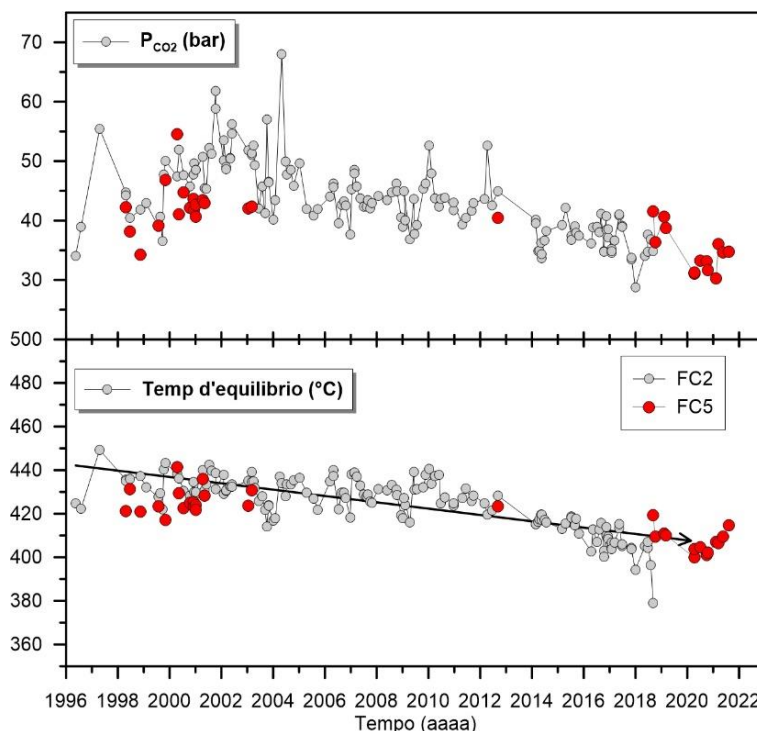


Figura 4.1.2 - Variazioni composizionali delle fumarole FC2 (simboli grigi) e FC5 (simboli rossi) nel periodo 1996-2021.

Va comunque segnalato che nei campioni degli ultimi anni si registra un lieve aumento del rapporto CO_2/CH_4 ed He/CO_2 , 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 CO_2 (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).

Figura 4.1.3 - Cronogramma dei valori d'equilibrio della temperatura e pressione parziale di CO_2 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 d'equilibrio.



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 primo semestre 2021 non ha mostrato variazioni significative rispetto ai periodi precedenti (Figura 4.1.4).

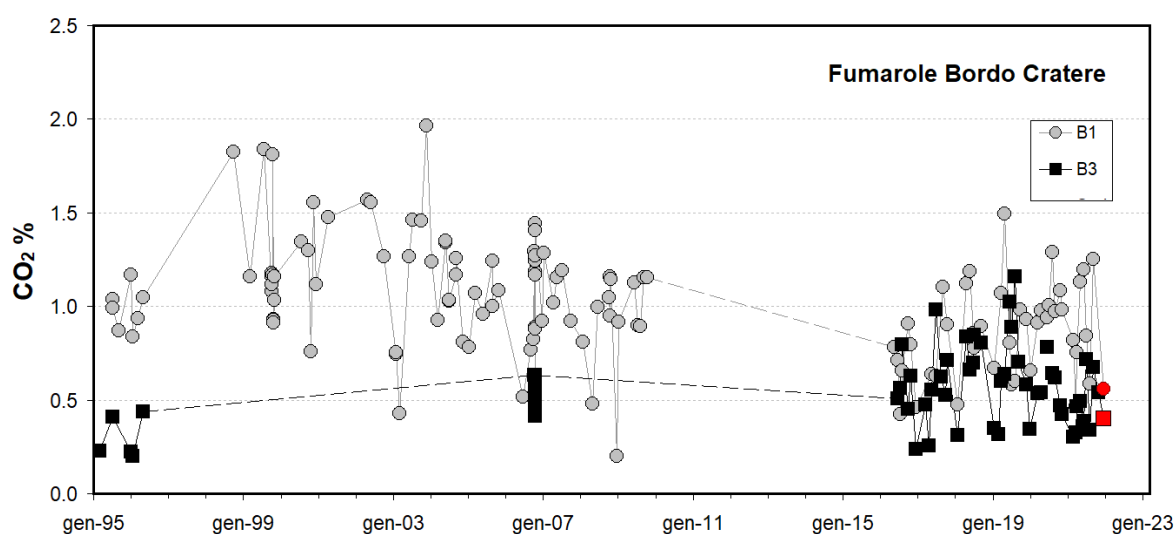


Figura 4.1.4 - Variazione temporale della concentrazione di CO_2 delle fumarole di bordo cratere). Con i simboli rossi sono riportati i campioni relativi al secondo semestre 2021.

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.).

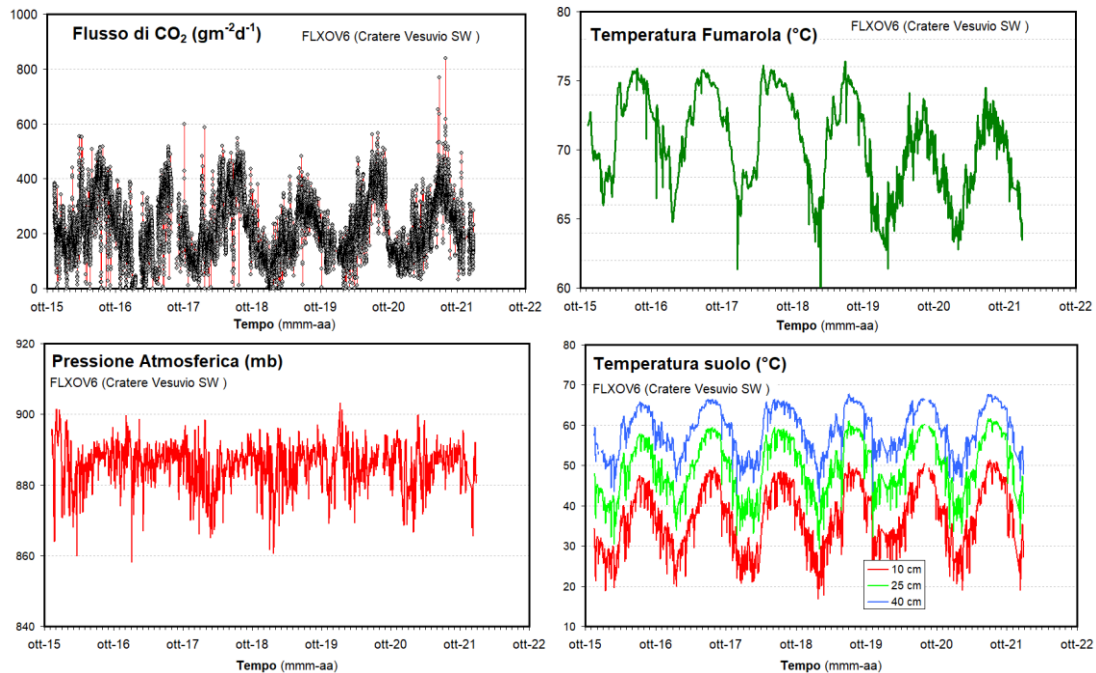


Figura 4.1.5 - Serie temporali di alcuni parametri misurati dalla stazione geochimica FLXOV6 installata in area bordo cratere del Vesuvio (settore SW). I valori, eccetto il flusso di CO₂ dal suolo, sono riportati come medie giornaliere.

La stazione multiparametrica di fondo cratere (FLXOV7) ha acquisito i seguenti parametri:

- flusso di CO₂ dal suolo
- temperatura della maggiore emissione fumarolica dell'area

Dal mese di ottobre 2021 la stazione di fondo cratere è stata danneggiata e non è più funzionante, necessita di un intervento di manutenzione per il ripristino. In Figura 4.1.6 sono riportati i parametri acquisiti dalla stazione.

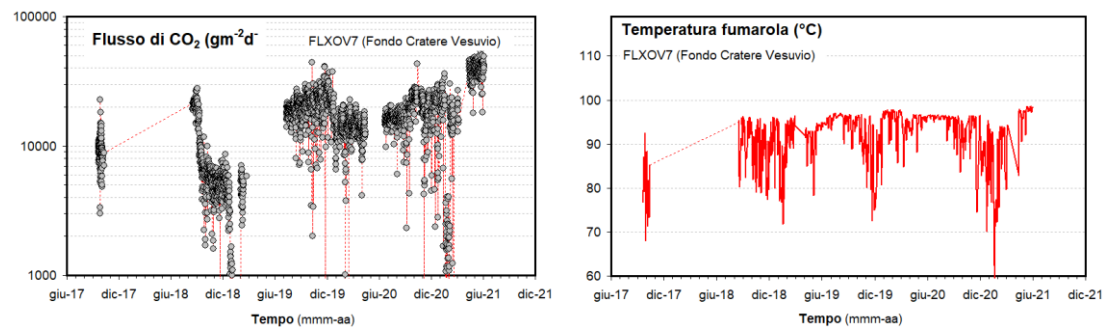


Figura 4.1.6 - Parametri misurati dalla stazione geochimica (FLXOV7) installata in area di fondo cratere del Vesuvio. I valori, eccetto il flusso di CO₂ dal suolo, sono riportati come medie giornaliere.

4.2 Monitoraggio Geochimico della Sezione di Palermo

S. Bellomo¹, A. Correale¹, W. D’Alessandro¹, C. Federico¹, A. Gattuso¹, G. Giuffrida¹,
L. La Pica¹, M.G. Misseri¹, V. Prano¹

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 e 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.

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).

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

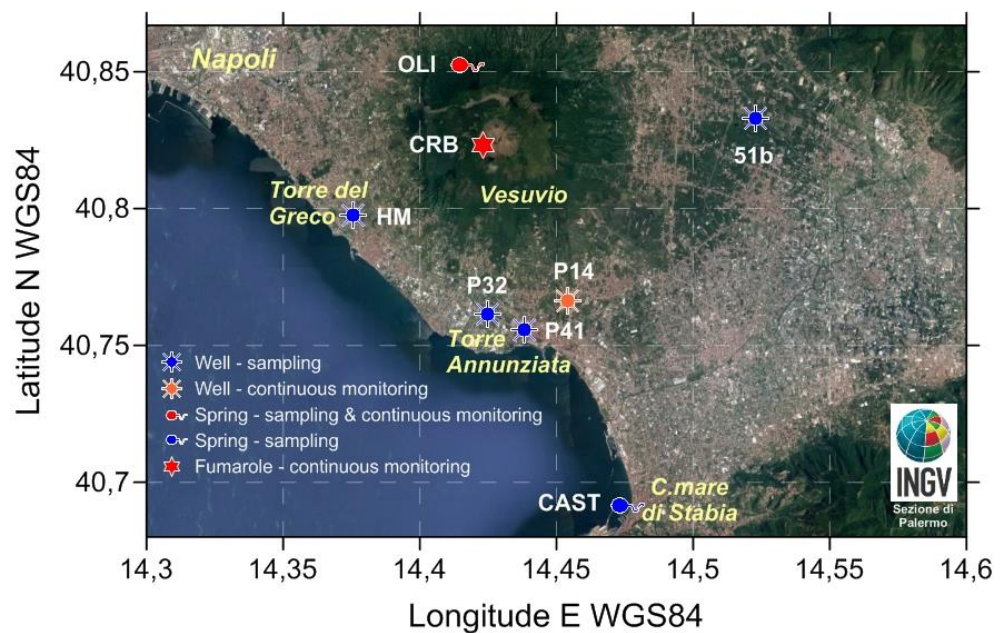


Figura 4.2.1 - Localizzazione dei siti di campionamento della Sezione di Palermo.

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

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

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

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, uno 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 17/12/2021, data dell'ultima campagna di misure durante la quale non è stato possibile effettuare il campionamento del pozzo HM a causa di un problema tecnico nella pompa di sollevamento.

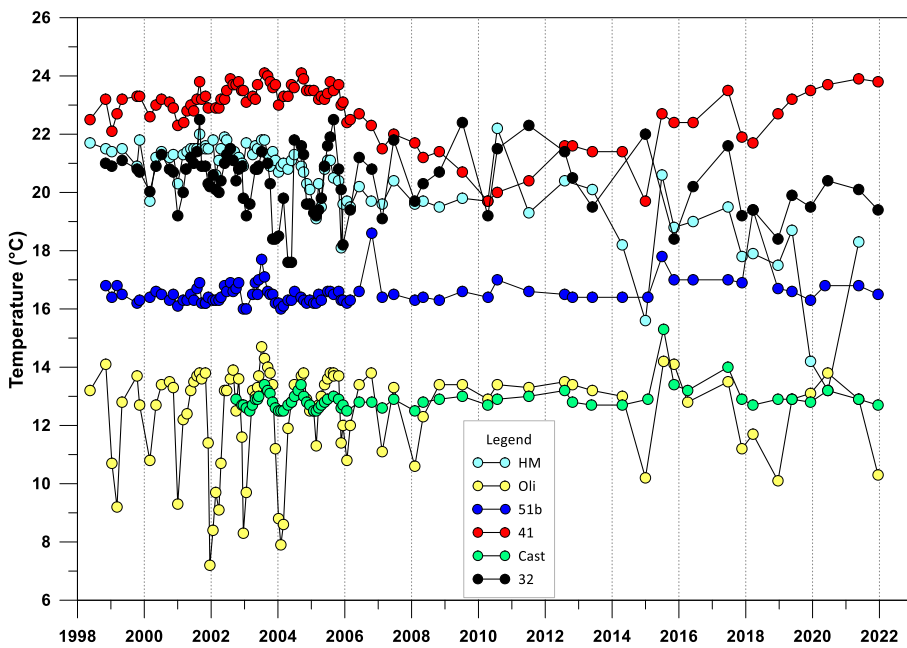


Figura 4.2.2 - Variazioni temporali della temperatura delle falde sotterranee.

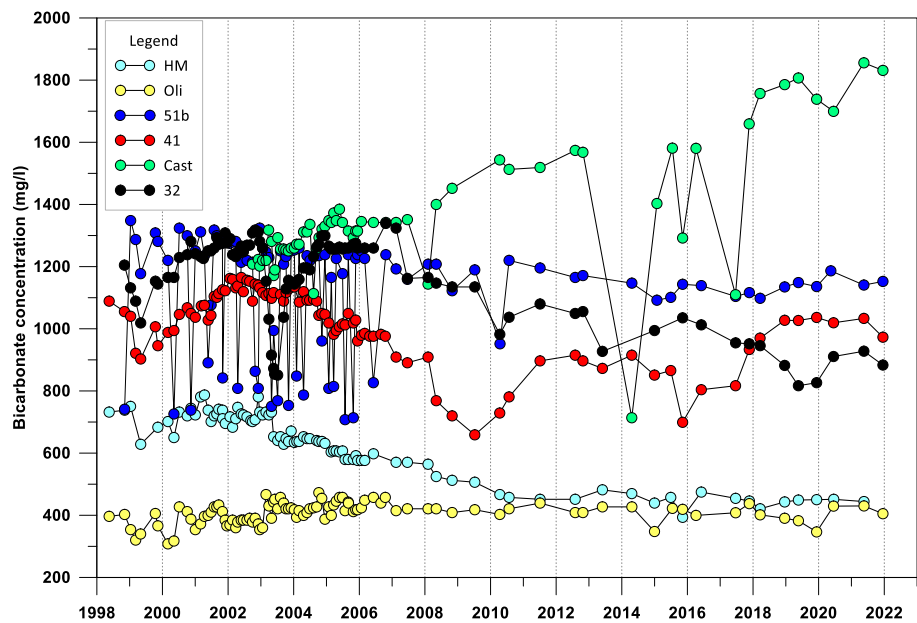


Figura 4.2.3 - Variazioni temporali della concentrazione dello ione bicarbonato nelle acque sotterranee.

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 per quanto riguarda lo ione bicarbonato correlato al graduale incremento di CO₂ disciolta (Figg. 4.2.3 e 4.2.4).

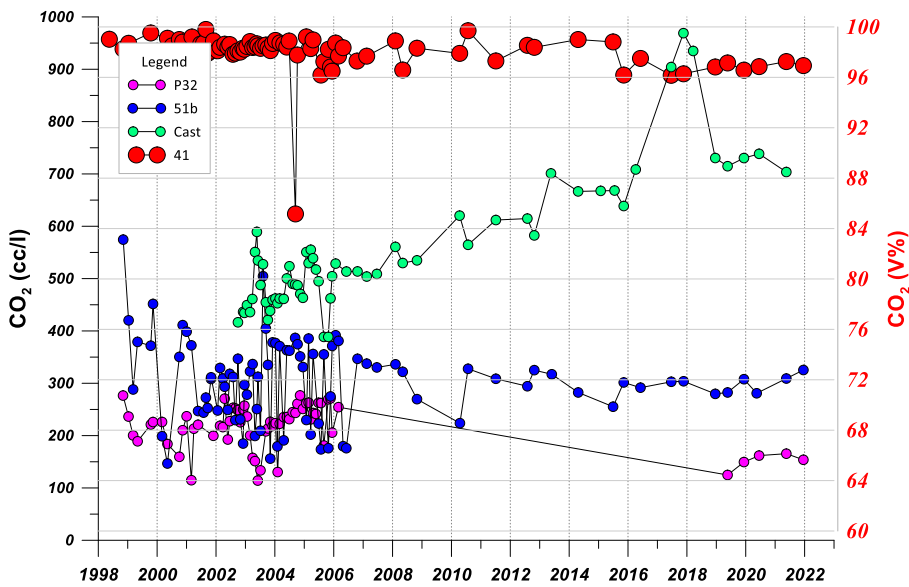


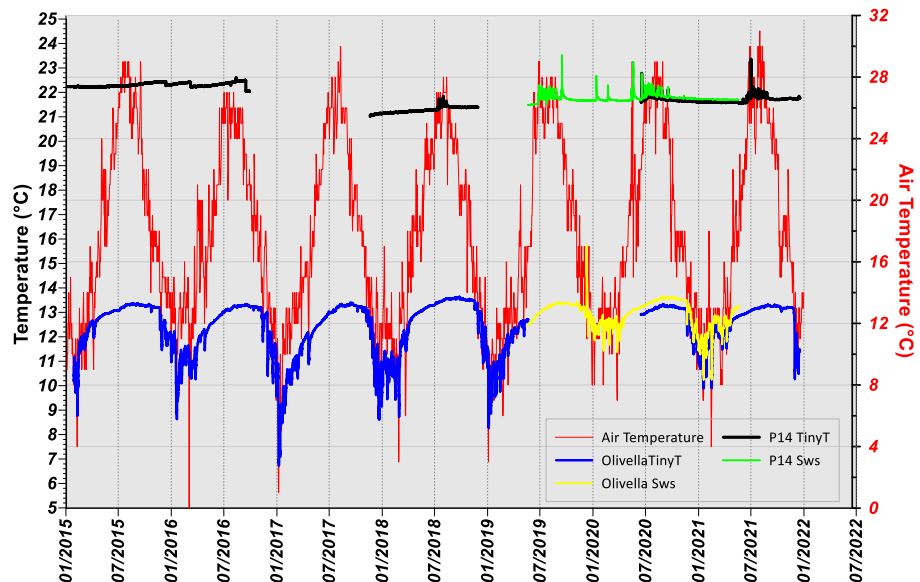
Figura 4.2.4 – Variazioni temporali della CO₂ disciolta (cc/l) nelle acque e della CO₂ libera (V%).

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-dicembre 2021 mostrano una perfetta sovrapposizione negli andamenti a meno di una piccolissima differenza costante nel tempo.

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.

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



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).

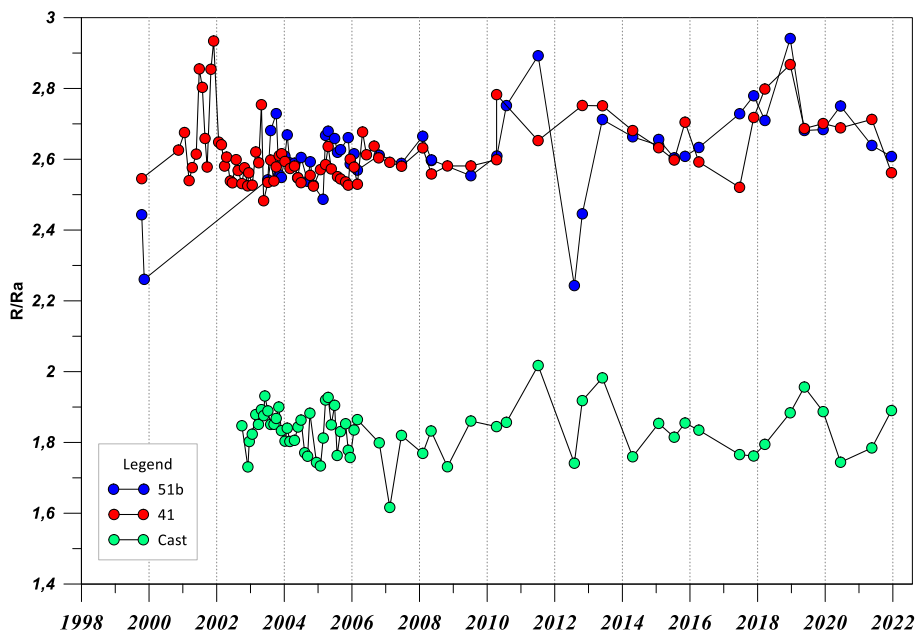


Figura 4.2.6 – Variazione temporali del rapporto R/Ra nelle acque sotterranee.

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, G. Borriello¹, C. Buonocunto¹,
A. Caputo¹, A. Carandente¹, P. Cusano¹, R. Esposito¹, G. Gaudiosi¹, S. Guardato¹,
F. Liguoro¹, D. Lo Bascio¹, L. Nardone¹, 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 26 siti di installazione terrestre e marina (Figura 1.1.1, Tabella 1.1.1). 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.

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, il sito del Castello di Baia è duplicato con una stazione digitale CBAC e una analogica BAC così come il sito di Tennis Hotel è attualmente costituito da una stazione analogica STH e una digitale CSTH.

Nella rete sono presenti 5 stazioni di tipo analogico equipaggiate con sensori da 1Hz di cui due utilizzano sensori monocomponente. Le 23 rimanenti stazioni sono digitali: quelle terrestri sono basate sull'acquisitore GILDA, progettato e realizzato presso l'INGV Osservatorio Vesuviano, e Guralp Affinity, mentre 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: 12 velocimetri a larga banda (Broad Band: 0.016-50 Hz), 4 velocimetri a banda molto larga (120 s), 2 sensori da pozzo Guralp 3TB/5TB costituito da velocimetro Very Broad Band (0.008–50 Hz) accoppiato ad accelerometro, 3 Trillium compact OBS (120s), 3 velocimetri attivi a corto periodo (1-80 Hz), 1 velocimetro da 20s, 5 accelerometri da superficie.

La rete dispone anche di 4 microfoni infrasonici Infracyrus e un array infrasonico di 4 elementi basato su questi stessi sensori ed installato sul tetto dell'edificio dell'Osservatorio Vesuviano. Il totale dei sensori infrasonici è di 8.

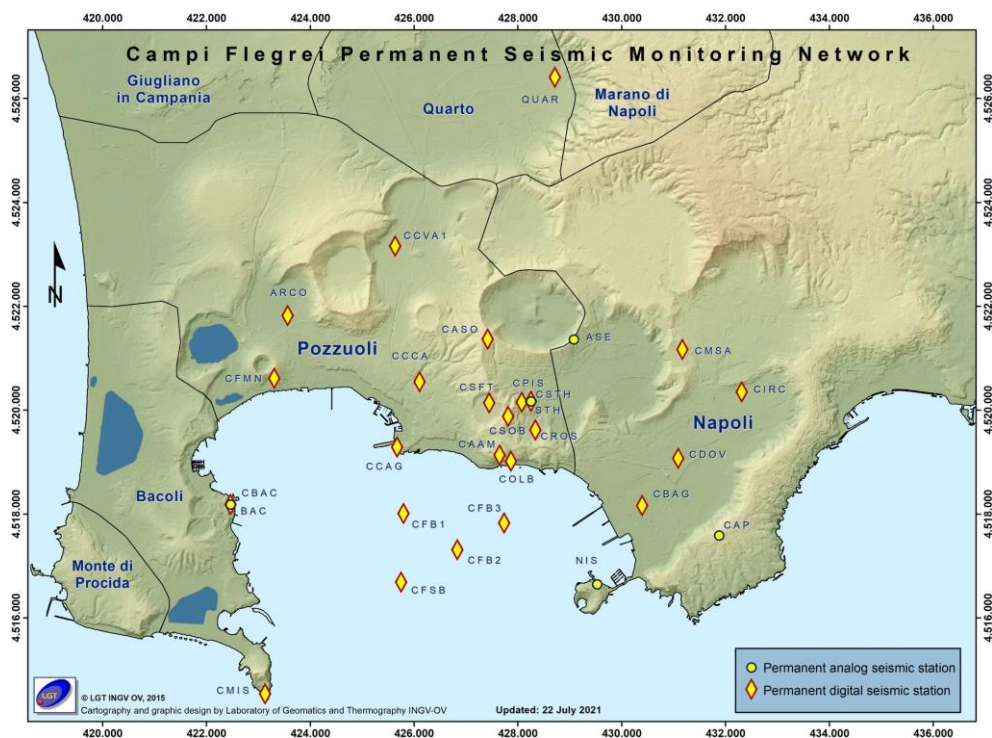


Figura 1.1.1 – Rete Sismica Permanente dei Campi Flegrei.

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

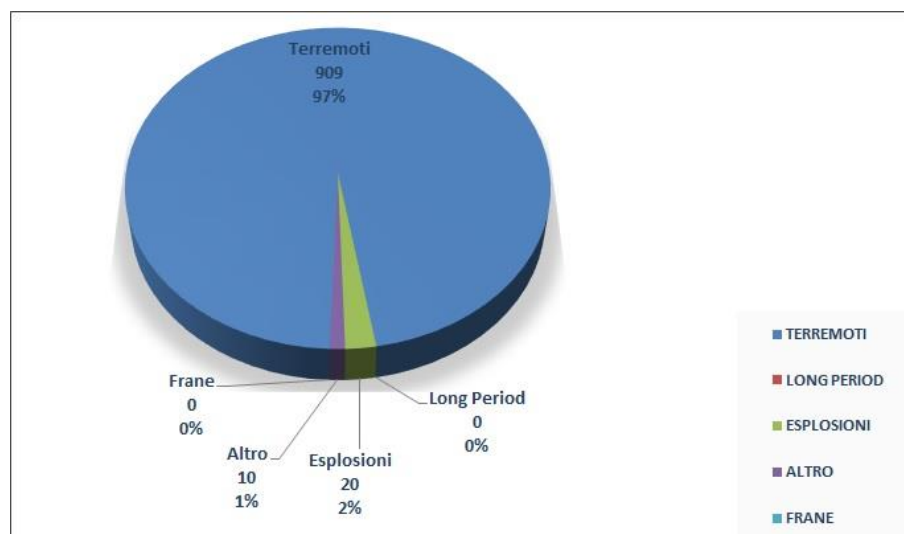
Stazione	Località	Coordinate	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
ARCO	Arco Felice	40.8438N 14.0933E 22 m	01/02/2006	Guralp CMG-40T 60s	GILDA	ADSL
ASE	Astroni Est	40.8402N 14.1587E 107 m	28/07/2000	Mark L4-C 1Hz	Analogica	Radio UHF analogica
CAAM	Accademia Aeronautica Militare	40.8200N 14.1420E 100 m	09/12/2011	Guralp CMG-40T 60s Microfono Infracyrus	GILDA	ADSL
CAP	Posillipo	40.8064N 14.1923E 166 m	20/04/2005	Mark L4-C 1Hz	Analogica	Acquisizione diretta
CASO	Astroni Ovest	40.8401N 14.1390E 222 m	01/07/2015	Lennartz 3D-Lite	GILDA	Wi-Fi
CBAC	Castello di Baia	40.8110N 14.0807E 33 m	15/09/2009	Lennartz 3D-Lite	GILDA	Wi-Fi
BAC		01/05/1970	Geotech S13	Analogica	Radio UHF	
CBAG	Bagnoli	40.8115N, 14.1747E 169 m + 5 m	20/05/2014	Guralp 3TB(120s)/5TB pozzo Guralp CMG-40T 30s superficie	2 GILDA 1 GILDA	Wi-Fi
CCA	Zona Celle Pozzuoli	40.8326N 14.1236E -26m	23/05/2016	Guralp 3TB(120s)/5TB pozzo	2 GILDA	UMTS

CCVA	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 Diocleziano	40.8197N 14.1828E 18 m	28/05/2011	Lennartz 3D-Lite Array Microfoni 4 Infracyrus	GILDA GILDA	Rete dati interna
CFB1	Golfo di Pozzuoli	40.8103N 14.1212E -40 m	Luglio 2016	Trillium compact OBS (120s), ColibrySF- 300L, 2 SQ02 idrophone, Paroscientific 8CDP130-I pressure sensor	Guralp DM24	Wi-Fi
CFB2	Golfo di Pozzuoli	40.8042N 14.1338E -74 m	Luglio 2016	Trillium compact OBS (120s), ColibrySF- 300L, 2 SQ02 idrophone, Paroscientific 8CDP130-I pressure sensor	Guralp DM24	Wi-Fi
CFB3	Golfo di Pozzuoli	40.8090N 14.1442E -38 m	2016	Trillium compact OBS (120s), ColibrySF- 300L, 2 SQ02 idrophone, Paroscientific 8CDP130-I pressure sensor	Guralp DM24	Wi-Fi
CSFB	Golfo di Pozzuoli	40.7978N 14.1198E -96 m	2008	SQ03-10 idrophone, ColibrySF-300L	Kinematics Q330, GILDA	Wi-Fi
CFMN	Oasi WWF Monte Nuovo	40.8329N 14.0904E 50 m	23/09/2014	Guralp CMG-40T 60s	GILDA	Wi-Fi
CIRC	Via Metastasio Fuorigrotta	40.8314N 14.1972E 40 m	05/02/2016	Lennartz 3D-Lite 20s	GILDA	UMTS
CMIS	Capo Miseno	40.7782N 14.0890E 82 m	12/10/2015	Guralp CMG-40T 60s	GILDA	Wi-Fi
CMSA	Monte S. Angelo Dip. Scienze Fisiche	40.8386N 14.1836E 95 m	28/11/2008	Guralp CMG-40T 60s	GILDA	ADSL
COLB	Galleria SEPSA Olibano	40.8190N 14.1446E 8m	06/07/2011	Guralp CMG-40T 60s Microfono Infracyrus	GILDA	Wi-Fi
CPIS	Pisciarelli	40.8292N 14.1470E 69 m	29/01/2010	Guralp CMG-40T 60s Microfono Infracyrus	GILDA	Radio UHF digitale

CPOZ	Pozzuoli Darsena	40.8212N 14.1186E 3 m	19/07/2011	Guralp CMG-40T 60s Episensor ES-T	2 GILDA	Wi-Fi
CSOB	Solfatara Bordo Est	40.8267N 14.1439E 177 m	2007	Guralp CMG-40T Episensor ES-T	2 GILDA	Wi-Fi
CSFT	Solfatara	40.8290N 14.1395E 108 m	Gennaio 2013	Guralp CMG-40T Microfono Infracyrus	GILDA	Wi-Fi
NIS	Nisida	40.7978N 14.1646E 1 m	1983	Mark L4-3D	Analogica	Linea CDA
QUAR	Quarto	40.8856N 14.1538E 65 m ... -180 m		Guralp CMG-40T	GILDA	ADSL
STH CSTH	Solfatara Tennis Hotel	40.8294N 14.1491E 65 m	1983 2021	Mark L4-3D Guralp 3ESPC Guralp Fortis	Analogica Guralp Affinity	Linea CDA UMTS

Nel corso del secondo semestre 2021, sono stati registrati un totale di 939 eventi locali, ripartiti nelle diverse tipologie riportate in Figura 1.1.2.

Figura 1.1.2 – Distribuzione percentuale degli eventi per tipologia nel secondo semestre 2021. 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 secondo semestre 2021 sono stati registrati 909 terremoti vulcano-tettonici ($M_{dmax}=2.2\pm 0.3$) la maggior parte dei quali di magnitudo inferiore a 1.0 (Tab. 1.1.2). Permane un incremento nel numero totale di eventi registrati rispetto a quello medio degli anni precedenti anche se in diminuzione rispetto al primo semestre 2021 (Figura 1.1.3). E’ stato possibile determinare i parametri ipocentrali di 527 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 2 km e profondità massime fino a circa 4 km (Figure 1.1.4 e 1.1.5).

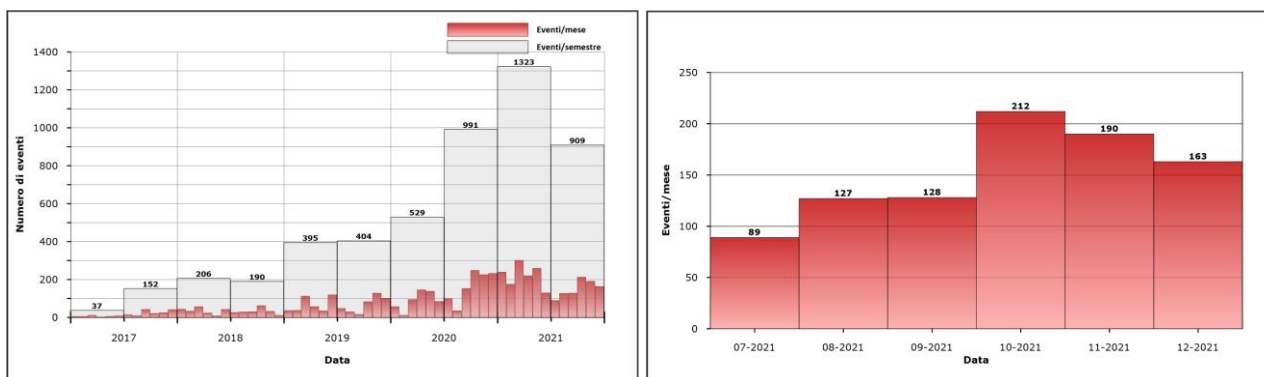


Figura 1.1.3 – Frequenza di accadimento dei terremoti ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2021 (a destra).

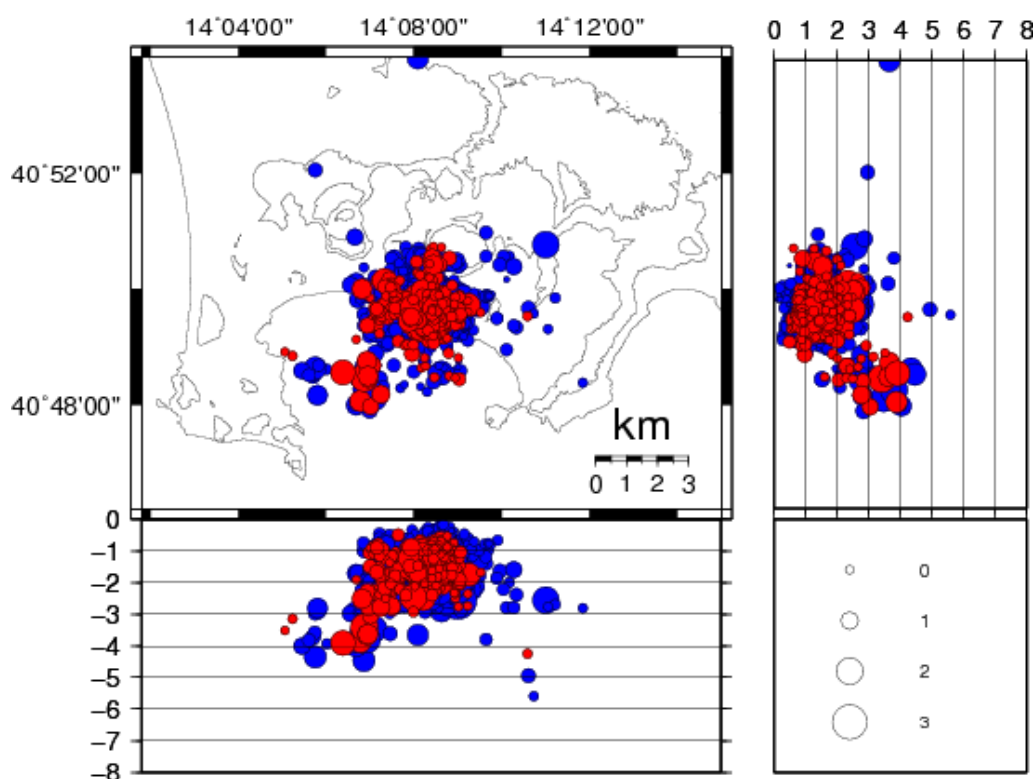


Figura 1.1.4 – Localizzazione degli ipocentri nell’area flegrea durante gli ultimi 5 anni (in blu) e nel secondo semestre 2021 (in rosso).

Tabella 1.1.2 - Riepilogo della sismicità registrata Campi Flegrei nel corso degli ultimi 5 anni i (a sinistra) e del secondo semestre 2021 (a destra) suddivisa per classi di magnitudo e relative percentuali.

Numero totale terremoti: 5136		$M_{dmax}=3.3\pm 0.3$
Numero terremoti con $M_d < 0.0$	2960	(57.63%)
Numero terremoti con $0.0 \leq M_d < 1.0$	1416	(27.57%)
Numero terremoti con $1.0 \leq M_d < 2.0$	151	(2.94%)
Numero terremoti con $2.0 \leq M_d < 3.0$	18	(0.35%)
Numero terremoti con $M_d \geq 3.0$	2	(0.04%)
Numero terremoti con M_d N.D.	589	(11.47%)

Numero totale terremoti: 909		$M_{dmax}=2.2\pm 0.3$
Numero terremoti con $M_d < 0.0$	546	(60.07%)
Numero terremoti con $0.0 \leq M_d < 1.0$	228	(25.08%)
Numero terremoti con $1.0 \leq M_d < 2.0$	21	(2.31%)
Numero terremoti con $M_d \geq 2.0$	2	(0.22%)
Numero terremoti con M_d N.D.	112	(12.32%)

Non si evidenziano particolari variazioni nella distribuzione delle localizzazioni (Figura 1.1.4), nelle profondità ipocentrali (Figura 1.1.5), nella distribuzione temporale delle magnitudo (Figura 1.1.6) e nel rilascio cumulativo di energia (Figura 1.1.7).

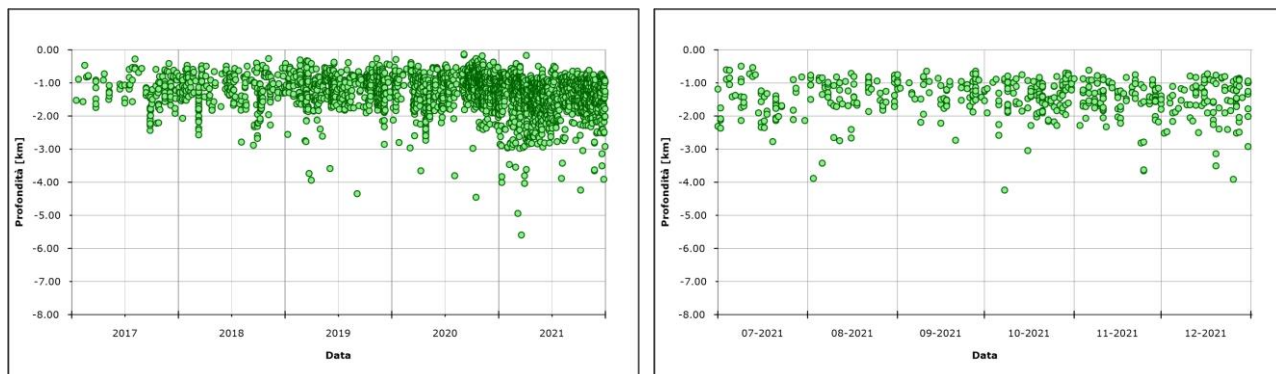


Figura 1.1.5 – Variazione temporale della profondità ipocentrale dei terremoti nell’area flegrea localizzati nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2021 (a destra).

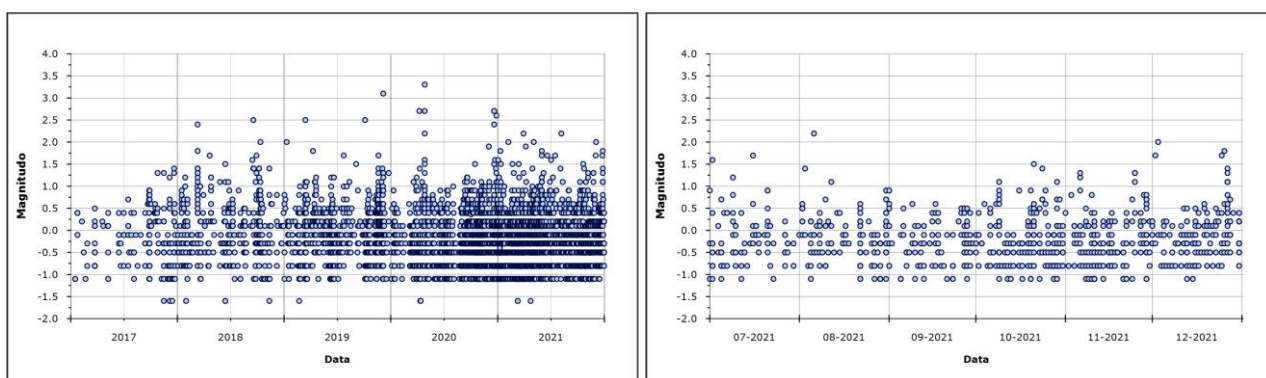


Figura 1.1.6 - Variazione temporale della magnitudo dei terremoti nell’area flegrea nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2021 (a destra).

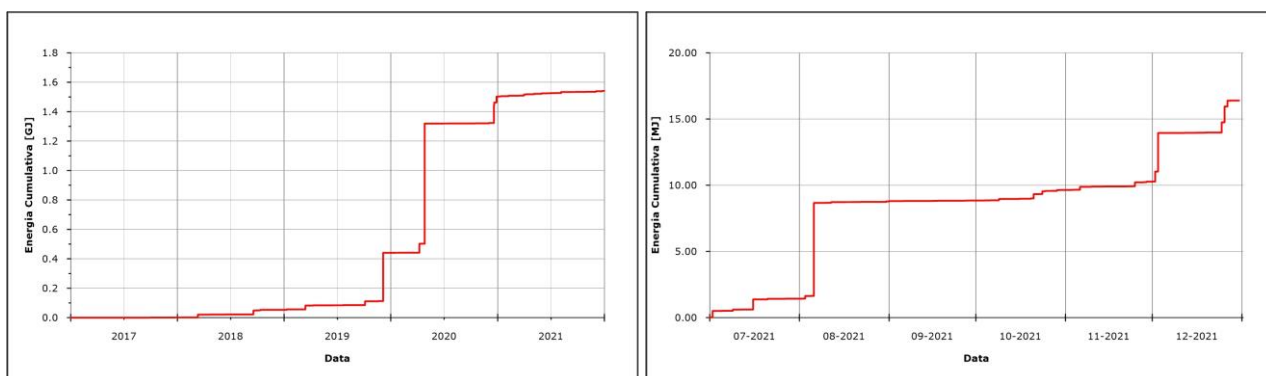


Figura 1.1.7 – Andamento cumulativo dell’energia rilasciata dai terremoti nell’area flegrea nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2021 (a destra).

L'analisi dei meccanismi focali di 2 degli 8 eventi di magnitudo ≥ 1.5 (Tabella 1.1.3) registrati ai Campi Flegrei nel corso del secondo semestre 2021 mostra, per l'evento del 03/12 alle 12:10 UTC, una soluzione associabile ad un meccanismo di tipo normale con componente obliqua, mentre, per l'evento del 26/12 alle 03:52, una soluzione associabile ad un meccanismo di tipo compressivo (Figura 1.1.8). Non è stato possibile elaborare il meccanismo focale per gli altri eventi riportati in Tabella 1.1.3, a causa della forte incertezza sulle polarità dei primi impulsi ad alcune stazioni, dovuta all'elevato rumore di fondo.

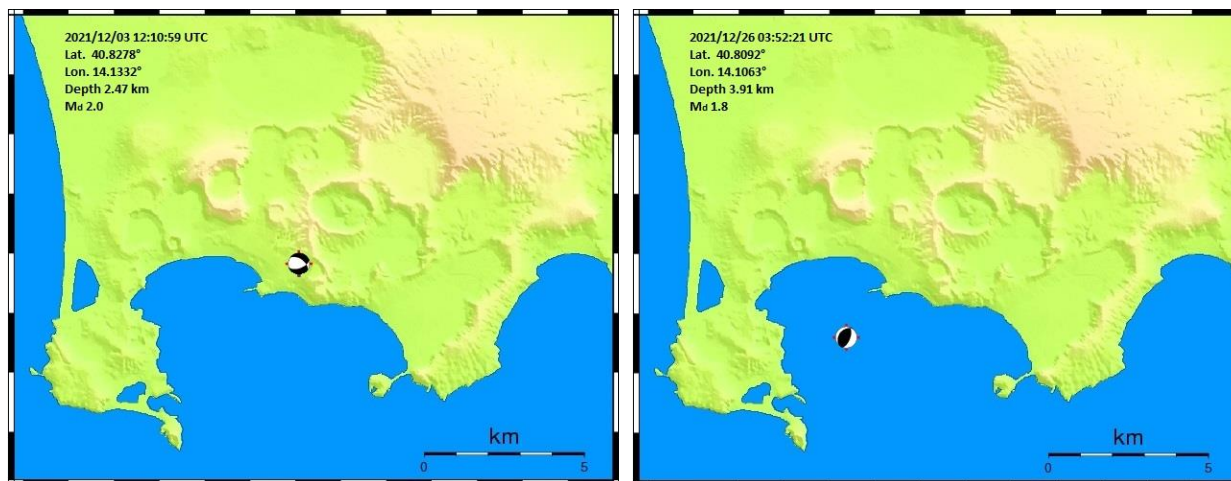


Figura 1.1.8 - Meccanismi focali elaborati per eventi di magnitudo > 1.5 registrati ai Campi Flegrei nel secondo semestre 2021.

Tabella 1.1.3 - Parametri ipocentrali degli eventi con $M_d \geq 1.5$ registrati ai Campi Flegrei nel secondo semestre 2021.

Data UTC	M_d	Lat N	Long E	Prof. (km)
2021/07/02 05:54:23	1.6	40.8287	14.1542	1.75
2021/07/16 14:10:20	1.7	40.8357	14.1222	2.34
2021/08/06 14:51:09	2.2	40.8077	14.1145	3.42
2021/10/21 00:47:38	1.5	40.8203	14.1402	1.90
2021/12/02 06:33:03	1.7	40.8327	14.1368	2.51
2021/12/03 12:10:59	2.0	40.8278	14.1332	2.47
2021/12/25 11:15:31	1.7	40.8277	14.1413	1.17
2021/12/26 03:52:21	1.8	40.8092	14.1063	3.91

La sismicità dei Campi Flegrei è spesso caratterizzata, analogamente ad altri vulcani, da sciami sismici. In Tabella 1.1.4 sono riportati i principali sciami registrati nel corso del secondo semestre 2021.

Tabella 1.1.4 - Principali sciami sismici registrati ai Campi Flegrei nel corso del secondo semestre 2021.

Inizio sciame	Fine sciame	N. eventi	M_{dmax}
2021/10/21 00:46	2021/10/21 06:49	19	1.5 \pm 0.3

In Figura 1.1.9 è rappresentata la frequenza di accadimento dei terremoti registrati ai Campi Flegrei dal 1983 e la relativa energia cumulativa.

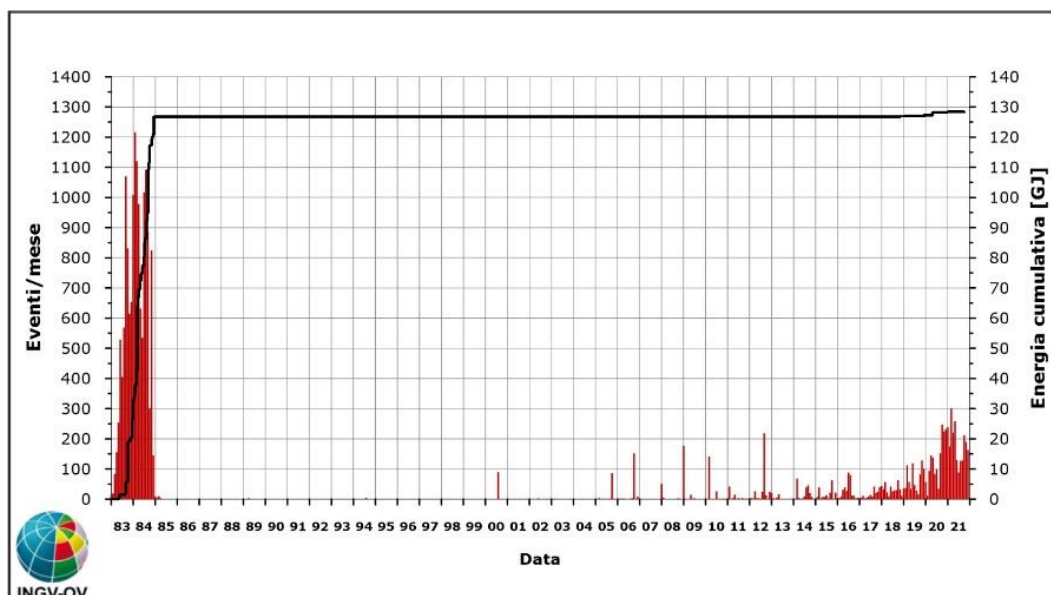


Figura 1.1.9 – Frequenza di accadimento dei terremoti registrati ai Campi Flegrei dal 1983. La linea nera rappresenta l’energia cumulativa.

1.2 Rete Sismica Mobile

Nel secondo semestre 2021 è stata effettuata l’attività di controllo, manutenzione e prelievo dati delle stazioni in acquisizione locale installate ai Campi Flegrei. A novembre 2021 è stato sostituito l’acquisitore Lennartz MarsLite con un digitalizzatore Taurus Nanometrics alla stazione GAE2 e, analogamente, a dicembre 2021, per la stazione ACL2, è stata sostituita una stazione Lennartz MarsLite con una stazione sismica Taurus Nanometrics. A tutto dicembre 2021 nell’area dei Campi Flegrei sono operative 15 stazioni sismiche di cui 13 con sensori larga banda e 4 dotate di accelerometro. 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 (card PCMCIA, flash card) ad eccezione della stazione CROS (Campi Flegrei, Complesso La Rosida in via Antiniana) i cui segnali sono trasmessi via UMTS in tempo reale alla Sala di Monitoraggio dell’Osservatorio Vesuviano.

Figura 1.2.1 – Rete Sismica Mobile operativa ai Campi Flegrei. Mappa aggiornata a dicembre 2021. La stazione CROS acquisisce i segnali localmente oltre a trasmettere i segnali in tempo reale verso la Sala di Monitoraggio.

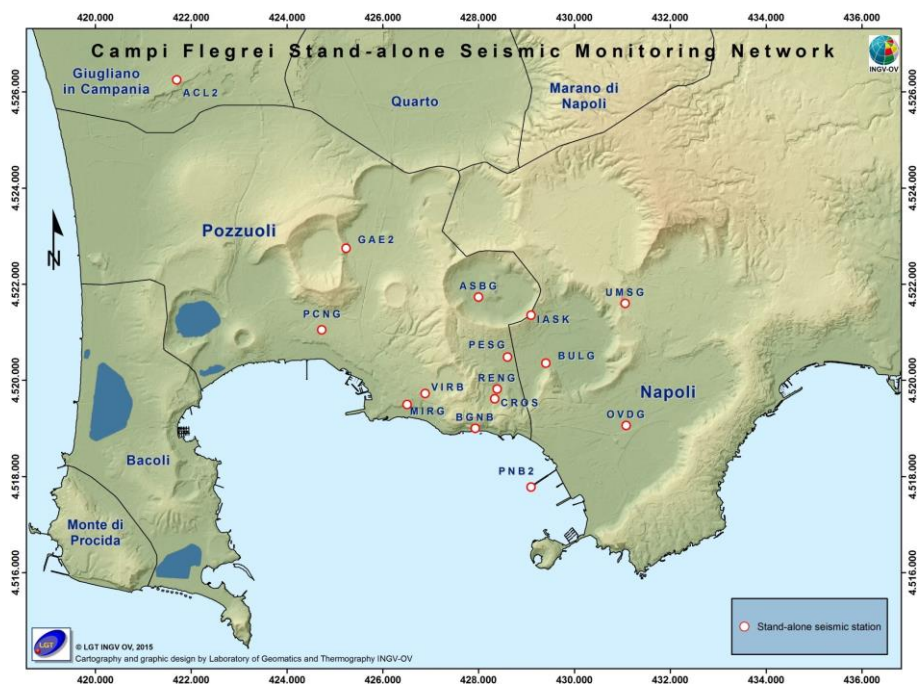


Tabella 1.2.1 – Stato della Rete Sismica Mobile ai Campi Flegrei.

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
ACL2	40.8836N 14.0706E 55 m	Licola	Gennaio 2011	Lennartz LE3D/20s	Nanometrics Taurus	Locale
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
BULG BULK	40.8312N 14.1627E 18 m	Agnano Monte Spina	Febbraio 2010	Guralp CMG-40T Episensor FBA ES-T	Gilda	Locale
CROS	40.8245N 14.1502E 57 m	Agnano	Giugno 2020	Lennartz LE3D1Hz Guralp CMG-40T	Lunitek Atlas	LTE
GAE2	40.8524N 14.1130E 100 m	Gauro	Gennaio 2013	Lennartz LE3D/20s	Lunitek Atlas	Locale
IASK	40.8402N 14.1589E 103 m	Astroni	Gennaio 2020	Episensor FBA ES-T	Lunitek Atlas	Locale

MIRG	40.8232 14.1285 35	Residence Miramare	Luglio 2015	Guralp CMG-40T	Marslite	Locale
OVDG	40.8197N 14.1827E 14 m	Sede di Via Diocleziano	Aprile 2009	Geotech KS2000	Marslite	Locale
PCNG	40.8371N 14.1073E 50 m	Pozzuoli exOlivetti	Marzo 2015	Guralp CMG-40T	Nanometrics Taurus	Locale
PESG	40.8323N 14.1532E 45 m	Agnano Pisciarelli	Febbraio 2011	Guralp CMG-40T	Marslite	Locale
PNB2	40.8080N 14.1593E 10 m	Pontile Bagnoli	Ottobre 2014	Lennartz LE3D/20s	Marslite	Locale
RENG	40.82630N 14.15072E 55 m	Agnano	Gennaio 2011	Guralp CMG-40T	Marslite	Locale
UMSG	40.84256N 14.18222E 120 m	Università M. S. Angelo	Maggio 2013	Geotech KS2000	Reftek 130	Locale
VIRG	40.8253N 14.1329E 65 m	Pozzuoli	Marzo 2015	Guralp CMG-40T	Reftek 130	Locale
VIRK			Ottobre 2015	Episensor FBA ES-T	Reftek 130	

Nel secondo semestre 2021 è stata effettuata l'attività di controllo, manutenzione e prelievo dati delle stazioni in acquisizione locale installate ai Campi Flegrei.

La maggior parte delle stazioni Rete Mobile ha acquisito con discreta continuità per il secondo semestre 2021, con alcune interruzioni nei dati dovute alla mancanza di energia elettrica o guasti agli acquisitori sismici.

Il *data set* del secondo semestre 2021 è costituito da rumore sismico, terremoti locali, regionali e telesismi.

E' stato effettuato il calcolo dell'RMS (*Root Mean Square*) sulle tre componenti del moto per i segnali in continuo registrati dalla stazione ASBG. Il valore dell'RMS è stato calcolato in quattro bande di frequenza: 0.05-0.5 Hz, 0.5-2.0 Hz, 2.0-4.0 Hz, 4.0-8.0 Hz. I risultati ottenuti sono mostrati in Fig.1.2.2 e sono riferiti al periodo luglio 2021 – dicembre 2021. A parte la periodicità giornaliera ben evidente nelle 4 bande di frequenza considerate, non si notano variazioni significative nell'arco del periodo analizzato.

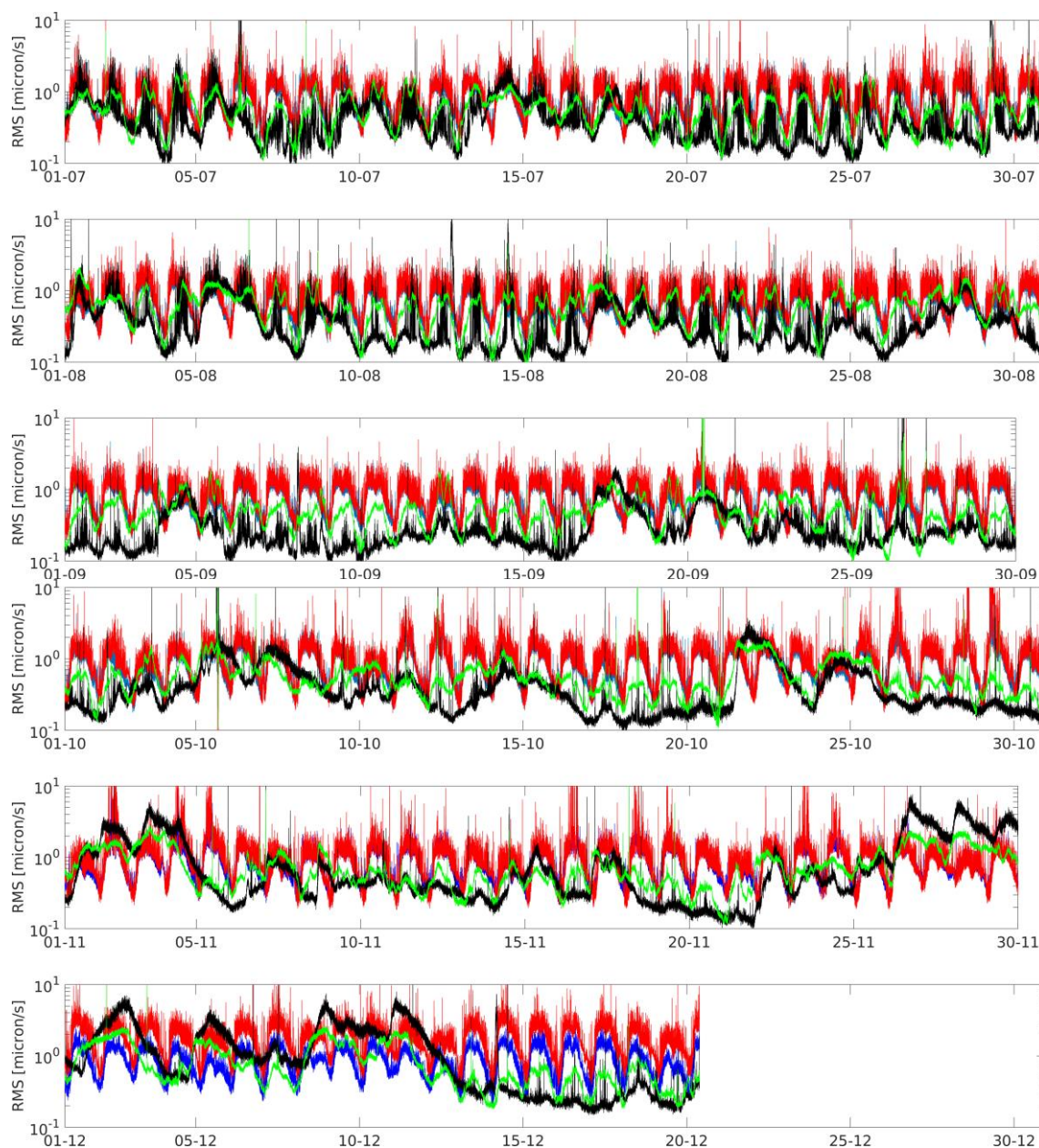


Figura 1.2.2 - RMS calcolato per i segnali della stazione sismica ASBG nel secondo semestre del 2021 in quattro bande di frequenza: 0.05-0.5 Hz (nero), 0.5-2 Hz (verde), 2-4 Hz (rosso), 4-8 Hz (blu).

In Figura 1.2.3 vengono mostrati i sismogrammi non filtrati delle quattro stazioni accelerometriche funzionanti nell'area dei Campi Flegrei (BGNK, VIRK, BULK e IASK) per il terremoto di magnitudo $M_d=2.2$ del 6 agosto 2021 (ore 14:51 UTC).

Per tale terremoto sono stati osservati i seguenti valori di PGA: 3.57 cm/s^2 per BULK (componente N-S), 1.73 cm/s^2 per BGNK (componente N-S), 1.19 cm/s^2 (componente Z, stazione VIRK) e 0.74 cm/s^2 (componente N-S, IASK).

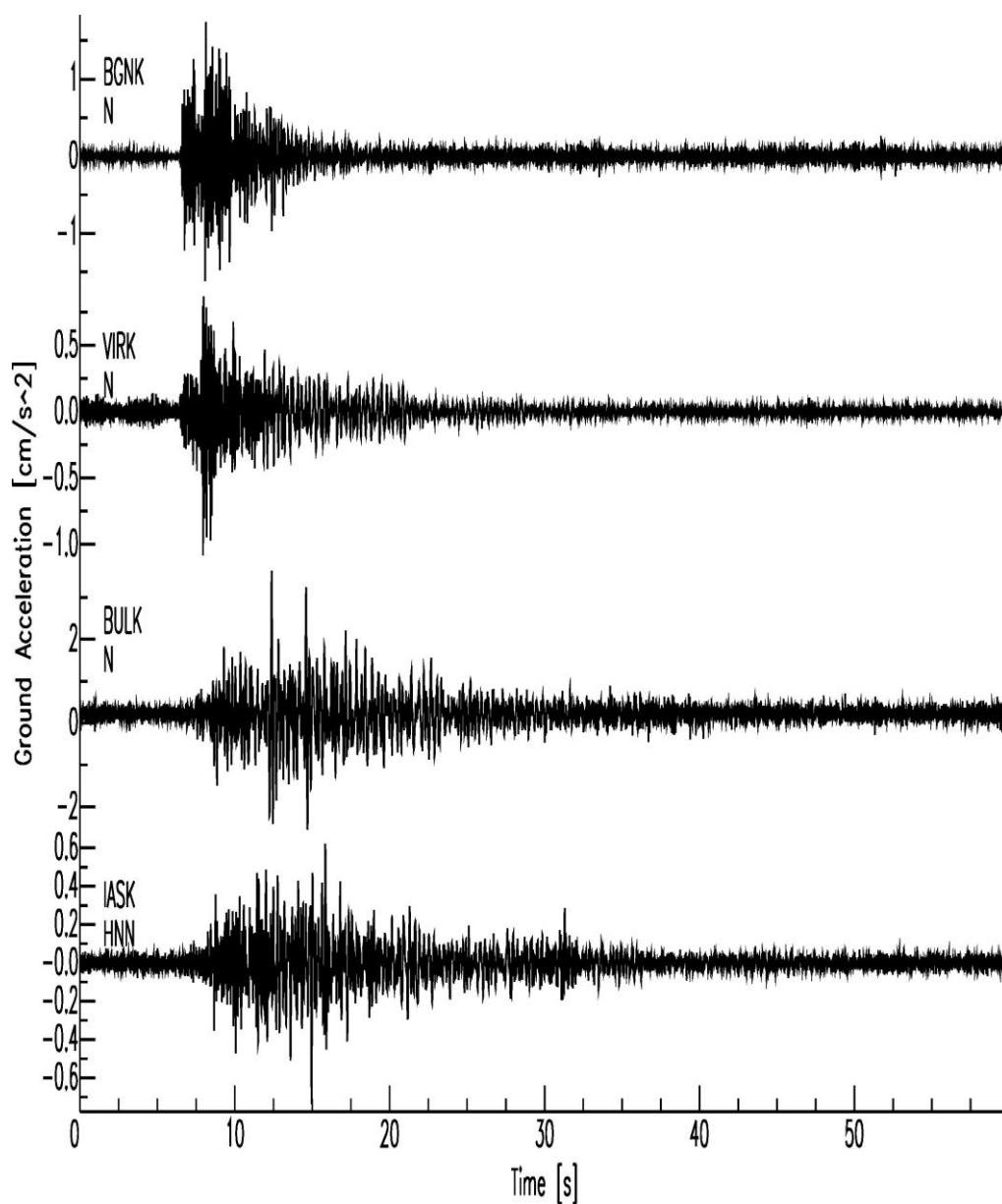


Figura 1.2.3 - Accelerogrammi non filtrati (comp. N-S) delle stazioni BGNK, VIRK, BULK e IASK per il terremoto di Md=2.2 del 08/06/2021 14:51 UTC avvenuto nell'area dei Campi Flegrei.

2 - MONITORAGGIO GEODETICO

Durante il secondo semestre 2021 il monitoraggio geodetico dei Campi Flegrei è stato effettuato attraverso misure continue GPS e tiltmetriche, una campagna di misure gravimetriche e elaborazioni di dati satellitari.

2.1 Rete GPS (GNSS)

P. De Martino¹, S. Guardato¹, G. Scarpato¹, G. Brandi¹, M. Dolce¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

La rete di stazioni permanenti GNSS operanti nell'area Napoli Campi Flegrei è costituita da 25 siti terrestri e marini (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. Nella Tabella 2.1.1 sono riportati i nomi dei siti e le coordinate, inoltre sono riportate le specifiche della strumentazione, con i *rate* di acquisizione ed i sistemi di trasmissione.

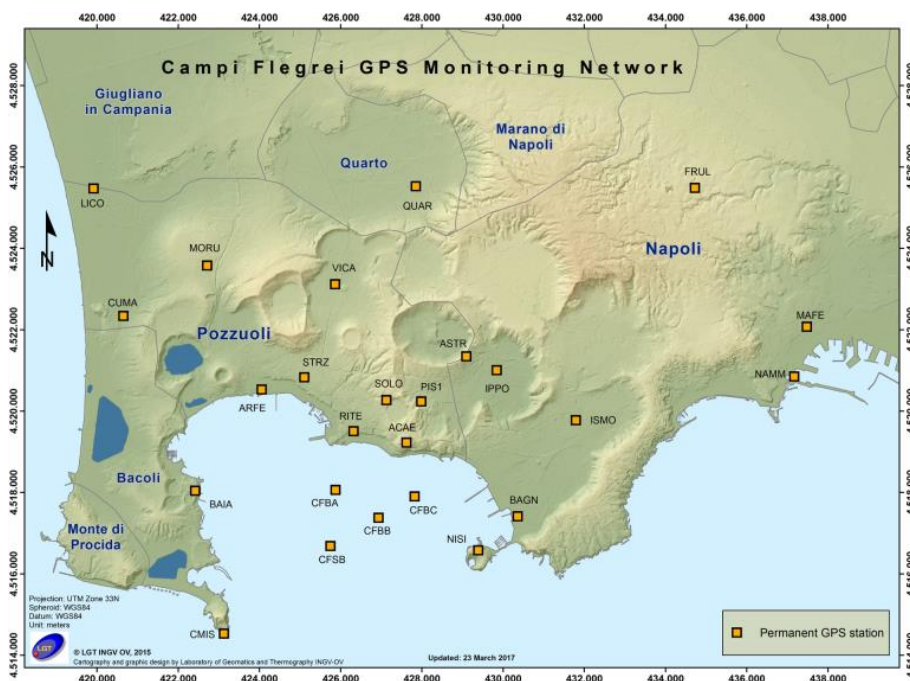


Figura 2.1.1 – Mappa della Rete GNSS dei Campi Flegrei.

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 LEIAT504 NONE	1sec	ADSL
ASTR	40.8401 N 14.1590 E	Astroni	2016	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	LTE/4G
BAGR	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	Wi-Fi
CFBB	40.8035 N 14.1326 E	Meda B (Pozzuoli)	2016	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	Wi-Fi
CFBC	40.8057 N 14.1432 E	Meda C (Pozzuoli)	2016	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	Wi-Fi
CFSB	40.7980 N 14.1198 E	Meda (Pozzuoli)	2016	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	Wi-Fi
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/4G
FRUL	40.8779 N 14.2252 E	Frullone (Napoli)	2003	Leica GR10 LEIAT504 LEIS	1sec	ADSL
IPPO	40.8371 N 14.1679 E	Ippodromo Agnano (Napoli)	1999	Leica GR10 LEIAR25 LEIT	1sec	ADSL
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 GR10 LEIAT504 LEIS	1sec	ADSL
MAFE	40.8474 N 14.2584 E	Università (Napoli)	2009	Leica GRX1200PRO LEIAT504 LEIS	1sec	ADSL
MORU	40.8596 N 14.0830 E	Monteruscello	2000	Leica GRX1200PRO LEIAT504 LEIS	1sec	ADSL
NAMM	40.8363 N 14.2548 E	Porto di Napoli	2015	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	LTE/4G
NISI	40.7972 N 14.1631 E	Nisida (Napoli)	2009	Leica GR10 LEIAT504 LEIS	1sec	LTE/4G
PIS1	40.8300 N 14.1460 E	Pisciarelli (Napoli)	2015	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	1sec	Wi-Fi
QUAR	40.8777 N 14.1437 E	Municipio di Quarto	1999	Leica GRX1200GPRO TRM29659.00 NONE	1sec	ADSL
RITE	40.8233 N 14.1262 E	Rione Terra (Pozzuoli)	2001	Leica GR10 LEIAR25 LEIT	1sec	Wi-Fi
SOLO	40.8303 N 14.1357 E	Solfatara (Pozzuoli)	2006	Leica GR10 LEIAT504 LEIS	1sec	LTE/4G
STRZ	40.8351 N 14.1118 E	La Starza (Pozzuoli)	2006	Leica GR10 LEIAT504 LEIS	1sec	Wi-Fi
VICA	40.8558 N 14.1205 E	Via Campana (Pozzuoli)	2008	Leica GR10 LEIAT504 LEIS	1sec	ADSL

Ventidue stazioni sono attrezzate con ricevitore Leica GR10 e le restanti 3 con ricevitori Leica GRX1200PRO. Undici stazioni trasmettono i dati acquisiti alla sala monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano di via Diocleziano attraverso linee ADSL, 5 utilizzano la connettività LTE/4G, 9 utilizzano la rete Wi-Fi dell'Osservatorio Vesuviano. La maggior parte delle stazioni sono alimentate tramite rete elettrica e dotate di batteria a tampone per estenderne l'operatività in caso di blackout. Cinque stazioni (BAGN, NISI, PIS1, NAMM, RITE) e le quattro ubicate sulle mede nel Golfo di Pozzuoli (CFBA, CFBB, CFBC, CFSB) sono alimentate da un pannello solare di circa 100W.

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 con il software scientifico Bernese e alla restituzione dei risultati (serie temporali delle variazioni lungo le componenti Nord, Est e Quota, campi di velocità e/o spostamento

planimetrici e verticali). Durante il 2021 è stato realizzato e sperimentato anche un nuovo sistema di processamento e visualizzazione in tempo reale dei dati ad alta frequenza (1 Hz) delle stazioni GNSS dell'area flegrea (Convenzione DPC-INGV, Allegato B2, WP2-Task2). Tale sistema sarà operativo in Sala di Monitoraggio dal 2022.

Il valore medio della velocità di sollevamento nell'area di massima deformazione dalla metà di luglio 2021 è di circa 10 ± 2 mm/mese, in diminuzione rispetto al valore di circa 13 ± 2 mm/mese registrato precedentemente a partire da settembre 2020.

Il sollevamento totale registrato alla stazione GNSS di RITE (area di massima deformazione) è di circa 89 cm da novembre 2005, inizio dell'attuale fase di unrest (Figura 2.1.2). Da gennaio 2016 si è registrato un sollevamento massimo di circa 55 cm (Figura 2.1.3), di cui circa 13 cm nel corso nel 2021. La Figura 2.1.3 riporta le serie temporali delle variazioni in quota di alcune stazioni GNSS ubicate nella zona di massima deformazione dei Campi Flegrei.

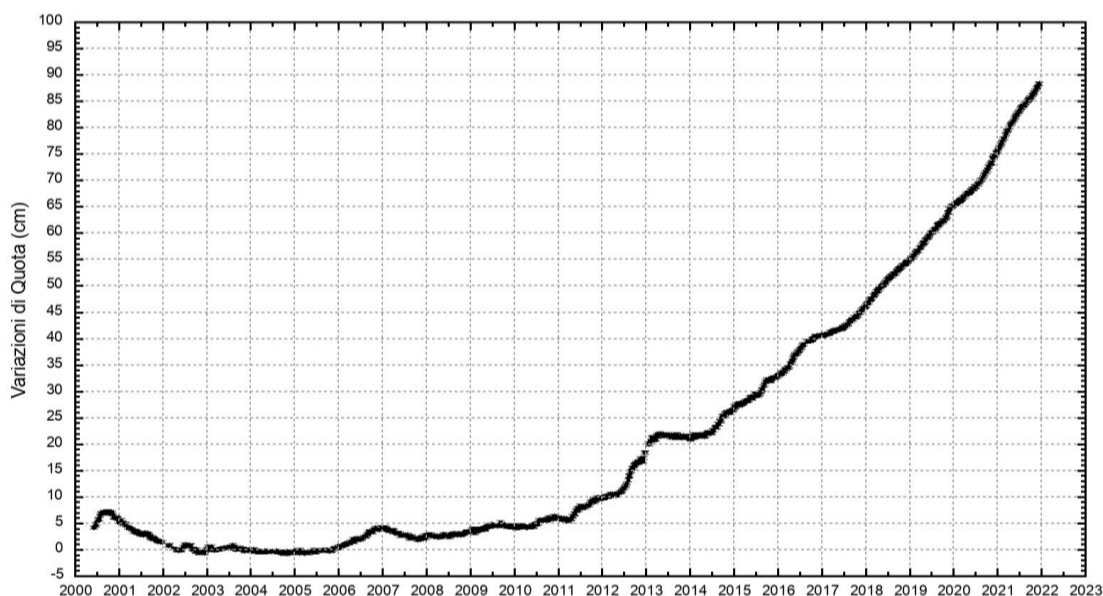


Figura 2.1.2 – Serie temporale delle variazioni in quota settimanali della stazione di RITE (Pozzuoli) dal 2000 a dicembre 2021.

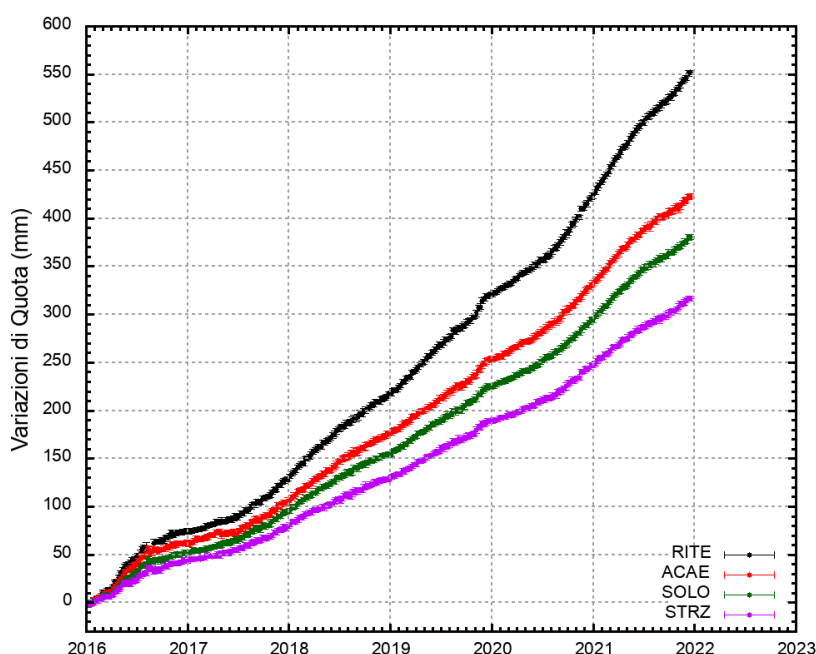


Figura 2.1.3 - Serie temporali delle variazioni in quota delle stazioni di RITE (Pozzuoli – Rione Terra), ACAE (Accademia Aeronautica), SOLO (Solfatara) e STRZ (Pozzuoli - Cimitero) da gennaio 2016 a dicembre 2021.

In Figura 2.1.4 è riportata la mappa dei vettori degli spostamenti orizzontali (a) e verticali (b) registrati alle stazioni GNSS ai Campi Flegrei dal 2016.

La forma con geometria radiale del campo di deformazione è costante nel tempo e suggerisce una stabilità della posizione della sorgente di deformazione (De Martino et al., 2021), localizzata nel Golfo di Pozzuoli a qualche centinaio di metri a sud della stazione di RITE.

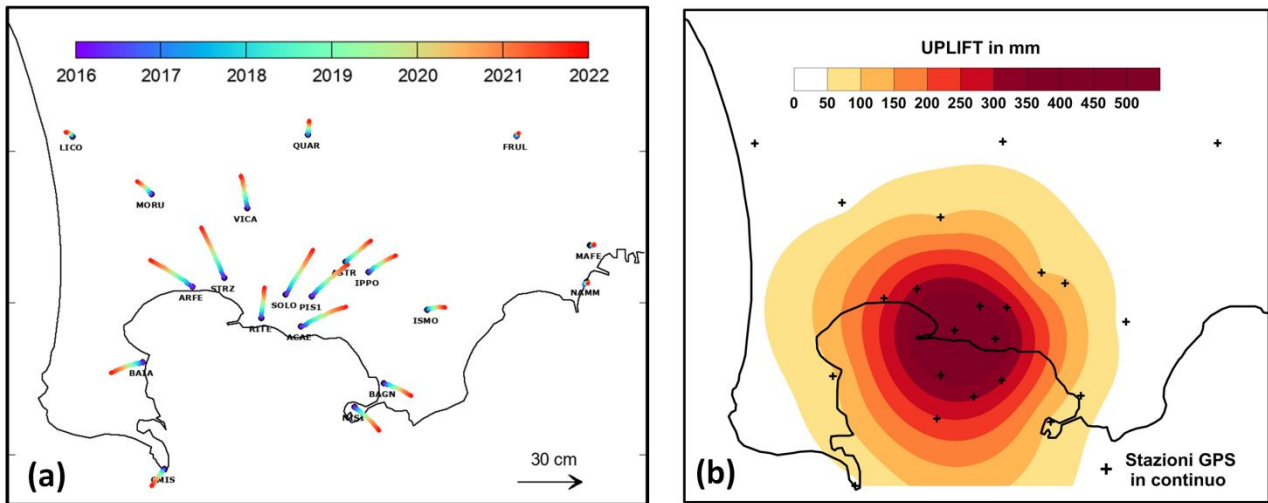


Figura 2.1.4 - Mappa degli spostamenti GNSS orizzontali (a) e verticali (b) registrati nell'area flegrea da gennaio 2016 a dicembre 2021.

Le deformazioni verticali del fondale marino della caldera flegrea registrate dal sistema MEDUSA (De Martino et al., 2020) da aprile 2016 a dicembre 2021 sono riportate in Figura 2.1.5. Alla stazione CFBA il sollevamento totale è di circa 39 cm.

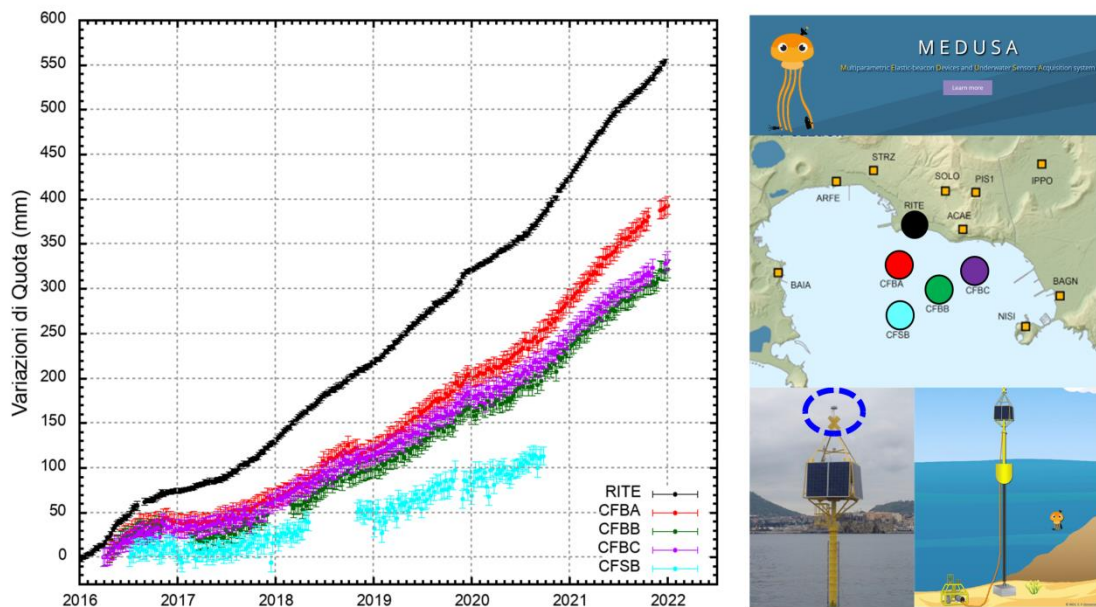


Figura 2.1.5 - Serie temporali delle variazioni in quota delle stazioni GNSS del sistema MEDUSA nell'intervallo aprile 2016 – dicembre 2021.

2.2 Rete Tiltmetrica

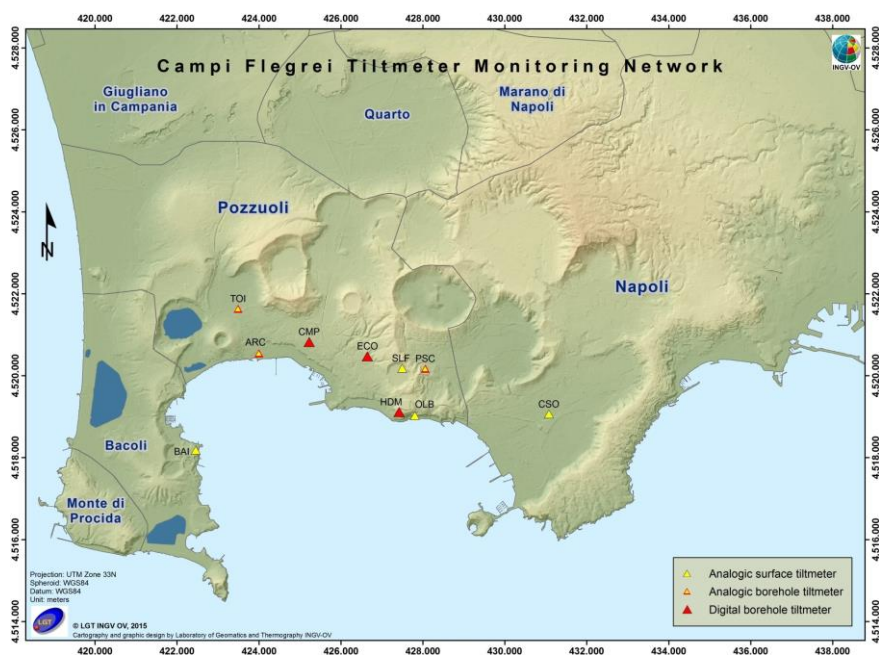
C. Ricco¹, I. Aquino¹, V. Augusti¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

La Rete Tiltmetrica dei Campi Flegrei (Figura 2.2.1) consiste in 10 stazioni (le cui specifiche sono riportate in Tabella 2.2.1), di cui 4 attrezzate con sensori analogici di superficie, mod. 702 (Applied Geomechanics Instruments), 3 attrezzate con sensori analogici da pozzo, mod. 722 (Applied Geomechanics Instruments) e 3 attrezzate con sensori digitali da pozzo, mod. Lily (Jewell Instrument).

Tutte le stazioni acquisiscono con passo di campionamento di un minuto e trasmettono quotidianamente alla Sala di Monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano i file dati registrati.

Figura 2.2.1 – Mappa della Rete Tiltmetrica dei Campi Flegrei.



I segnali registrati dalle stazioni tiltmetriche flegree vengono quotidianamente validati ed elaborati. Essi consistono in serie temporali di variazioni di inclinazione del suolo lungo due piani ortogonali (NS ed EW), di temperatura e di pressione atmosferica per i sensori analogici e bussola magnetica per i sensori digitali. Le sequenze tiltmetriche considerate per il calcolo del campo di inclinazione del suolo derivano dai segnali originali registrati sottoposti ad un trattamento statistico di decorrelazione dagli effetti termici. Tali segnali vengono singolarmente analizzati durante il corso dell'anno con delle routine di calcolo appositamente realizzate, in quanto mostrano caratteristiche specifiche dovute all'insolazione primariamente ed inoltre a effetti di sito di vario tipo.

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	Bacoli Castello di Baia	22/05/1992	Applied Geomechanics mod. 702	Piano campagna	1'	Wi-Fi
SLF	40.8293N 14.1399E 104 m	Pozzuoli Solfatara	21/11/2011	Applied Geomechanics mod. 702	Piano campagna	1'	Wi-Fi
OLB	40.8188N 14.1435E 30 m	Pozzuoli Galleria di Monte Olibano	26/02/2006	Applied Geomechanics mod. 702	Piano campagna	1'	Wi-Fi

CSO	40.8197N 14.1826E 19 m	Napoli Sede OV	26/02/2006	Applied Geomechanics mod. 702	-5 metri	1'	Linea telefonica
TOI	40.8422N 14.0924E 25 m	Pozzuoli Rione Toiano	16/04/2002	Applied Geomechanics mod. 722	-8 metri	1'	GSM
ARC	40.8324N 14.0985E 3 m	Arco Felice	14/12/2003	Applied Geomechanics mod. 722	-6 metri	1'	GSM
PSC	40.8300N 14.1457E 79 m	Pozzuoli Pisciarelli	21/11/2013	Applied Geomechanics mod. 722	-1 metro	1'	GSM
CMP	40.8351N 14.1131E 61 m	Pozzuoli Cimitero Comunale	20/03/2015	Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri	1'	Wi-Fi
ECO	40.8320N 14.1300E 112 m	Pozzuoli	27/03/2015	Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri	1'	Router LTE
HDM	40.8199N 14.1394E 115 m	Pozzuoli Accademia Aeronautica	12/02/2015	Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri	1'	Router LTE

La variazione tiltmetrica osservata ai Campi Flegrei nel secondo semestre 2021 segue una simmetria quasi radiale ed è caratterizzata da un pattern polarizzato lungo 2 direzioni ortogonali, NNW e NE, generato dal campo di deformazione che interessa l'area. La deformazione del suolo relativa ai tiltmetri è visibile nell'odografo di Figura 2.2.2 che riassume il pattern registrato dalle 3 stazioni *borehole* digitali funzionanti in area flegrea, i cui segnali sono filtrati delle periodicità inferiori a 1 giorno.

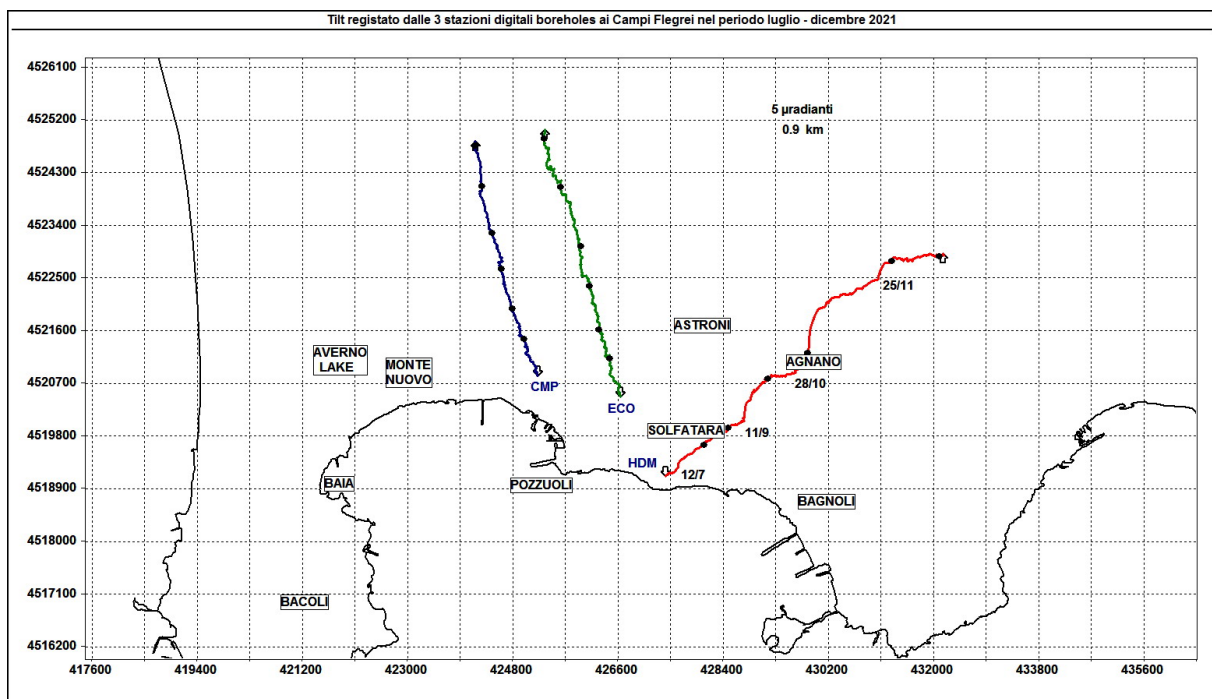


Figura 2.2.2 – Pattern tiltmetrico osservato ai Campi Flegrei nel secondo semestre 2021. Per comodità di rappresentazione grafica e per una interpretazione più agevole, sono riportate solo le 3 stazioni “borehole” con sensori ubicati a 25 m di profondità. Il lato di ogni maglia del reticolo equivale a 5 μ radianti o 0.9 km ed i pallini in nero sovrapposti sui vettori tilt indicano intervalli di un mese. Le date riportate in nero sull’odografo di HDM evidenziano l’inizio dei 4 incrementi tiltmetrici registrati dal mese di luglio.

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

In Figura 2.2.3 sono riportati i segnali originali registrati da 9 delle 10 stazioni flegree (tra analogiche e digitali) non corretti del contributo delle stagionalità (essenzialmente di tipo termico).

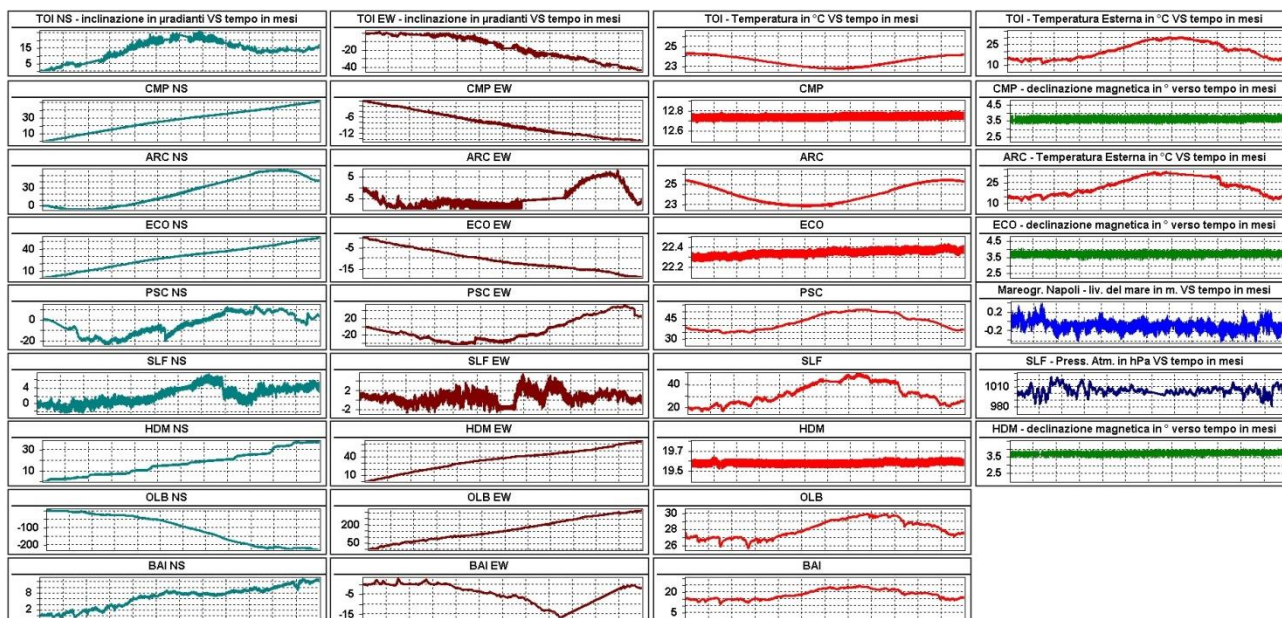


Figura 2.2.3 - Segnali registrati nel 2021 da 9 dei 10 sensori della rete flegrea; le stazioni tiltmetriche sono ordinate dal basso verso l'alto secondo la latitudine. Le prime 2 colonne riportano le componenti NS (ciano) ed EW (rosso scuro) in μ radianti i cui valori di tilt crescenti nel tempo indicano rispettivamente la variazione di inclinazione del suolo a N ed a E. La terza colonna riporta le temperature (rosso) in $^{\circ}$ C registrate da ogni sensore ed infine l'ultima colonna è riservata ai segnali non rilevati da tutte le stazioni, come la temperatura misurata a bocca pozzo ad ARC e TOI (rosso), la pressione atmosferica in hPa acquisita a SLF (blu scuro), il livello del mare in m a Napoli (blu) e la variazione di declinazione magnetica in gradi registrata dai sensori Lily (verde).

In Tabella 2.2.2 sono riportate, per le sole stazioni digitali, la variazione di inclinazione del suolo, la direzione di tilting e la variazione di temperatura registrata a fondo pozzo (\approx -25 m dal p.c.) nel corso del 2021.

Tabella 2.2.2 - Tilt registrato e variazione termica associata relativi alle stazioni digitali nel corso del primo semestre 2021.

Stazione	Inclinazione	Temperatura
Stazione ECO (89 m s.l.m.)	58.5 μ radianti a NNW	0.07 $^{\circ}$ C
Stazione CMP (62 m s.l.m.)	53.0 μ radianti a NNW	0.02 $^{\circ}$ C
Stazione HDM(112 m s.l.m.)	74.1 μ radianti a ENE-NE	0.02 $^{\circ}$ C

In Figura 2.2.4 sono mostrati gli andamenti delle 2 componenti tiltmetriche (filtrate dalle periodicità giornaliere) e termica registrate da ognuna delle 3 stazioni borehole a partire dal 2020.

Tutte le componenti NS mostrano un trend di inclinazione verso N e quindi un sollevamento del suolo a S delle stesse. Dal relativo odografo (Fig. 2.2.2) si evince inoltre:

- la costanza, negli ultimi sei mesi, dell'inclinazione del suolo nelle 2 direzioni predominanti e cioè a NNW (ECO e CMP) e NE (HDM);
- il decremento del tilt fino al mese di ottobre;
- il perdurare del comportamento del sito HDM che, pur inclinandosi ad ENE-NE coerentemente all'uplift, mostra delle periodiche (ogni 30-40 giorni) inclinazioni in direzione N della durata di pochi giorni che generano un pattern tiltmetrico a scalini iniziato nel luglio 2020.

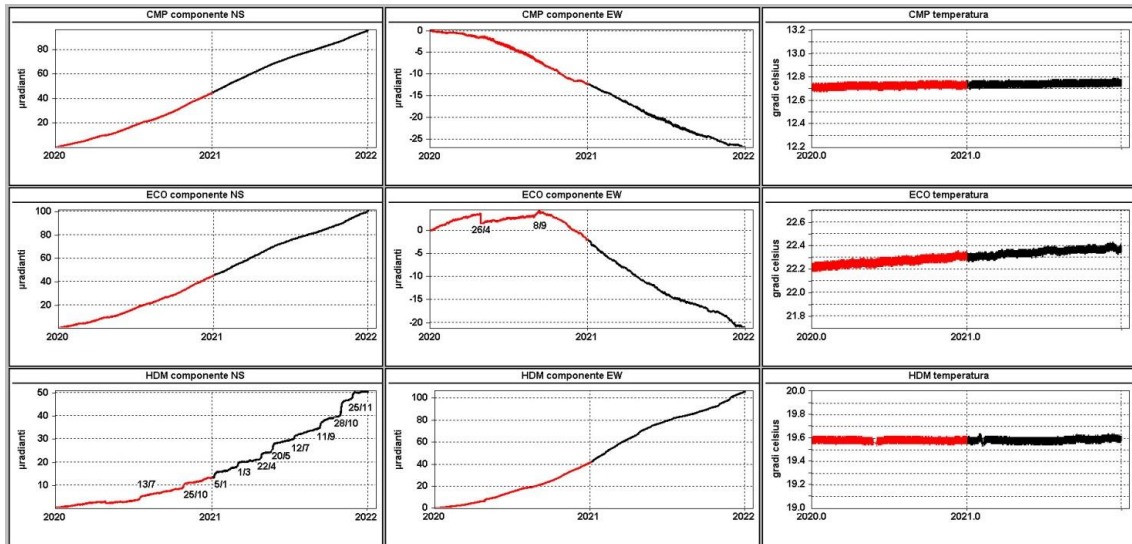


Figura 2.2.4 - Serie temporali dei segnali registrati a partire dal 2020 dalle 3 stazioni “borehole” della rete flegrea ordinate dal basso verso l’alto secondo la latitudine. Le prime 2 colonne riportano le componenti NS ed EW in μ radianti i cui valori di tilt crescenti nel tempo indicano rispettivamente la variazione di inclinazione del suolo a N e ad E, mentre la terza colonna riporta la temperatura in $^{\circ}$ C registrata da ogni sensore. In rosso sono riportati i segnali relativi al 2020 mentre in nero sono rappresentati quelli registrati nel 2021. Le date riportate sui segnali indicano le variazioni tiltmetriche più significative osservate negli ultimi 2 anni. In particolare, le date indicate sul segnale di HDM NS evidenziano l’inizio dei 10 incrementi tiltmetrici registrati dal mese di luglio del 2020 (2 nel 2020 ed 8 nel 2021).

Confrontando inoltre i pattern tiltmetrici osservati nel primo e nel secondo semestre 2021, si nota la decelerazione del tilt (diminuzione di gradiente) dal mese di giugno fino ad ottobre (Fig. 2.2.5). Le direzioni di tilting di ECO e CMP, infine, risultano nei due semestri quasi parallele, mentre quella di HDM ruota nell’ultimo semestre in senso antiorario.

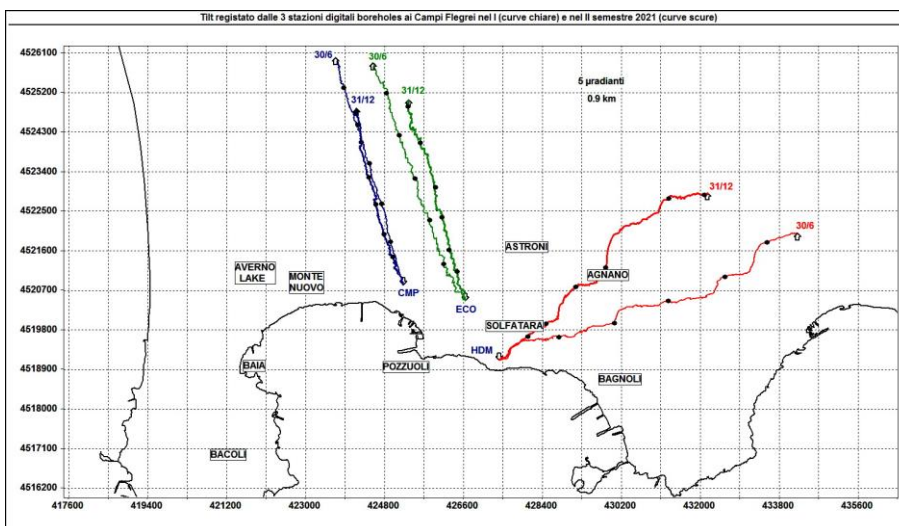


Figura 2.2.5 - Confronto tra i pattern tiltmetrici osservati nel primo e nel secondo semestre 2021. Il lato di ogni maglia del reticolo equivale a 5 μ radianti o 0.9 km ed i pallini in nero sovrapposti sui vettori tilt indicano intervalli di un mese. Le curve in colore più chiaro si riferiscono agli odografi relativi al primo semestre.

2.3 Rete Gravimetrica

S. Carlino¹, G. Ricciardi¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

La Rete Gravimetrica dei Campi Flegrei è composta da 38 stazioni di misura relativa e di 24 di misura assoluta (Figura 2.3.1).

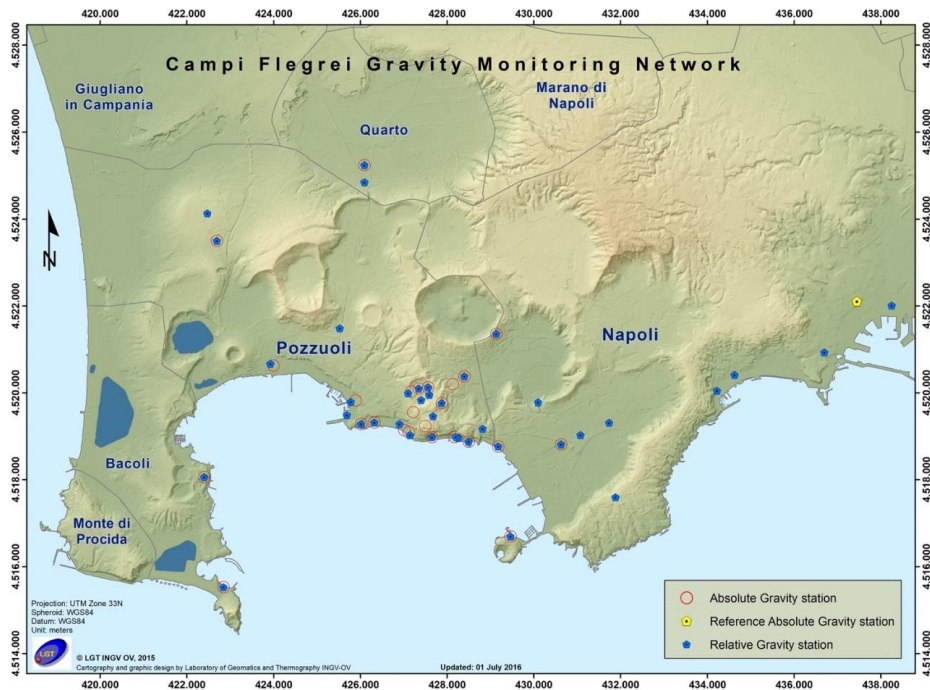


Figura 2.3.1 - Vertici della rete gravimetrica dell'OV-INGV (www.ov.ingv.it). Il punto giallo, che rappresenta il caposaldo assoluto di riferimento, è localizzato presso il complesso monumentale di Largo San Marcellino (Napoli).

Si riportano di seguito ulteriori elaborazioni dei dati gravimetrici, ottenuti dalla campagna svolta tra la fine di settembre e la prima metà di ottobre del 2021 nell'area dei Campi Flegrei, la cui interpretazione preliminare è stata già pubblicata nel Bollettino di Sorveglianza relativo al mese di ottobre. Le misure sono state eseguite su 37 vertici dell'intera rete (Fig. 2.3.1), collegati alla stazione assoluta di Napoli, assunta come riferimento. Le misure gravimetriche relative sono state eseguite con il gravimetro LaCoste & Romberg modello D numero 85 (LCR-D85). Le variazioni relative di g sono riferite al caposaldo assoluto di Largo San Marcellino (Napoli) (Fig. 2.3.2) e sono state corrette per gli effetti di variazione della marea, della pressione atmosferica e per la deriva strumentale. I valori sono stati confrontati con quelli ottenuti (con le medesime procedure di calcolo) nella precedente campagna del febbraio 2019, valutando quindi le differenze dei valori di g (Δg) tra i diversi vertici gravimetrici tra la campagna del 2021 e la precedente del 2019. Dall'interpolazione dei valori ottenuti si ricava il campo delle variazioni gravimetriche Δg riportato in Figura 2.3.2.

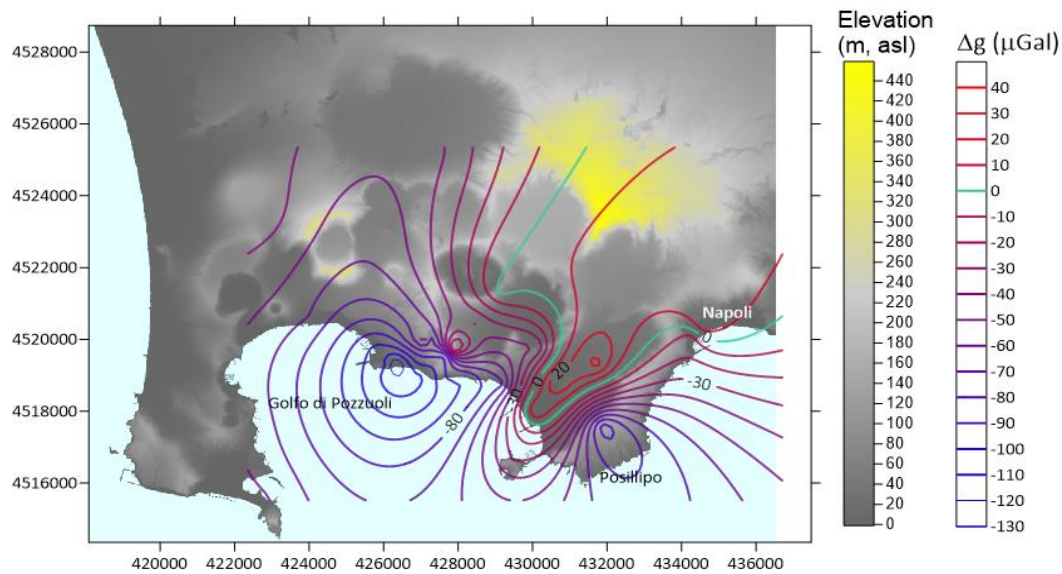


Figura 2.3.2 Mappa del campo delle variazioni di gravità (Δg) ottenute come differenza tra le campagne gravimetriche del 2021 e del 2019, rispettivamente. Il dato gravimetrico è corretto per il contributo della variazione di marea, della pressione atmosferica e della deriva strumentale. L'intervallo delle isolinee è di 10 μGal .

Tale campo, in particolare nella zona centrale della caldera flegrea, è fortemente correlato alle variazioni di quota dei diversi vertici registrate tra febbraio 2019 e ottobre 2021. Le differenze dei valori di Δg variano da circa -100 μGal (microGal, dove 1 $\mu\text{Gal} = 10^{-8}\text{m/s}^2$, equivalente a 10^{-7}g) e 30 μGal (Figura 2.3.2). I valori negativi si registrano nella zona di maggiore sollevamento della caldera, tra Monte Nuovo, Pozzuoli e Solfatarata, mentre quelli positivi si distribuiscono ai suoi bordi, fatta eccezione per il vertice di Posillipo, dove si registra un valore apparentemente poco coerente con il campo variometrico, probabilmente correlato all'instabilità del sito. La correlazione tra variazioni negative di Δg e sollevamento Δh è ben visibile in Figura 2.3.3.

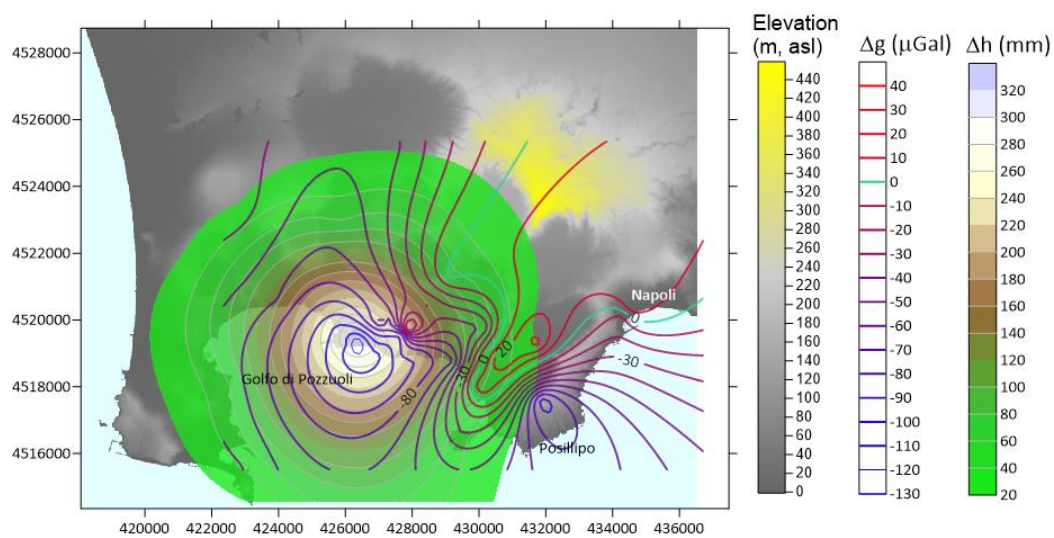


Figura 2.3.3 - Confronto tra variazioni di gravità Δg (2021-2019) e il campo di deformazione (sollevamento verticale Δh tra febbraio 2019 e ottobre 2021) registrato dalla rete NeVoCGPS dell'Osservatorio Vesuviano. Si osserva la correlazione tra la zona di maggiore sollevamento (colorata dal marroncino al celeste) e le variazioni negative di gravità nella zona di Pozzuoli.

In Figura 2.3.4 viene infine rappresentato il campo dei valori residui di gravità ottenuti sottraendo ai Δg osservati ai diversi vertici le rispettive variazioni di gravità dovute al sollevamento del suolo (Free Air Gradient, FAG).

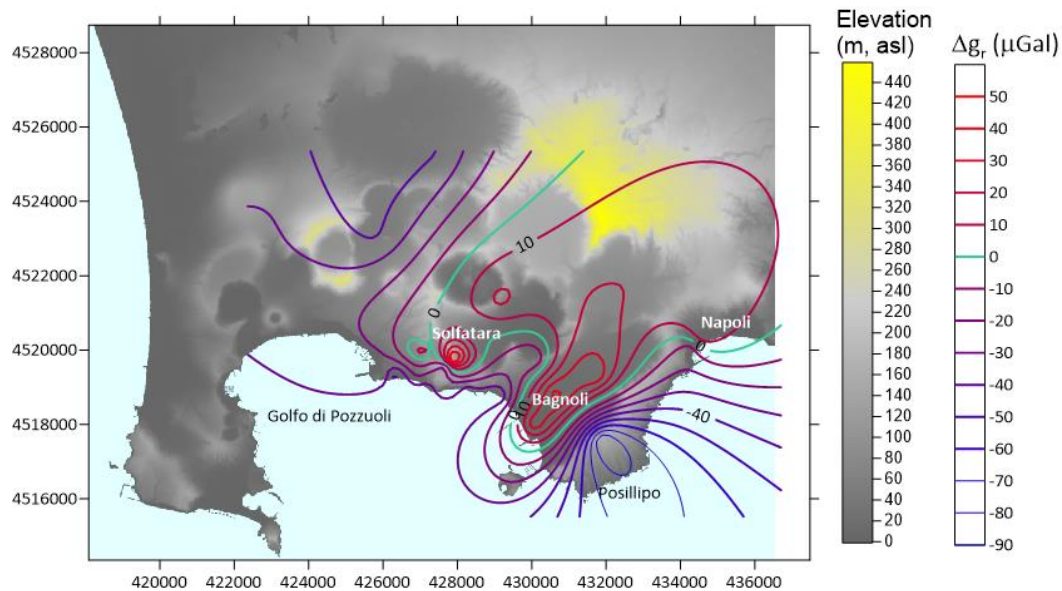


Figura 2.3.4 - Mappa dei residui Δg_r ottenuti dopo aver eliminato l'effetto di variazione di g dovuto al sollevamento della caldera registrato tra febbraio 2019 e ottobre 2021. La correzione FAG utilizzata è di $-289 \mu\text{Gal}/\text{m}$ (Berrino et al., 1992).

Il valore di FAG utilizzato per il calcolo dei residui (Δg_r) è quello ottenuto da Berrino et al., (1992), pari a circa $-289 \mu\text{Gal}/\text{m}$. Per effetto del *noise* di sito e dell'errore di misura, si possono assumere in prima analisi come significative le variazioni superiori a $\pm 15 \mu\text{Gal}$. Fatta eccezione per l'anomalia del sito di Posillipo, molto probabilmente legata all'instabilità del sito di misura, valori residui positivi ($+\Delta g_r$) superiori alla soglia di errore, si osservano nella zona della Solfatara (circa $40 \mu\text{Gal}$). Questa osservazione potrebbe essere correlata alla diffusione e circolazione di fluidi nella parte più superficiale del sistema idrotermale che si caratterizza per l'elevato flusso di CO_2 e per la presenza di miscele di gas e H_2O in pressione a profondità dell'ordine del chilometro (Chiodini et al., 2021). I valori negativi osservati nella piana di Bagnoli sono invece da correlare probabilmente agli effetti stagionali di variazione della falda e non a processi di natura vulcanica.

2.4 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 dalle principali costellazioni satellitari attualmente operative: Sentinel-1A/B (S1) del programma europeo Copernicus, gestito dall’Agenzia Spaziale Europea (ESA) e COSMO-SkyMed (CSK) dell’Agenzia Spaziale Italiana (ASI).

2.4.1 Sentinel-1A/B (S1) - Analisi multi-temporale (anno 2021)

Per tale analisi sono stati utilizzati i dati in banda C dei sensori Sentinel-1A/B dell’Agenzia Spaziale Europea (ESA) disponibili in rete attraverso i canali web della stessa Agenzia. La successiva elaborazione ha consentito di generare mappe della velocità media di deformazione del suolo e serie temporali di deformazione della caldera dei Campi Flegrei sfruttando l’algoritmo d’interferometria differenziale denominato SBAS (Small Baseline Subset).

Il monitoraggio interferometrico in modalità multi-temporale dell’area Flegrea per l’anno 2021 (03.01.2021-29.12.2021), è stato effettuato a partire da un *dataset* composto da 61 immagini dei sensori Sentinel-1A/B dell’ESA, che hanno consentito di generare 177 interferogrammi (3 connessioni/scena).

Il software utilizzato per l’elaborazione dei dati interferometrici è rappresentato da due codici *public domain* reperibili in rete sui siti dei rispettivi sviluppatori e utilizzati su piattaforma Linux/Mac OS X.

In particolare, (i) il codice ISCE (*InSAR Scientific Computing Environment*) per la generazione di *stack* (pile) di interferogrammi ed (ii) MintPy (*Miami INsar Time-series software in Python*) per la generazione delle serie temporali di deformazione.

I due parametri Baseline temporale (Btemp, gg) e perpendicolare (B_⊥, m) sono stati, rispettivamente:

- $6 \leq B_{temp} \leq 18$
- $3 \leq B_{\perp} \leq 210$

Altri parametri d’interesse sono:

- Modalità d’acquisizione: TOPS mode, IWS (*Interferometric Wide Swath*)
- Orbita: Discendente (orbita 22, *swath* 1)
- Angolo di Incidenza (θ): $\sim 39^\circ$
- Fattore di multi-look: 8×2 (*range x azimuth*, dimensione del pixel a terra $\sim 30 \times 30$ m)

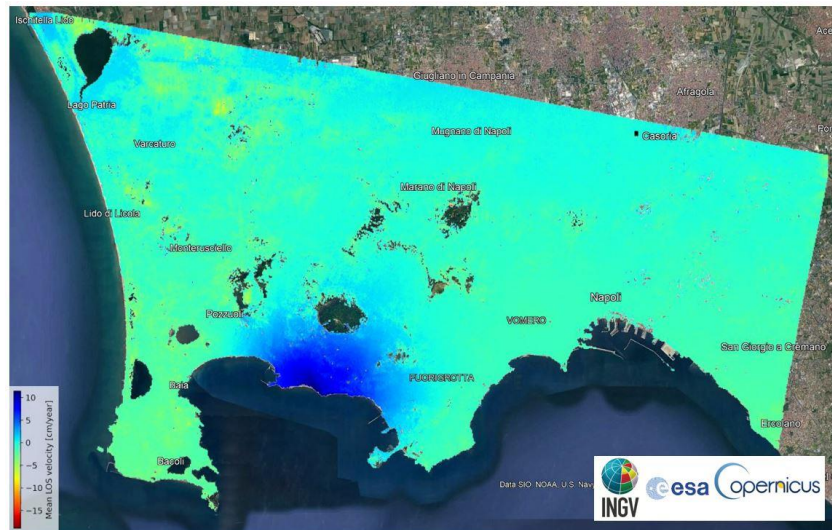
La correzione del ritardo atmosferico è stata effettuata avvalendosi del modello atmosferico globale ERA-5 dello *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*.

Le orbite precise 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.

Il risultato di tale elaborazione ha consentito di generare per l’area Flegrea la mappa della velocità media per il 2021 della deformazione del suolo nella linea di vista del sensore (LoS, *line-of-sight*) di cui alla Figura 2.4.1.1.

Figura 2.4.1.1 - Mappa della velocità media di deformazione nella linea di vista del sensore (Sentinel-1A/B) (03.01.2021-29.12.2021) per l'area Flegrea. Dati IWS - TOPS mode, orbite discendenti (22), swath 1



Come si evince dall'analisi della suddetta figura, l'area Flegrea è stata interessata nel 2021 da un fenomeno di inflazione con un valore massimo della deformazione del suolo di ~10 cm nella linea di vista del sensore (LoS).

Il centro della deformazione risulta spostato in direzione est rispetto a quello reale, a causa dall'effetto combinato del passaggio discendente dell'orbita satellitare e la compresenza di una componente planimetrica del moto del suolo, caratteristica dei Campi Flegrei e ben nota in letteratura (De Martino et al., 2021).

Poiché nell'area di massimo sollevamento, coincidente con il Rione Terra a Pozzuoli, la deformazione del suolo è quasi completamente verticale, è possibile ridurre alla verticale la deformazione in LoS ricavata dall'InSAR, attraverso la relazione:

$$\text{deformazione verticale} \sim \text{deformazione LoS} / \cos \theta$$

con $\theta = 39^\circ$ valore medio dell'angolo di incidenza del sensore.

L'andamento temporale della deformazione verticale InSAR così calcolata è riportato in Figura 2.4.1.2, in ottimo accordo con la deformazione verticale misurata dalla stazione GNSS in continuo di RITE (Rione Terra). In conclusione, il sollevamento totale nell'area di massima deformazione è stato di circa 13 cm nel corso del 2021.

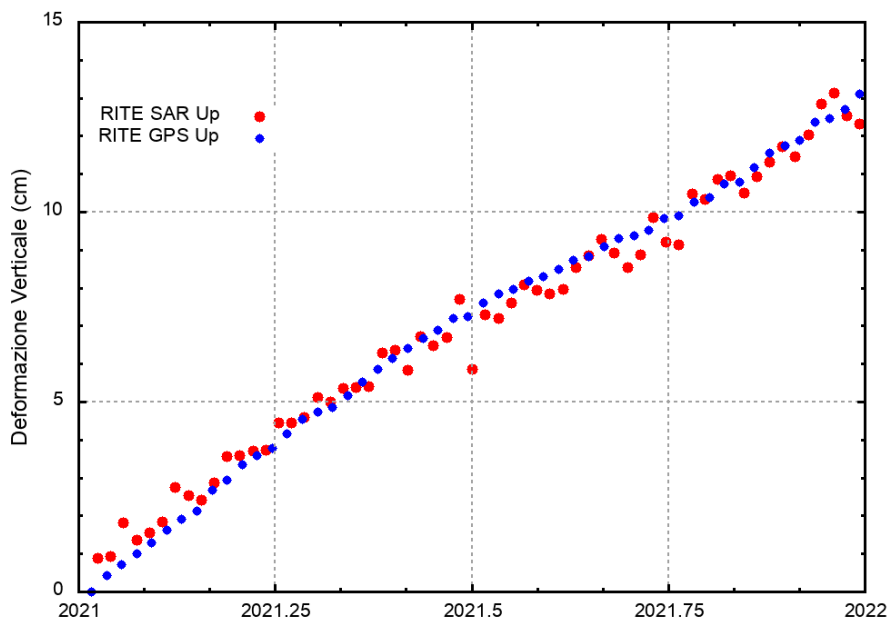


Figura 2.4.1.2 - Serie temporali (03.01.2021-29.12.2021) della deformazione verticale InSAR (pallini rossi) e GNSS (pallini blu) nell'area di massima deformazione al Rione Terra (Pozzuoli).

2.4.2 Cosmo-SkyMed (CSK) - Analisi multi-temporale (2011-2021).

Questa attività è stata effettuata dal Laboratorio GeoSAR dell'INGV ed ha riguardato l'aggiornamento annuale delle serie temporali InSAR-CSK precedentemente stimate fino a dicembre 2020. Sono stati quindi aggiornati i risultati includendo le analisi ottenute con le 58 immagini acquisite nel 2021, a partire dal 10 gennaio fino al 28 dicembre 2021. Il software utilizzato per l'elaborazione dei dati interferometrici è rappresentato dal codice commerciale GAMMA utilizzato su piattaforma Linux.

Qui di seguito si riassumono i parametri inerenti la geometria di acquisizione delle immagini ed i parametri utilizzati nell'elaborazione InSAR:

- Orbita: Ascendente
- Angolo di Incidenza: ~49°
- Angolo di Azimuth: ~13°
- Dimensione Pixel: ~30x30m
- Tecnica di elaborazione: Multi-Temporal IPTA (*Interferometric Point Target Analysis*)
- DEM: 12m TanDEM-X
- Baseline perpendicolare massima: 280m
- Baseline temporale massima: 120 giorni

La mappa della velocità media (2011-2021) di deformazione del suolo nella linea di vista del sensore (LoS) evidenzia il perdurare del fenomeno di inflazione dell'area (Figura 2.4.2.1), con il solito *pattern* deformativo semi-circolare centrato nell'area di Pozzuoli. I valori massimi di deformazione si rilevano nell'area del Rione Terra (Figura 2.4.2.2, A), ed in particolare nelle zone circostanti il Duomo di Pozzuoli (Figura 2.4.2.2, B) dove si osservano, per il periodo 2011-2021, velocità medie in LoS superiori a 5 cm/anno.

Nell'ultimo anno (dicembre 2020-dicembre 2021) si registra nella linea di vista del sensore un valore massimo della deformazione del suolo di ~10 cm. Tenuto conto delle diverse geometrie di acquisizione e proiezioni, tale valore è in ottimo accordo con quello calcolato alle stazioni GNSS e con i risultati dell'analisi InSAR con immagini delle missioni Sentinel-1A/B.

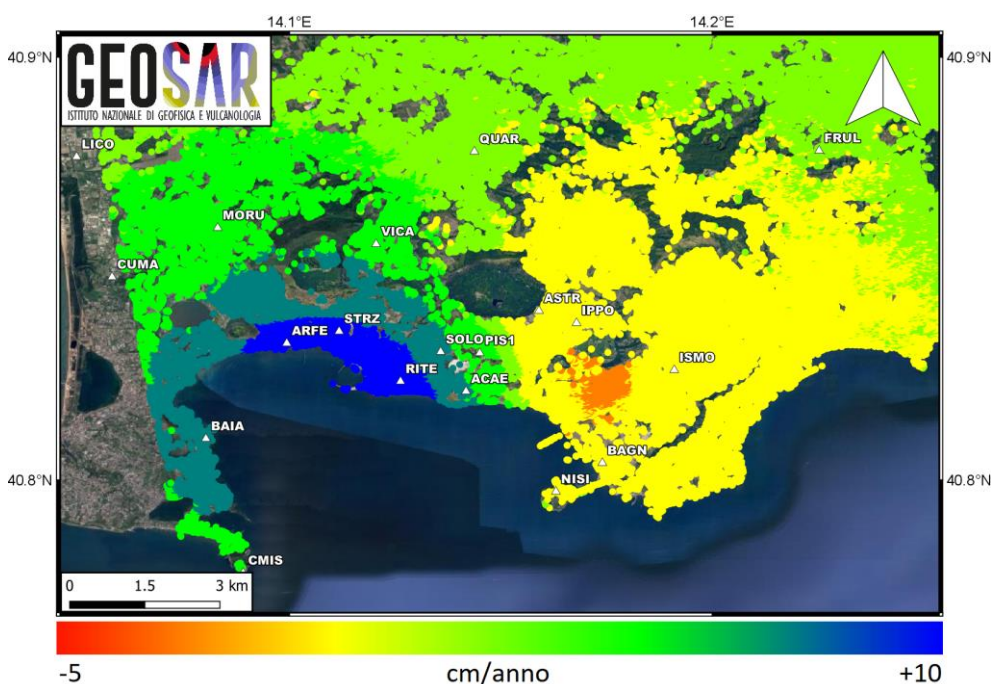


Figura 2.4.2.1 - Mappa della velocità media di deformazione del suolo nella linea di vista del sensore (Cosmo-SkyMed) per l'area flegrea nel periodo dal 2011 al 2021.

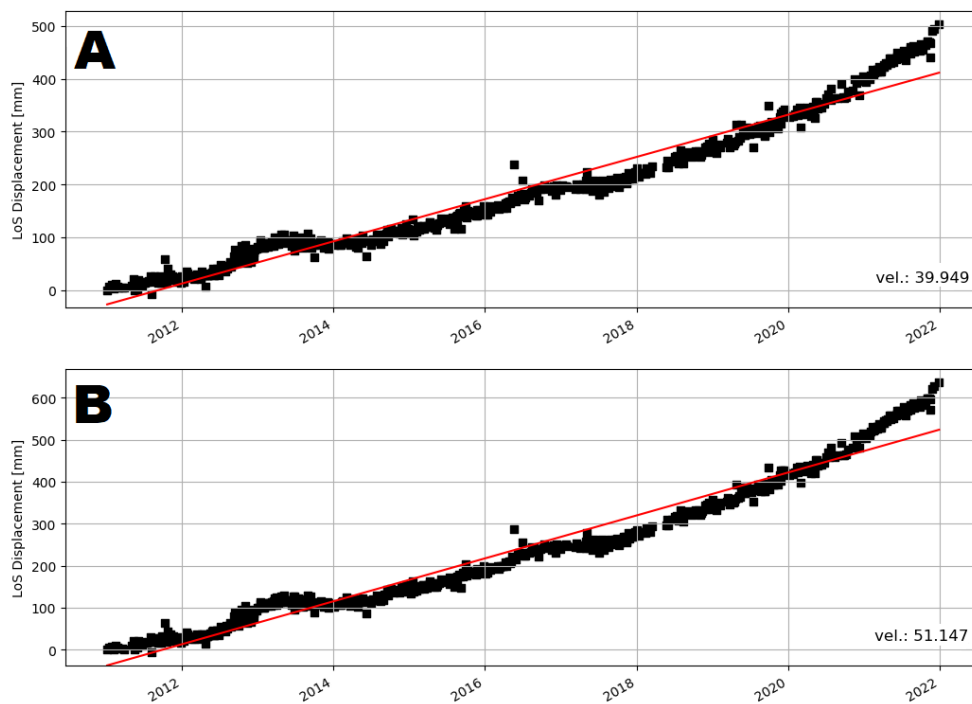


Figura 2.4.2.2 - Serie temporale (2011-2021) della deformazione InSAR nella linea di vista del sensore (Cosmo-SkyMed) di un target in prossimità della stazione GNSS RITE (A) e nei pressi del Duomo di Pozzuoli (B).

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 e Termocoppia, nonché dalla Sezione di Roma “Osservatorio Nazionale Terremoti” in collaborazione con la Sezione di Napoli “Osservatorio Vesuviano” con dati termici satellitari.

3.1 Rete Permanente Monitoraggio Termico ad Immagine

G. Vilardo¹, F. Sansivero¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

La Rete TIRNet (Thermal Infrared Imagery Monitoring Network) 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 in località Pisciarelli (PS1), la quarta (OBN) è posizionata alla base del versante SE del duomo di monte Olibano, la quinta (IR-SOB), è situata sul bordo sud-orientale del cratere della Solfatara e la sesta, (ANTN) di recente installazione, inquadra l’area di Via Antiniana sul versante esterno sud-orientale del cratere della Solfatara (Figura 3.1.1; Tabella 3.1.1).

Nel corso del secondo semestre 2021, ad esclusione di occasionali e temporanei periodi di malfunzionamento, 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 delle stazioni remote.

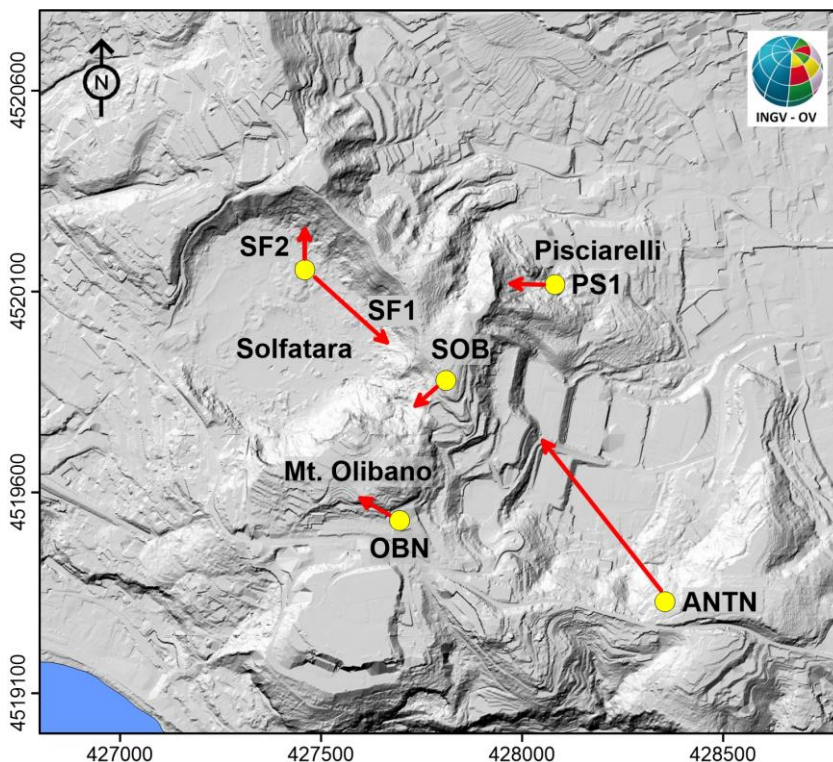


Figura 3.1.1 – Mappa della Rete Permanente di Monitoraggio Termico ad Immagine operante ai Campi Flegrei. Ubicazione stazioni remote (punti gialli), le frecce indicano schematicamente le aree target.

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	Ottobre 2020	Termocamera FLIR A655SC (640 x 480) FoV: 25° x 19°	LTE

Sono riportate nel seguito le elaborazioni delle serie temporali delle temperature al suolo relative alle acquisizioni effettuate dalle diverse stazioni operanti nell'area dei Campi Flegrei aggiornate al 31.12.2021. Il risultato di tali elaborazioni, ad esclusione di quella relativa ai dati acquisiti dalla stazione ANTN, è rappresentato dalle serie temporali dei valori di temperatura massima delle immagini IR ottenute mediante processamento effettuato con l'utilizzo dell'algoritmo di destagionalizzazione analitica STL (Seasonal Trend Decomposition) implementato nel software A.S.I.R.A. Tale procedura, largamente utilizzata nell'elaborazione statistica di serie temporali, ha una elevata affidabilità ed il vantaggio di restituire i trend in termini di valori di temperatura osservati anziché di valori residui.

Per quanto riguarda l'elaborazione dei dati acquisiti dalla stazione ANTN, va considerato che la breve durata del periodo di acquisizione non consente di applicare metodi statistici analitici per la rimozione del trend stagionale. Per tale motivo la rimozione del trend è stata effettuata mediante applicazione dell'algoritmo empirico di destagionalizzazione denominato "BR" (Background Removal: Chiodini et al., 2007; Sansivero et al, 2013; Vilardo et al, 2015). Il risultato ottenuto dall'applicazione della procedura BR è espresso in termini di residui di temperatura (dT°) e non in termini di temperatura assoluta.

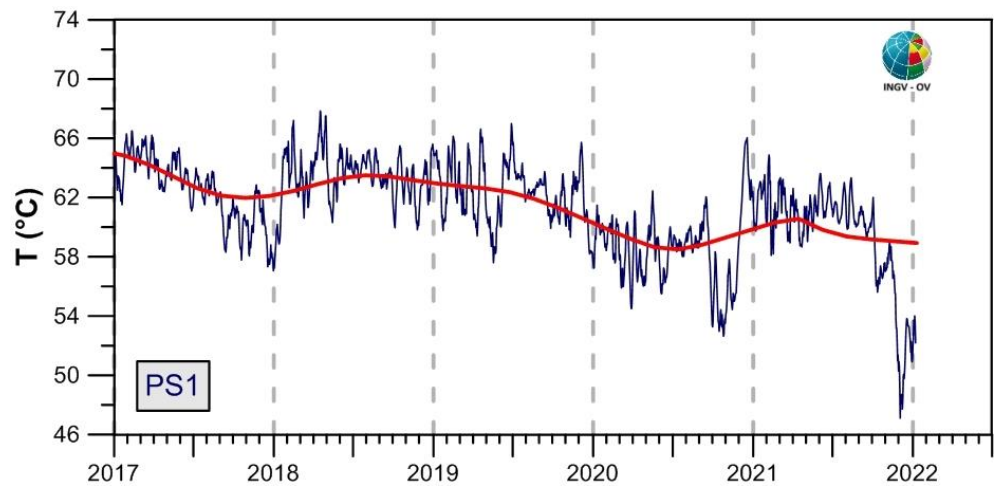
I cronogrammi relativi all'elaborazione delle serie temporali delle temperature massime delle differenti aree target evidenziano nel secondo semestre 2021 una generalizzata diminuzione che interessa in modo particolare le stazioni PS1, OBN e SOB. Si evidenzia che negli ultimi mesi dell'anno le temperature massime rilevate dalle stazioni PS1 e SOB raggiungono i loro valori minimi storici.

PISCIARELLI

La serie temporale dei valori di temperatura massima (Figura 3.1.2) nel secondo semestre 2021 evidenzia un andamento sostanzialmente stazionario a cui però seguono due fasi durante le quali si osserva una repentina e significativa diminuzione delle temperature.

In particolare, il picco negativo registrato agli inizi del mese di dicembre 2021 porta le temperature massime rilevate dalla stazione PS1 a raggiungere i valori minimi dell'intero periodo di osservazione.

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



La serie temporale completa dal 2007 a dicembre 2021 del trend a lungo termine delle temperature massime relative alla stazione PS1 è mostrata in Figura 3.1.3.

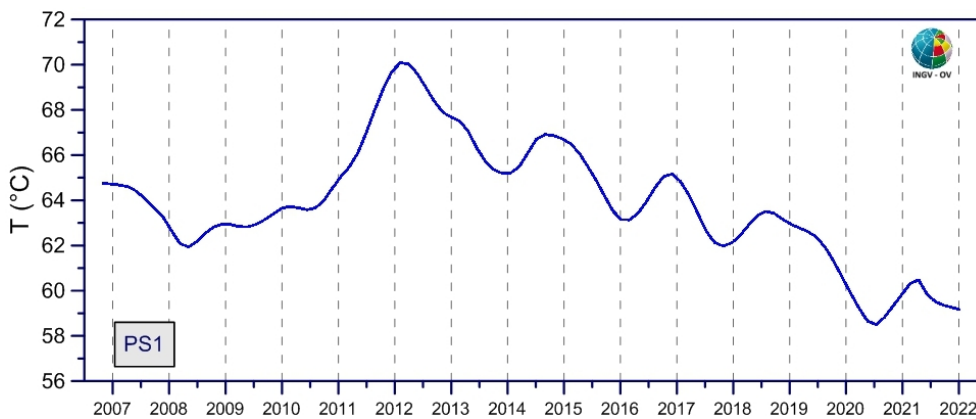


Figura 3.1.3 - Stazione Pisciarelli (PS1). Trend a lungo termine dei valori di temperatura massima rilevati nell'immagine IR ottenuto mediante applicazione dell'algoritmo STL.

Il grafico in Figura 3.1.3, successivamente al picco massimo dei valori di temperatura nella prima metà del 2012, evidenzia un trend in costante diminuzione e caratterizzato da ampie oscillazioni a lungo periodo che raggiunge a metà 2020 i valori minimi rilevati nell'intero periodo di osservazione. Dalla primavera del 2021, e fino a tutto dicembre 2021, il trend delle temperature massime dell'area target mostra un andamento in lieve diminuzione.

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), evidenziano nel secondo semestre 2021 andamenti leggermente differenti. Per quanto riguarda le temperature massime registrate dalla stazione SF1 non si osservano variazioni significative. Diversamente, la stazione SF2 mostra negli ultimi mesi dell'anno un andamento delle temperature massime dell'area target in sensibile diminuzione.

Figura 3.1.4 - Stazione Solfatarata (SF1). Serie temporali dei valori di temperatura massima rilevati nelle immagini IR [media settimanale (blu); trend a lungo termine (rosso)].

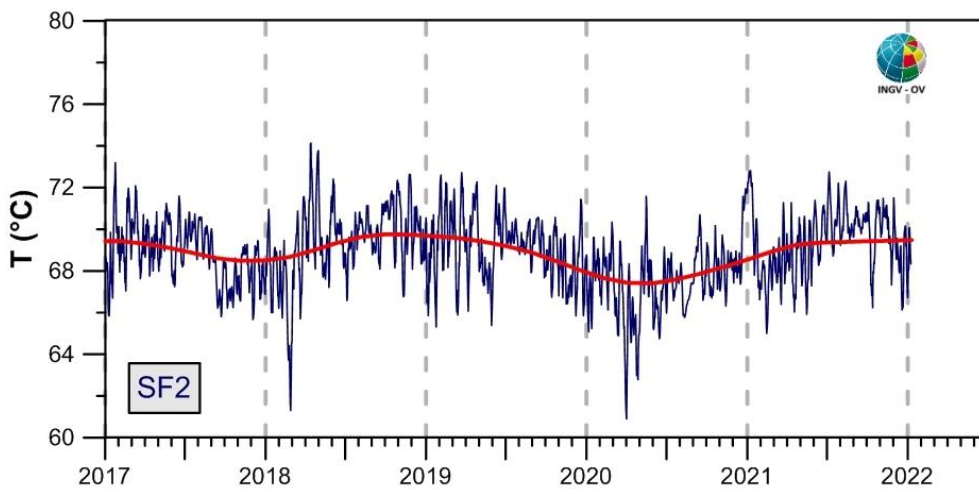
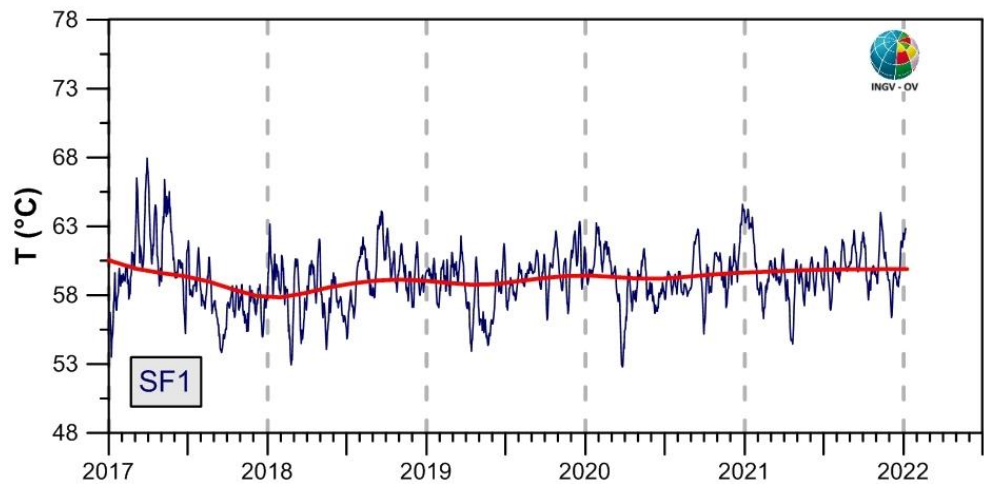
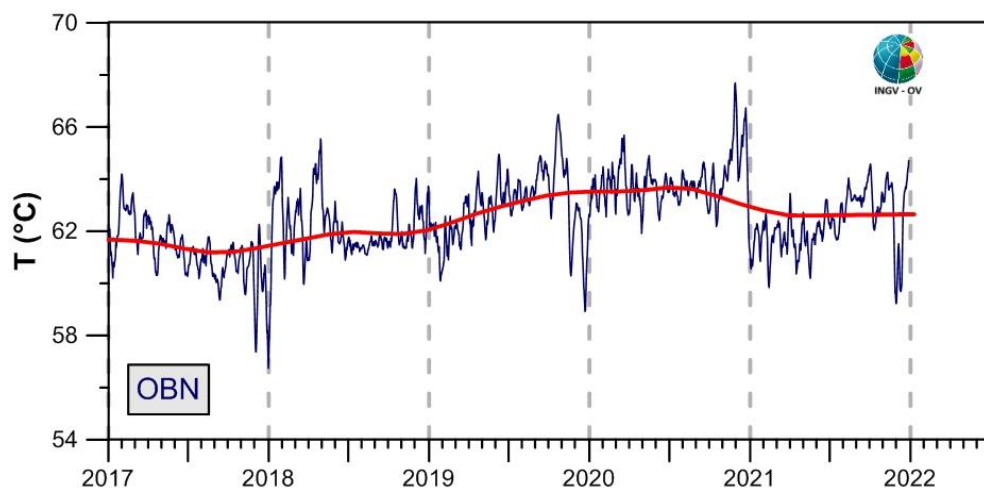


Figura 3.1.5 - Stazione Solfatarata (SF2). Serie temporali dei valori di temperatura massima rilevati nelle immagini IR [media settimanale (blu); trend a lungo termine (rosso)].

OLIBANO

Così come osservato per la stazione SF2 e per la stazione di Pisciarelli (PS1), la serie temporale delle temperature massime rilevate dalla stazione di Monte Olibano (OBN) conferma il trend evolutivo di lieve e costante aumento dei valori iniziato a gennaio 2021. Si evidenzia tuttavia, una rapida e sensibile diminuzione delle temperature registrate nel periodo compreso tra la seconda metà di novembre e la prima metà di dicembre del 2021.

Figura 3.1.6 - Stazione Monte Olibano (OBN). Serie temporali dei valori di temperatura massima rilevati nelle immagini IR [media settimanale (blu); trend a lungo termine (rosso)].



SOB

La serie temporale delle temperature massime rilevate dalla stazione SOB (Fig. 3.1.7) nel secondo semestre 2021 evidenzia un andamento sostanzialmente stabile ad eccezione di una repentina diminuzione dei valori agli inizi del mese di dicembre 2021 con raggiungimento del minimo dell'intero periodo di osservazione. Tale picco è contemporaneo a quelli registrati alle stazioni PS1 e OBN.

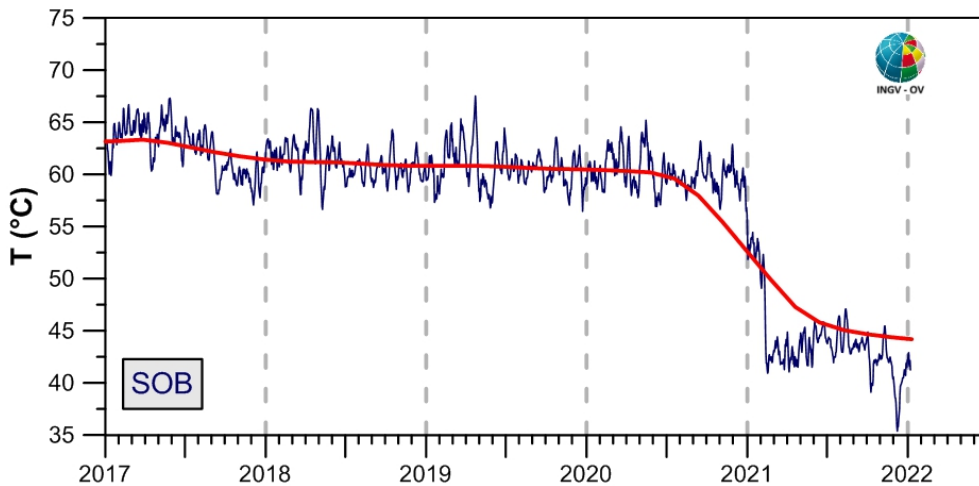
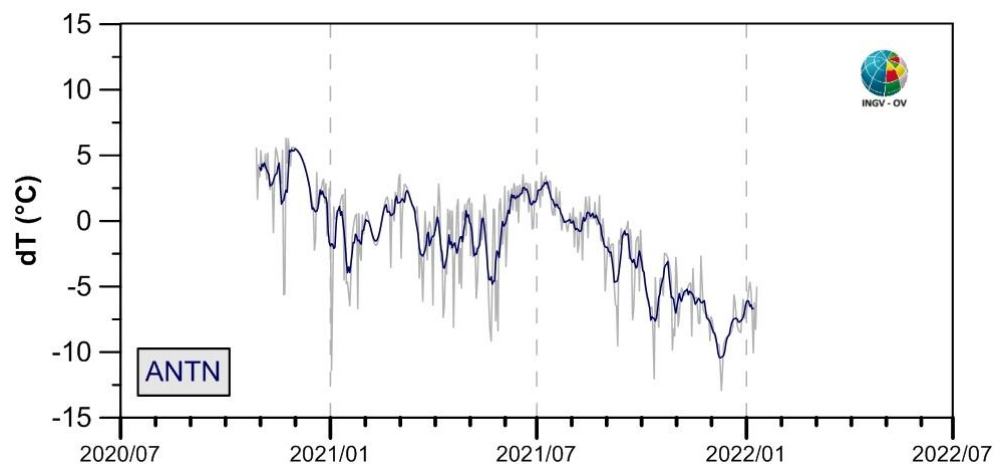


Figura 3.1.7 - Stazione SOB. Serie temporali dei valori di temperatura massima rilevati nelle immagini IR [media settimanale (blu); trend a lungo termine (rosso)].

ANTN

Come già precedentemente specificato, la limitata durata del periodo di acquisizione non consente di applicare metodi statistici analitici per la rimozione del trend stagionale. Per tale motivo la rimozione del trend stagionale è stata effettuata mediante applicazione dell'algoritmo "BR" (Background Removal) ed il risultato ottenuto dall'applicazione di tale procedura è espresso in termini di residui di temperatura (dT°) e non in termini di temperatura assoluta.

Figura 3.1.8 - Stazione ANTN. Serie temporale dei valori di temperatura massima giornaliera rilevata nelle immagini IR destagionalizzate mediante applicazione dell'algoritmo BR [serie destagionalizzata (grigio); media settimanale (blu)].



La serie temporale dei residui di temperatura dT° rilevati nel secondo semestre 2021 dalla stazione ANTN (Fig. 3.1.8) è caratterizzata dalla presenza di ridotte oscillazioni a vario periodo ed evidenzia un andamento con leggera e costante tendenza alla diminuzione.

3.2 Monitoraggio Termico con Termocamera Mobile e Termocoppia

E. Marotta¹, R. Avino¹, P. Belviso¹, A. Carandente¹, R. Nave¹, R. Peluso¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano

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 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°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.

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.

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

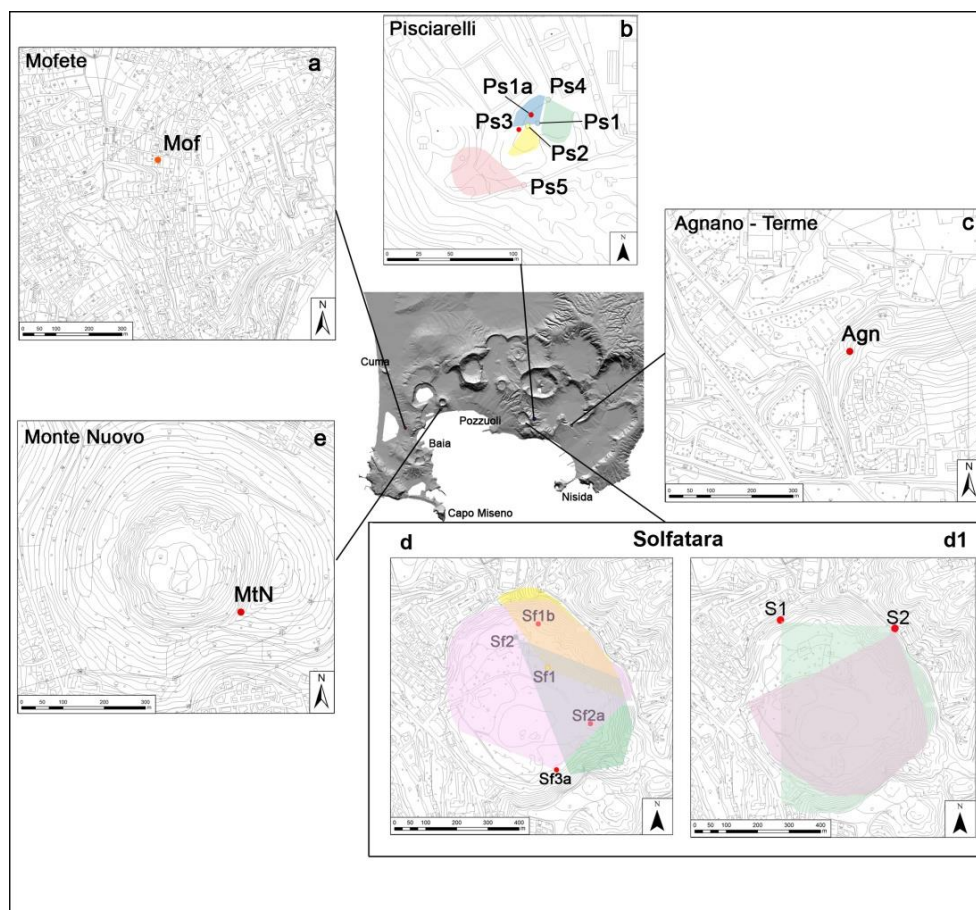


Figura 3.2.1 – Ubicazione dei punti di misura e dei settori indagati ai Campi Flegrei. I pallini rossi indicano i punti stazione dai quali sono stati effettuati rilievi con termocoppia rigida e telecamera termica. Nel riquadro b, le aree colorate in celeste, verde e rosa indicano i versanti rilevati 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.

Nel secondo semestre 2021, in generale, non ci sono significative variazioni di temperatura massima e modifiche nella distribuzione areale del campo fumarolico nei diversi punti di misura.

Non è stato possibile effettuare le misure del cratere de La Solfatara a causa di una temporanea inaccessibilità alla strada che ne costeggia il bordo (punto di misura S1 in Fig. 3.2.1d1).

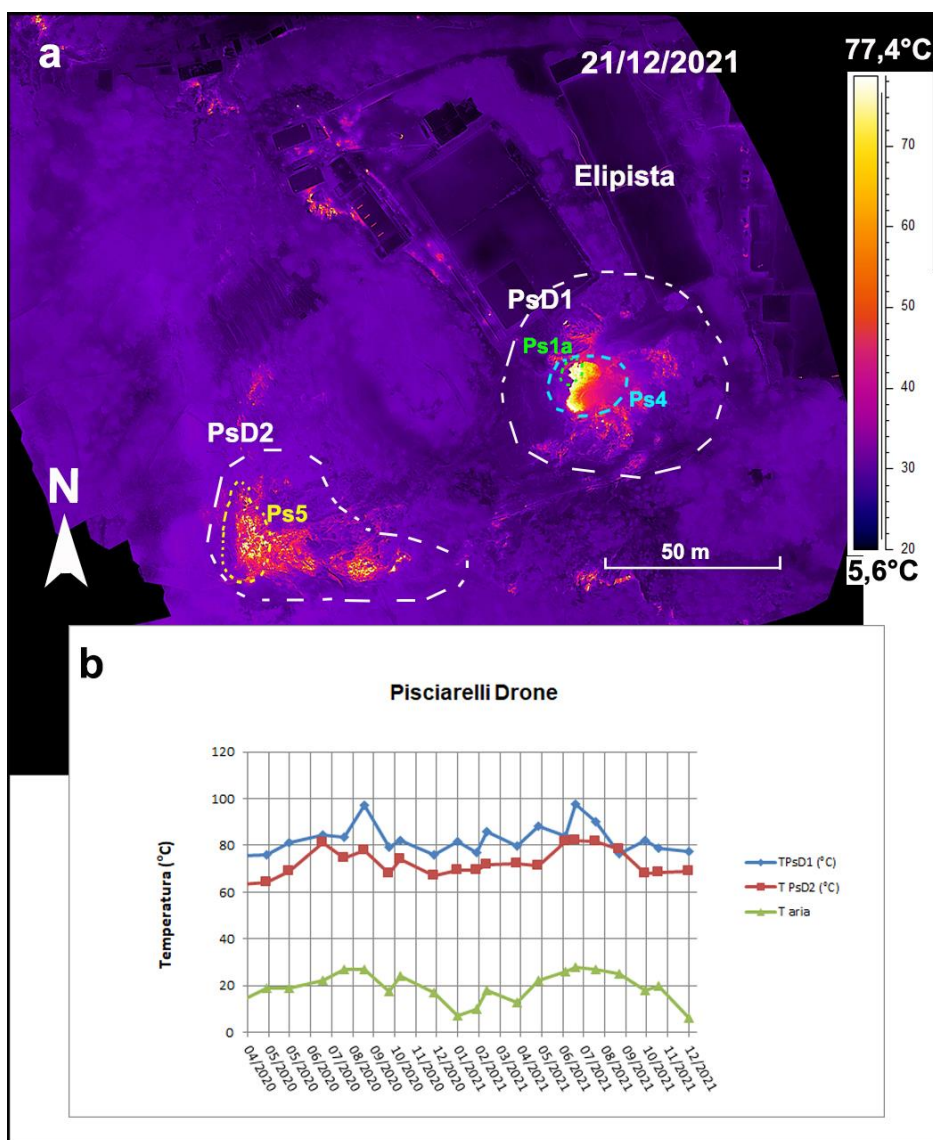
Pisciarelli

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.

Il drone utilizzato è un quadricottero (SR-T4 S/N:03) equipaggiato con una termocamera FLIR VUEPRO ad alta risoluzione (640x512 pixel) e precisione $\pm 5^\circ\text{C}$.

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 nel secondo semestre 2021 non presentano significative variazioni rispetto ai mesi precedenti (Fig. 3.2.3).

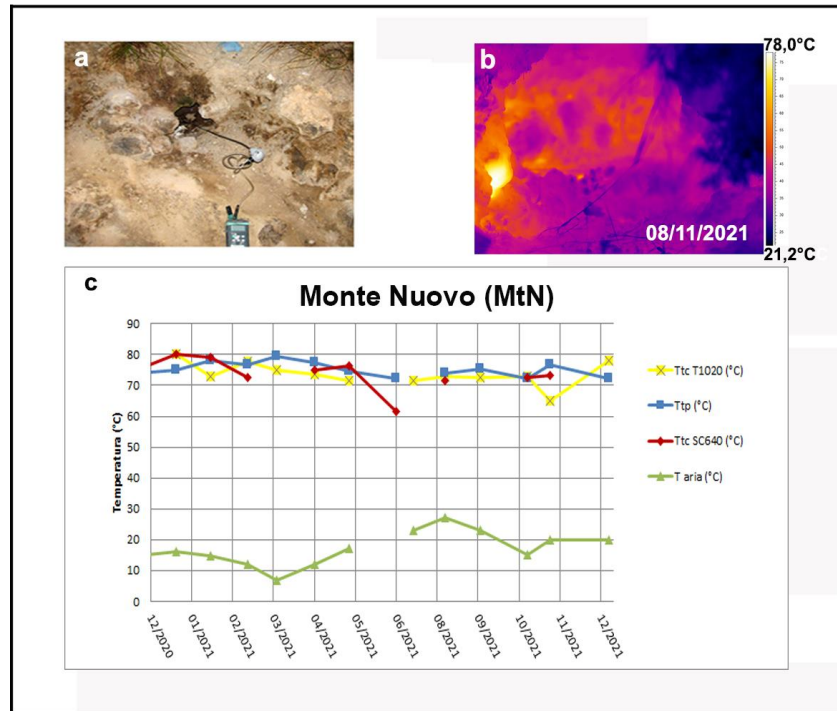


Monte Nuovo

Nel corso del secondo semestre 2021 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. 3.2.4) mostrano valori di temperatura piuttosto stabili ad eccezione delle variazioni stagionali e simili a quelli misurati nel semestre precedente (Figura 3.2.4c).

Figura 3.2.4 – 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 SC640 (TtcSC640), 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 dicembre 2020 a dicembre 2021 (c).



Agnano Terme

Nel corso del secondo semestre 2021 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. 3.2.5) mostrano valori di temperatura piuttosto stabili, ad eccezione delle variazioni stagionali, e simili a quelli misurati nel semestre precedente (Fig. 3.2.5c).

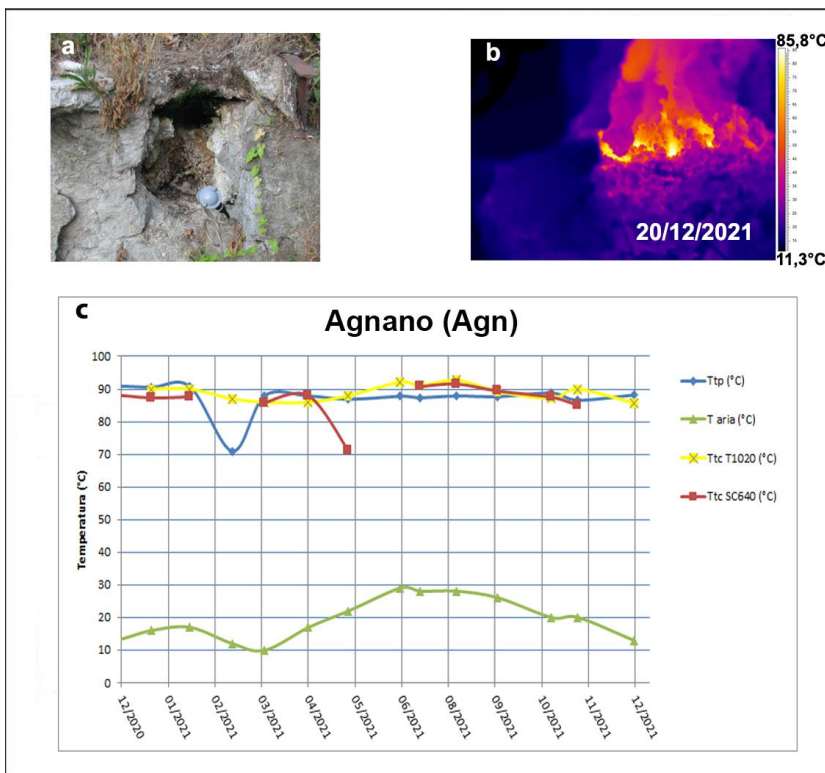
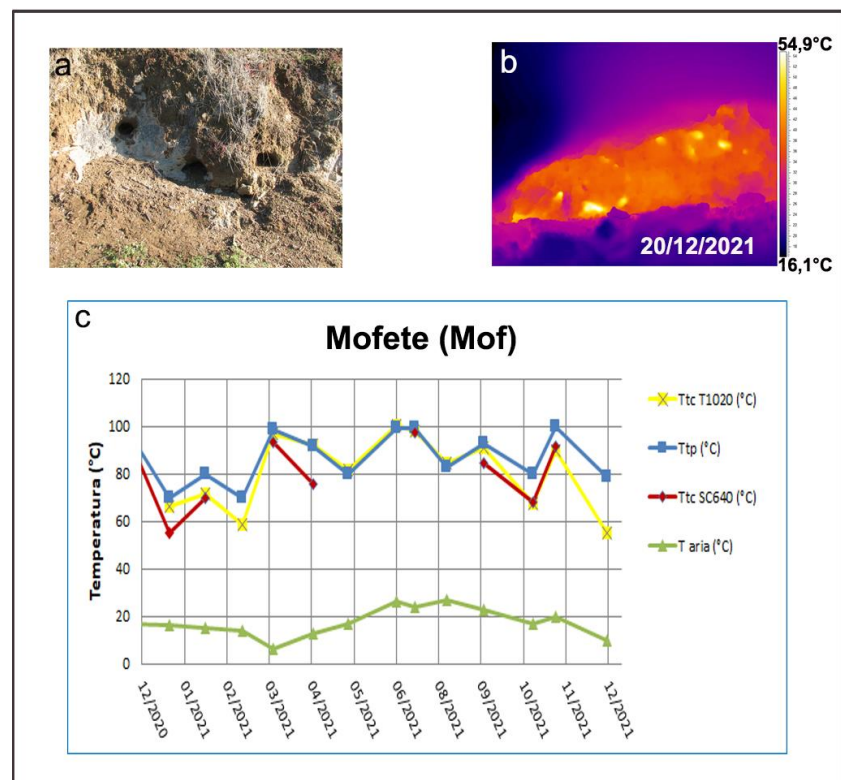


Figura 3.2.5 - Fumarola all'interno dello stabilimento termale delle "Terme di Agnano". Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione Agn di figura 1.1c. Valori massimi di temperatura con termocamera FLIR SC640 (TtcSC640), valori massimi di temperatura con termocamera FLIR T1020 (TtcT1020) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell'aria (Taria) misurata nel momento del rilievo termico, da dicembre 2020 a dicembre 2021 (c).

Mofete

Nel corso del secondo semestre 2021 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 del semestre precedente (Fig. 3.2.6c).

Figura 3.2.6 - 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 SC640 (TtcSC640), 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 dicembre 2020 a dicembre 2021 (c).



3.3 Comparazione della temperatura superficiale da dati satellitari e Rete TIRNet

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

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:

Landsat8: Il satellite ha 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) mentre il TIRS 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). In particolare per questa missione, a seguito della definizione del programma congiunto USGS-INGV nel 2014, è stata attivata l'acquisizione dei dati LANDSAT8 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 100metri di risoluzione ma sono ricampionate a 30 metri (<http://landsat.usgs.gov/>)

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	
	1	0.52-0.60	4	1.60-1.70	10	8.125-8.475
Bands and	2	0.63-0.69	5	2.145-2.185	11	8.475-8.825
Spectral Range (µm)	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 semestre luglio – dicembre 2021 sono stati acquisiti i seguenti dati satellitari ottici:

<p>ASTER Diurni Luglio: Nessuno Agosto: 19 Settembre: 4 Ottobre: Nessuno Novembre: Nessuno Dicembre: Nessuno</p>	<p>ASTER Notturmi Luglio: 11 Agosto: 3 Settembre: Nessuno Ottobre: 22 Novembre: Nessuno Dicembre: 18</p>
<p>LANDSAT8 Diurni Luglio: 3, 10, 26 Agosto: 20, 11, 27 Settembre: 5, 12, 28 Ottobre: 14, 21 Novembre: 15 Dicembre: 17</p>	<p>LANDSAT8 Notturmi Luglio: 3 Agosto: 20 Settembre: 5 Ottobre: 7 Novembre: Nessuno Dicembre: Nessuno</p>

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

N° 2 ASTER Diurni

N° 4 ASTER Notturmi

N° 13 LANDSAT8 Diurni

N° 4 LANDSAT8 Notturmi

I dati satellitari ASTER e LANDSAT 8 sono distribuiti da USGS (United States Geological Survey) attraverso il sito <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 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, 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 luglio – dicembre 2021.

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).

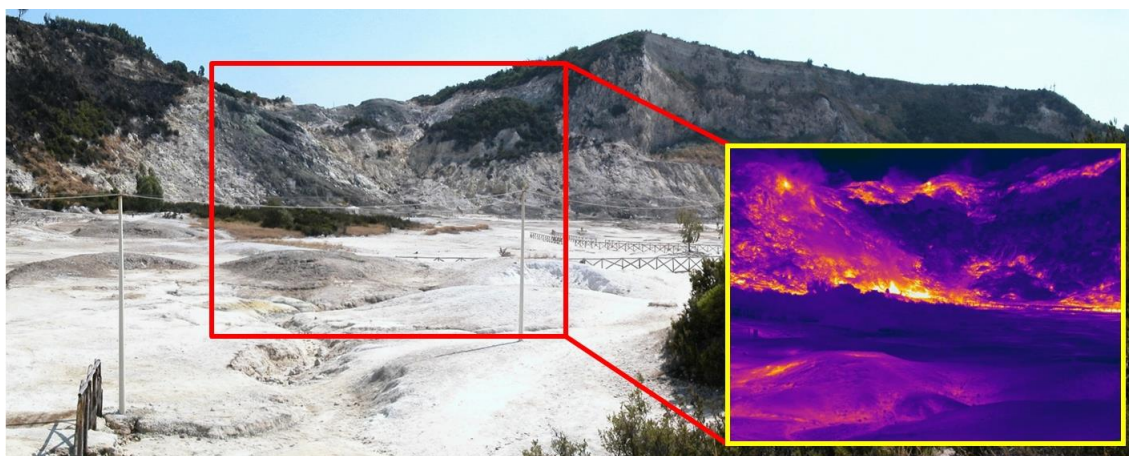


Figura 3.3.1 - Area inquadrata dalla stazione TIR SF1.

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 TIRNet sono state georiferite nel sistema UTM WGS84 (Figura 3.3.2a).

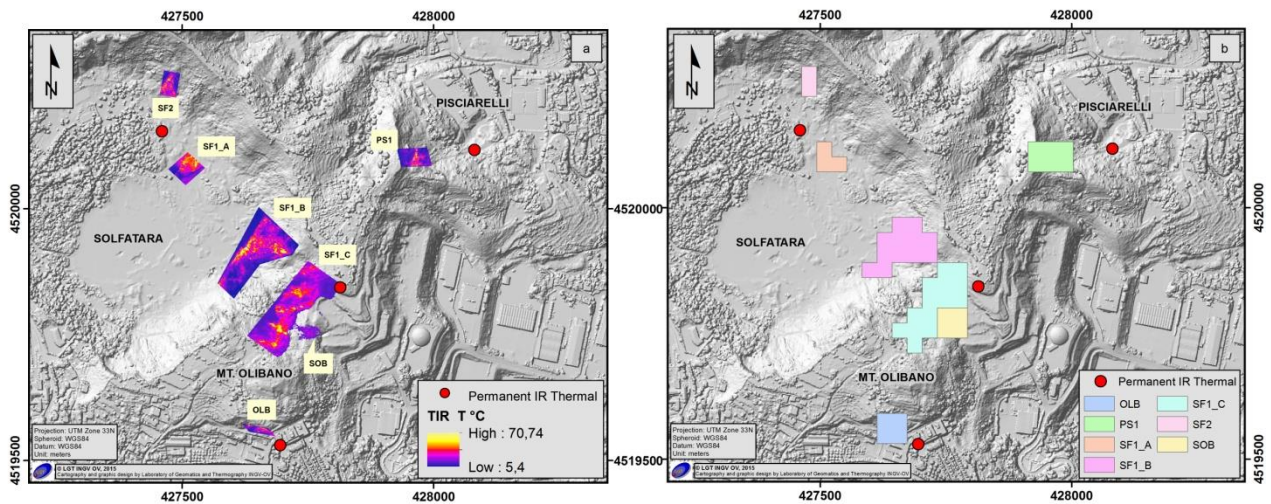


Figura 3.3.2 - Immagini termiche georiferite del 03/07/2021 (a) e aree di analisi (b).

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 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).

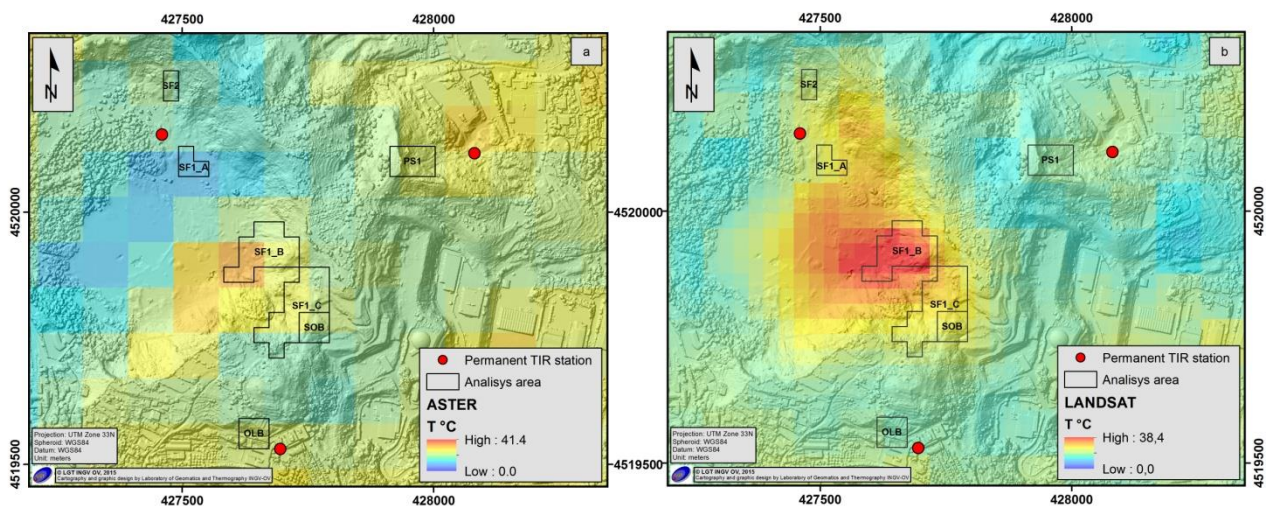
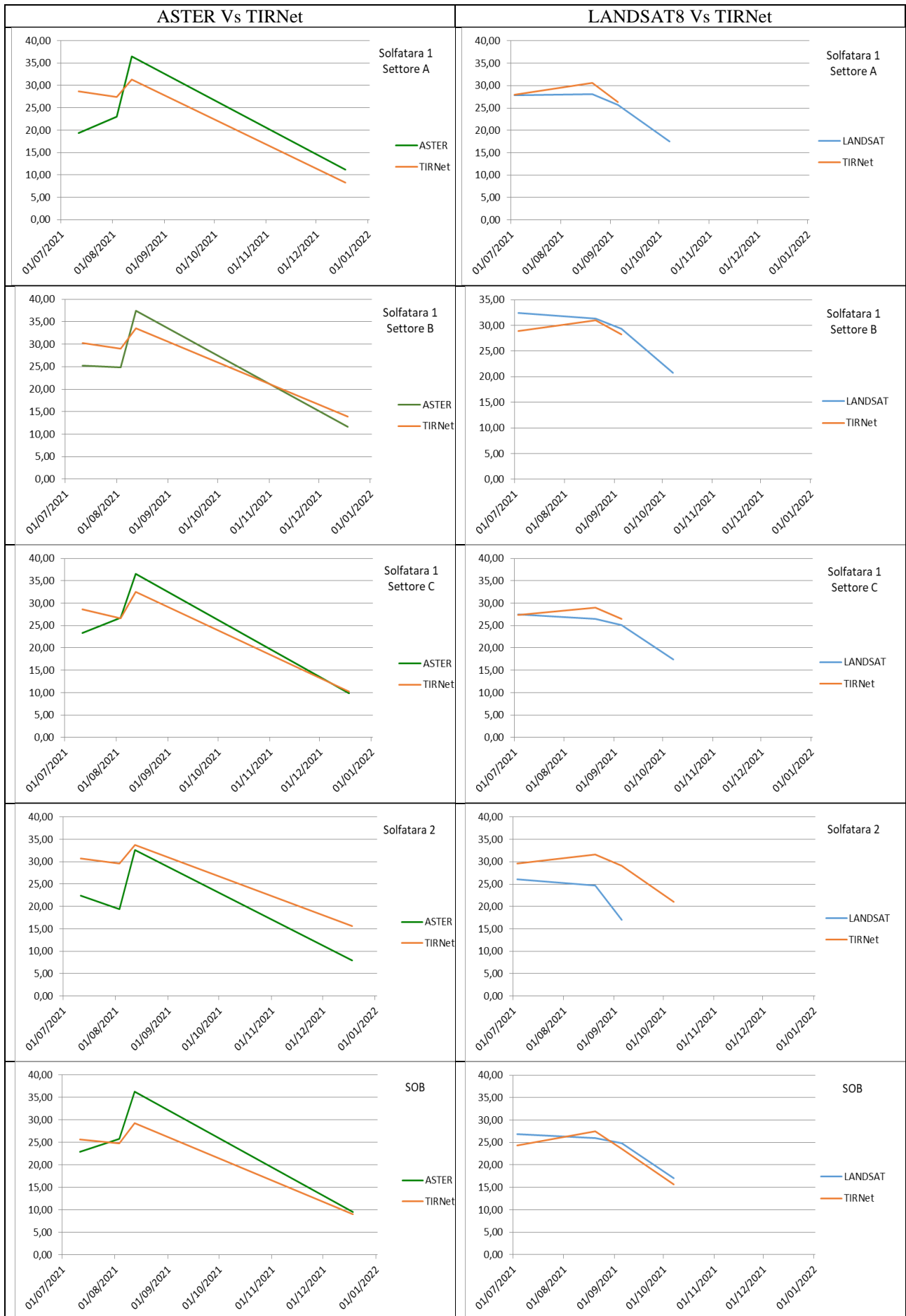
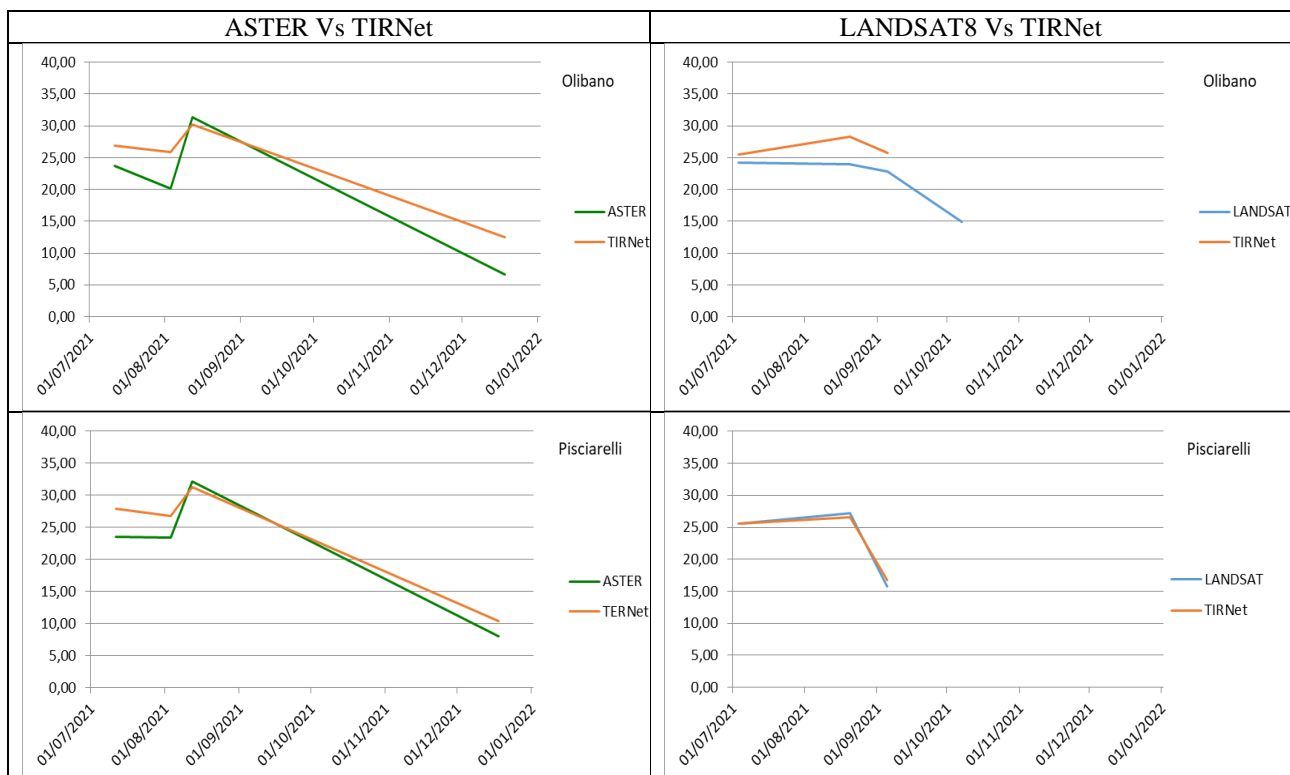


Figura 3.3.3 - Immagini termiche satellitari ASTER (a) e Landsat8 (b) rispettivamente dell'11 e del 3 luglio 2021. I poligoni racchiudono le aree inquadrare dalla Rete TIRNet.

Nei grafici che seguono sono riportate le comparazioni tra le temperature medie ottenute dall'analisi dei dati ASTER, LANDSAT8 e quelle delle stazioni della Rete TIRNet acquisite nel secondo semestre 2021.





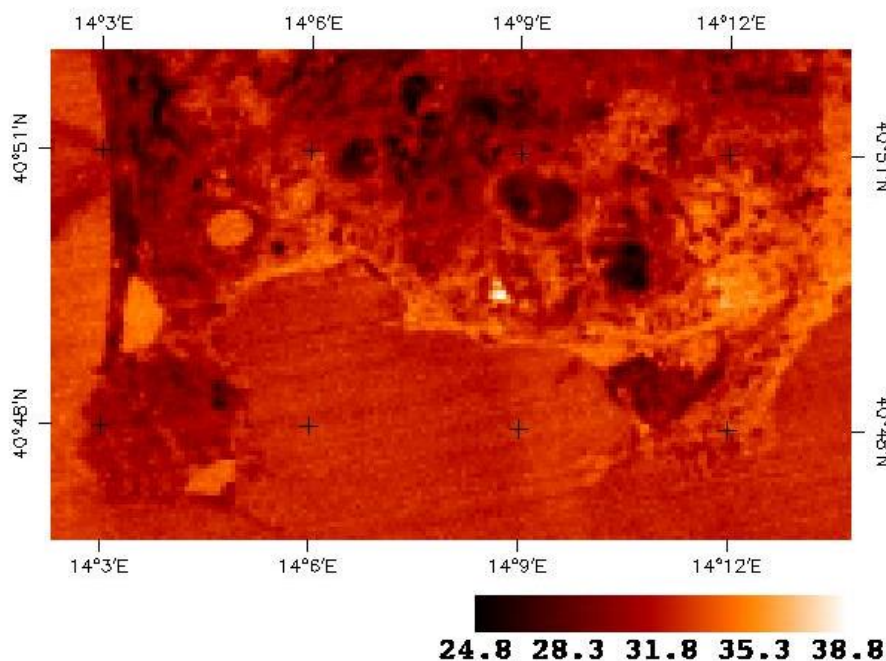
Dai grafici precedenti è possibile osservare che i risultati ottenuti dall’analisi dei dati acquisiti dai due sistemi di acquisizione a scale differenti sono comparabili.

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 ASTER e Landsat8, acquisite rispettivamente il 12 e il 20 agosto 2021 sull'area Flegrea.

Figura 3.3.4 - Mappa di temperatura superficiale relativa al dato ASTER acquisito alle 21.00 UTC del 12 agosto 2021 (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 33 °C e la massima è stimata intorno a 38.8 °C.



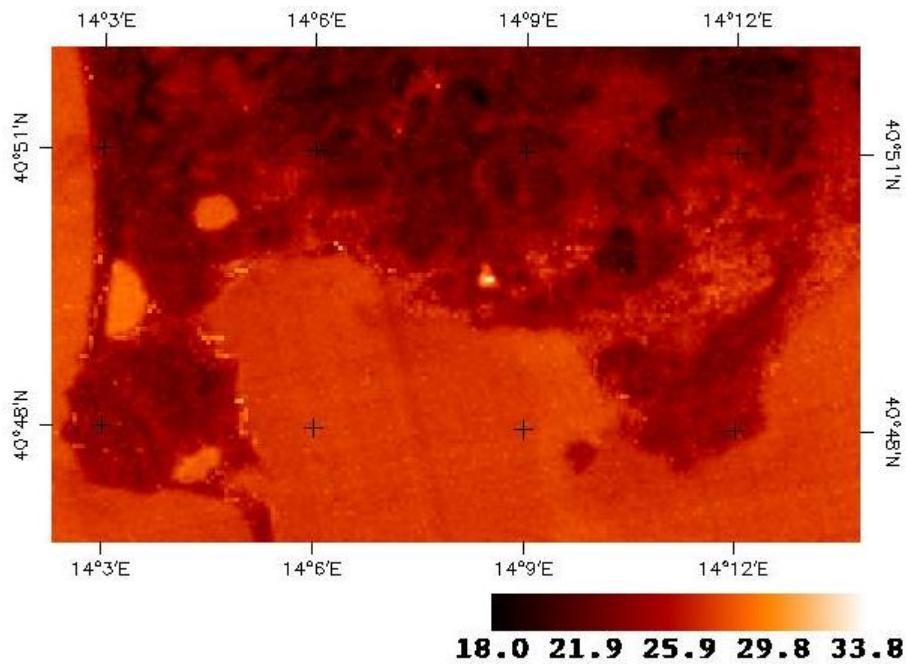


Figura 3.3.5 - Mappa di temperatura superficiale relativa al dato Landsat 8 acquisito alle 20.46 UTC del 20 agosto 2021 (risoluzione 30 metri). La temperatura media all'interno della Solfatara (riquadro in rosso) è stimata intorno ai 27 °C e la massima è stimata intorno a 33.76 °C.

In tali mappe, scelte come rappresentative del periodo luglio-dicembre 2021, si osserva come la temperatura superficiale stimata dai dati ASTER e LANDSAT 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 evidenzia variazioni significative.



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

4 - MONITORAGGIO GEOCHIMICO

S. Caliro¹, R. Avino¹, E. Bagnato¹, A. Carandente¹, E. Cuoco¹, C. Minopoli¹, 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 inoltre proseguite le attività propedeutiche per il 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 dell'Osservatorio Vesuviano, 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.

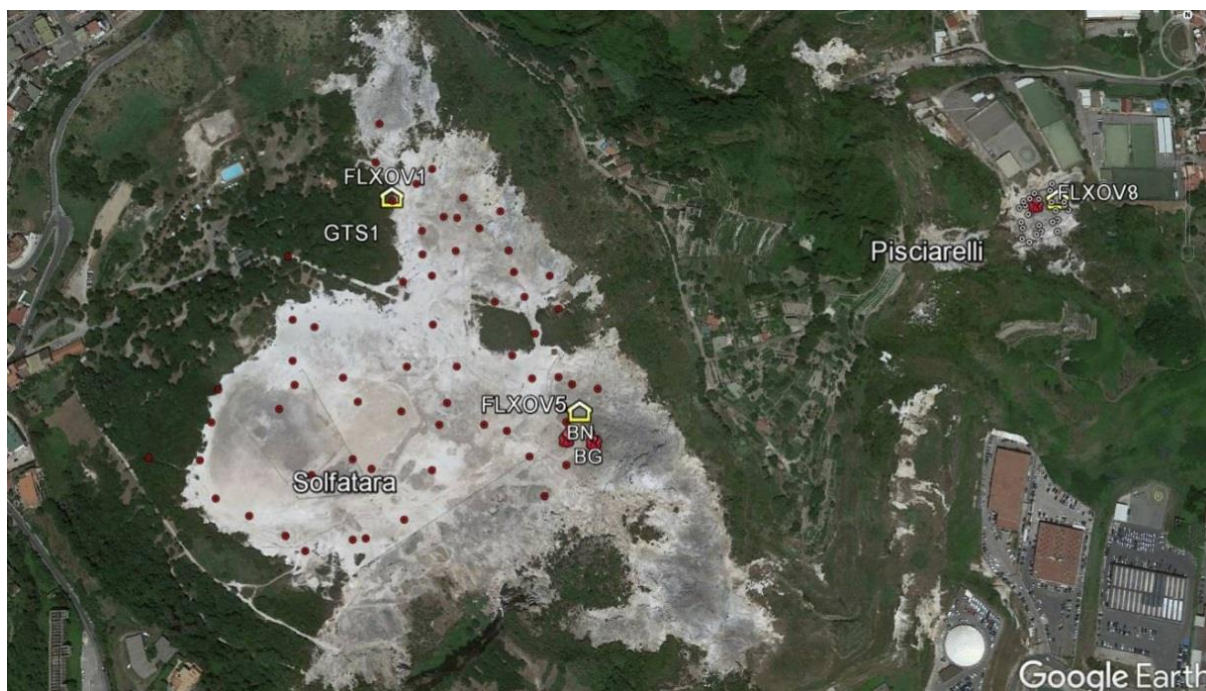


Figura 4.1 - Ubicazione delle stazioni della rete geochimica ai Campi Flegrei e dei siti dove sono eseguite le attività di monitoraggio geochimico. In particolare sono riportate le quattro stazioni geochimiche ubicate in area Solfatara-Pisciarelli, le principali fumarole della Solfatara (BG e BN) e di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

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
FLXOV1	40.8291N 14.1397E 103 m	Pozzuoli Solfatara	1997	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

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 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. 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.

Le attività svolte dall'Osservatorio Vesuviano nell'area flegrea durante il secondo semestre 2021 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 (ubicate nel cratere della Solfatara); monitoraggio del gradiente termico del suolo nel cratere della Solfatara (stazione GTS1);
- Inoltre, sono continuate le attività finalizzate al monitoraggio multiparametrico della falda freatica, consistenti nel campionamento, analisi e caratterizzazione geochimica delle acque e lo sviluppo della rete di monitoraggio multiparametrico della falda.

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 caratterizzato da una periodicità annuale, rientrando in un trend di aumento pluriennale dei valori a partire dal 2006 (Figura 4.2).

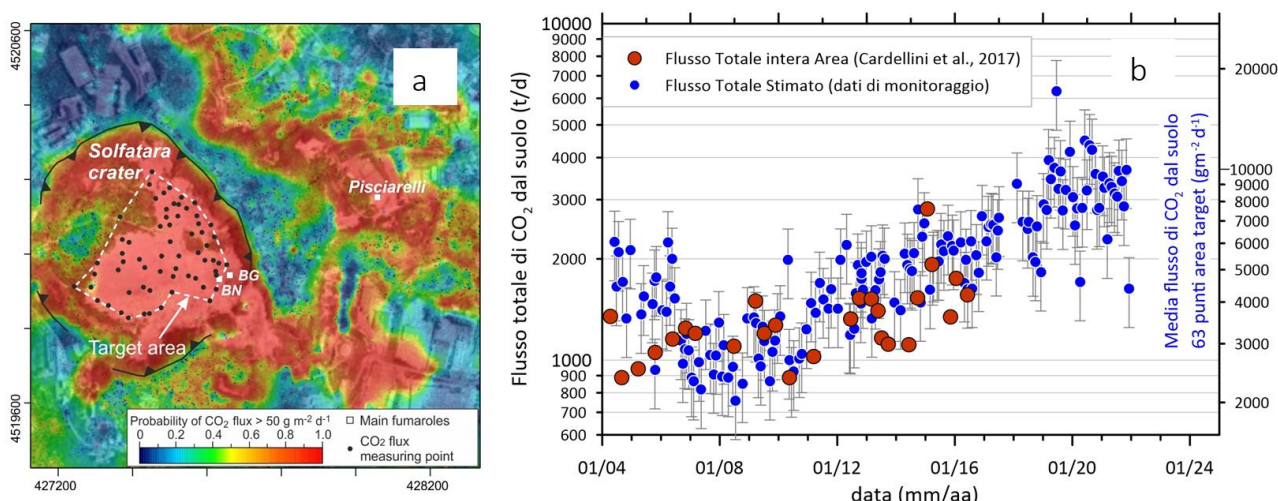


Figura 4.2 - a) Mappa dell'area di degassamento diffuso della Solfatara-Pisciarelli (Cardellini et al., 2017), con l'ubicazione dell'area target; b) Cronogramma dei flussi di CO₂, i punti blu si riferiscono all'emissione dall'area target scalati sull'intera DDS, ottenuta dal confronto con i dati delle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

In particolare, le misure (~60 punti, Target area in 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. La correlazione mostrata 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 in ~3000 t/d nel 2021 (Chiodini et al., 2021), valori paragonabili al flusso medio di CO₂ nel *plume* di vulcani attivi a degassamento persistente.

Analogamente, la media delle temperature del suolo, misurate a 10 cm di profondità, mostra un chiaro andamento stagionale sovrainposto ad un trend costante d'aumento della temperatura (Figura 4.3), con un incremento del valore medio delle temperature misurate di oltre 6 °C nel periodo 2002-2021.

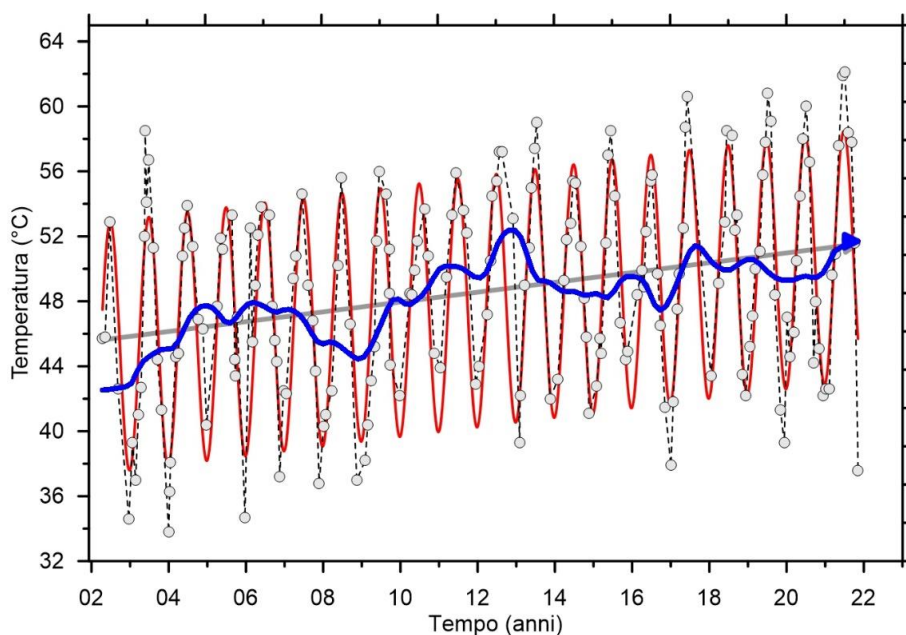


Figura 4.3 - Cronogramma della media delle temperature del suolo (a 10 cm di profondità) misurate su circa 60 punti fissi nell'area craterica della Solfatara. Va evidenziato l'incremento del valore medio nel periodo 2002-2021 di oltre 6 °C. Il trend depurato dalla componente stagionale, mediante l'utilizzo 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). 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%.

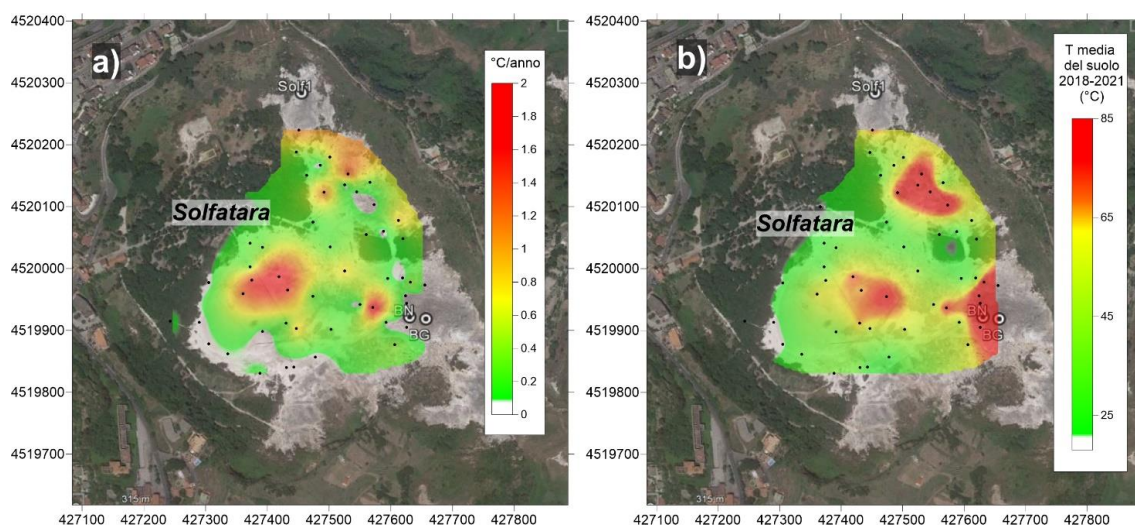


Figura 4.4 - a) Mappa dell'incremento di temperatura in °C/anno calcolato per ogni punto misurato a partire dal 2002. L'incremento di temperatura interessa diffusamente tutta l'area craterica con un massimo nella zona centrale. L'incremento di temperatura non interessa le aree delle fumarole e del bordo 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 2018 al 2021).

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. 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.

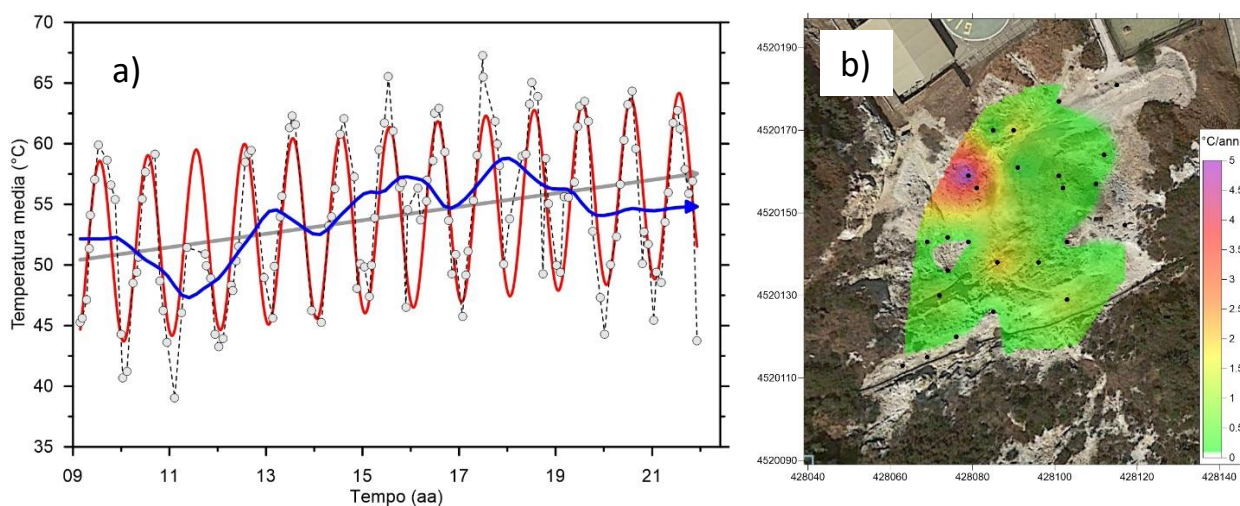


Figura 4.5 - a) Cronogramma della media delle temperature del suolo (a 10 cm di profondità) misurate su 25 punti fissi nell'area di Pisciarelli dal 2009. Il trend destagionalizzato, mediante l'utilizzo dell'algoritmo di destagionalizzazione STL (Seasonal-Trend decomposition based on Loess, Cleveland 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.

La stazione multiparametrica FLXOV5, attiva da 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 da febbraio 2016 (Figura 4.6). Tale aumento del flusso di CO₂, che ha raggiunto valori di ~200 kgm⁻²d⁻¹, è da mettere in relazione all'evidente processo di fumarolizzazione dell'area.

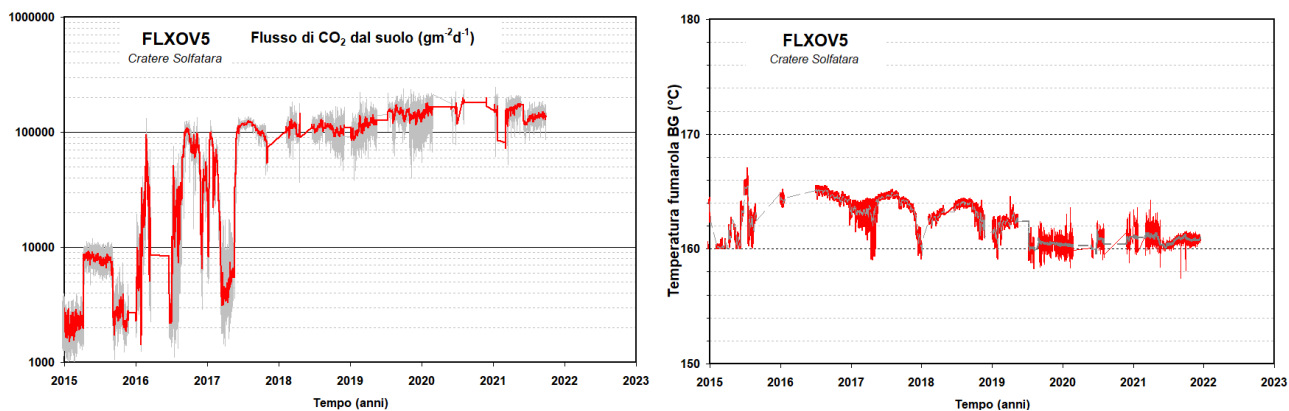


Figura 4.6 - Valori del flusso di CO₂ dal suolo misurati dalla stazione FLXOV5 installata nel cratere della Solfatara (area fumarole) (la linea rossa si riferisce alle medie giornaliere). I flussi di CO₂ dal suolo mostrano, in generale, un significativo incremento a partire dal 2016.

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 un'evidente 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. I valori di flusso di CO₂ registrati dalla stazione FLXOV1 non hanno mostrato variazioni significative rispetto ai periodi precedenti.

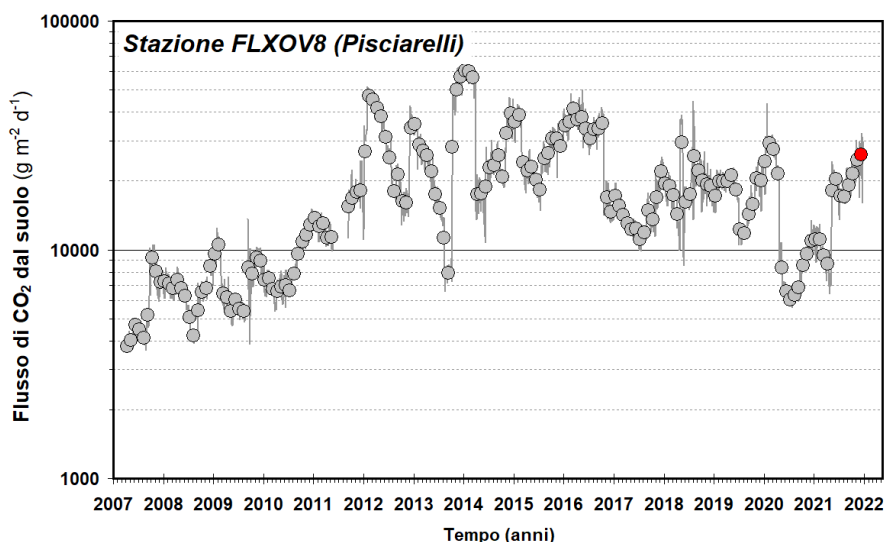


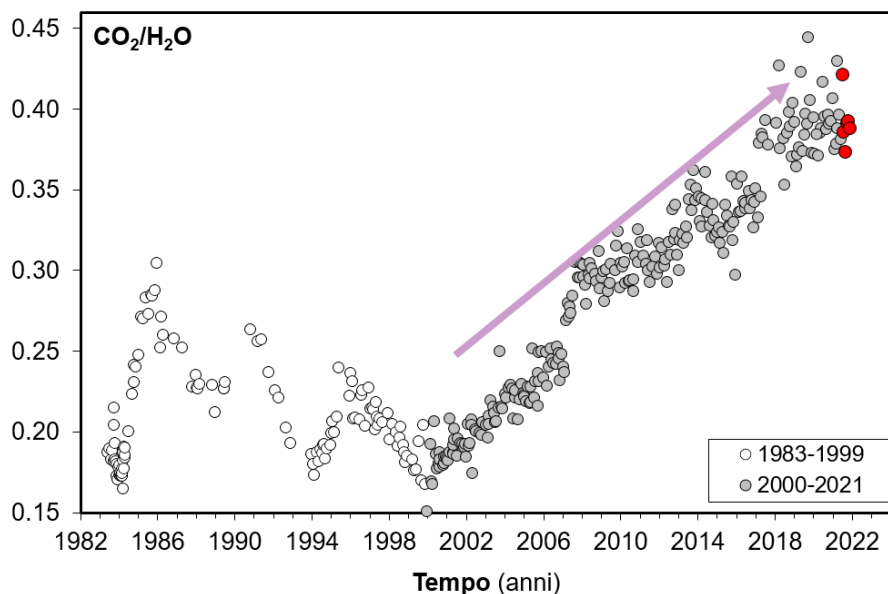
Figura 4.7 - Medie giornaliere (linea) e medie mensili (cerchi) dei flussi di CO₂ dal suolo misurati a Pisciarelli (FLXOV8). I flussi di CO₂ mostrano, in generale, un significativo incremento a partire dal 2010. In rosso sono evidenziate le medie mensili dei valori del secondo semestre 2021.

Composizione chimica delle fumarole dell'area flegrea.

Una dettagliata descrizione del modello geochimico interpretativo del sistema idrotermale della Solfatara, delle variazioni composizionali registrate e delle possibili interpretazioni sono riportate nei seguenti lavori scientifici: Caliro et al., (2007; 2014); Chiodini (2009); Chiodini et al., (2010; 2011; 2012; 2015a, 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 CO_2/H_2O delle fumarole, in aumento a partire dal 2000 (Figura 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 CO_2/H_2O (Chiodini et al., 2015a; 2016). Inoltre è possibile che una frazione della CO_2 emessa dalle fumarole sia prodotta, in seguito all'aumento di temperatura, da reazioni che coinvolgono la calcite di origine idrotermale presente nel sistema (Chiodini et al., 2015b).

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 secondo semestre 2021.



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). 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 degli ultimi mesi (fumarola BG, Figura 4.9).

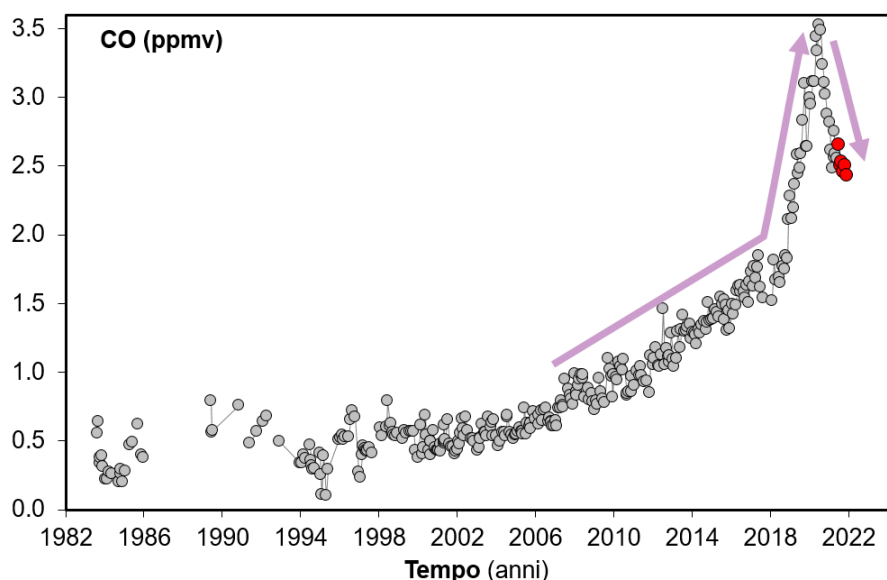
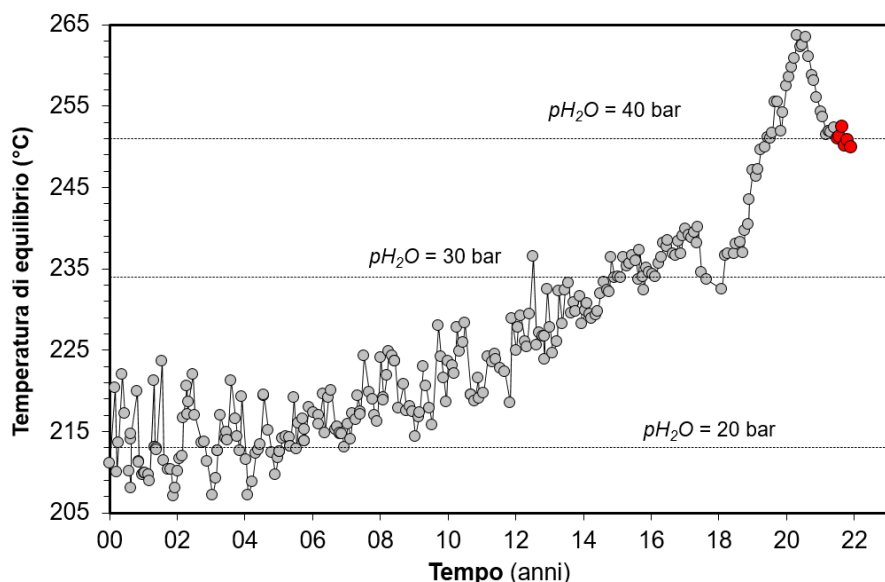


Figura 4.9 - Variazioni della concentrazione di monossido di carbonio (CO) misurato alla fumarola BG a partire dal 1983. In rosso sono evidenziati i campioni relativi al secondo semestre 2021. In generale alti contenuti di CO caratterizzano sistemi vulcanici ad elevata temperatura mentre fumarole alimentate da sistemi idrotermali mostrano concentrazioni più basse, in tali sistemi un aumento delle concentrazioni di CO può riflettere un incremento delle condizioni di 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 ad un aumento di temperatura di circa 45°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 (Figura 4.10).

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

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 secondo semestre 2021.



Il rapporto CO₂/CH₄, le cui variazioni nel tempo sono state interpretate con l'occorrenza di episodi di iniezione di fluidi magmatici, ossidanti e poveri in CH₄, nel sistema idrotermale (Chiodini 2009; 2012), ha mostrato negli ultimi mesi la fase discendente di un picco (Figura 4.11). I picchi positivi del rapporto CO₂/CH₄ 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). Nei campioni del secondo semestre 2021 il rapporto CO₂/CH₄ è rimasto su valori bassi, simili a quelli mostrati nei periodi precedenti. Inoltre, nel cronogramma di Figura 4.11,

è possibile riconoscere un trend d'aumento del rapporto a partire dal 2000 interrotto dalla fase discendente dell'ultimo picco che caratterizza gli ultimi periodi. La persistenza di questo basso valore del rapporto CO_2/CH_4 (i.e. elevate concentrazioni di CH_4) 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 in questo periodo dal sistema idrotermale mostrano caratteristiche più riducenti, che secondo le più recenti interpretazioni sono indotte da estesi processi di condensazione del vapore nella parte superficiale del sistema in risposta all'aumento delle condizioni di pressione e temperatura.

I rapporti N_2/CO_2 e N_2/He , che avevano mostrato una forte variazione a partire dal 2000 (Chiodini et al., 2010), ma più in generale dai primi dati disponibili (1985), nel periodo di interesse (secondo semestre 2021) rientrano nel trend di diminuzione già identificato (Figura 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 un lavoro scientifico (Caliro et al., 2014), al quale si rimanda per un approfondimento dei modelli di degassamento magmatico utilizzati e dei possibili scenari del *plumbing system* dei Campi Flegrei.

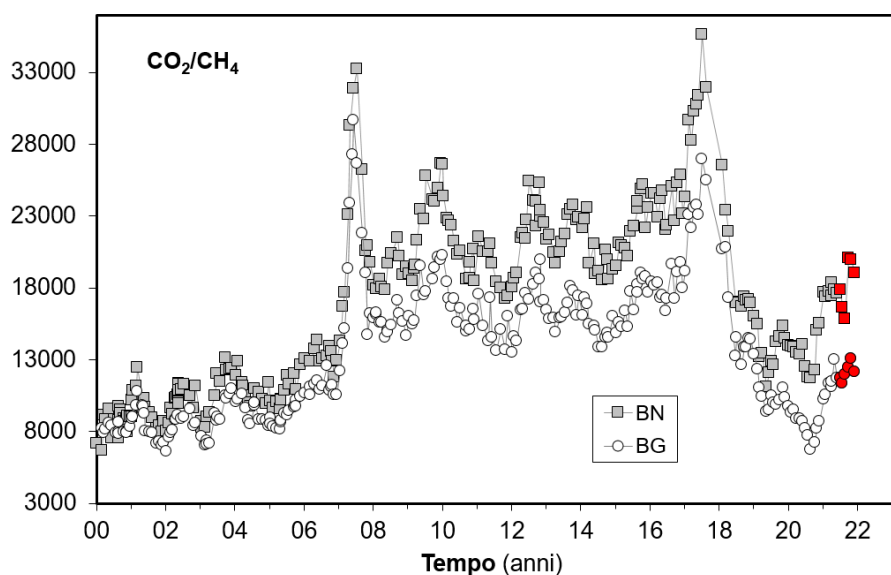


Figura 4.11 - Variazioni del rapporto CO_2/CH_4 per le fumarole BG e BN a partire dal 2000. I picchi nel rapporto, registrati in superficie con circa un anno di ritardo, evidenziano episodi di degassamento magmatico occorsi ai Campi Flegrei (Chiodini et al., 2012). In rosso sono evidenziati i campioni del secondo semestre 2021.

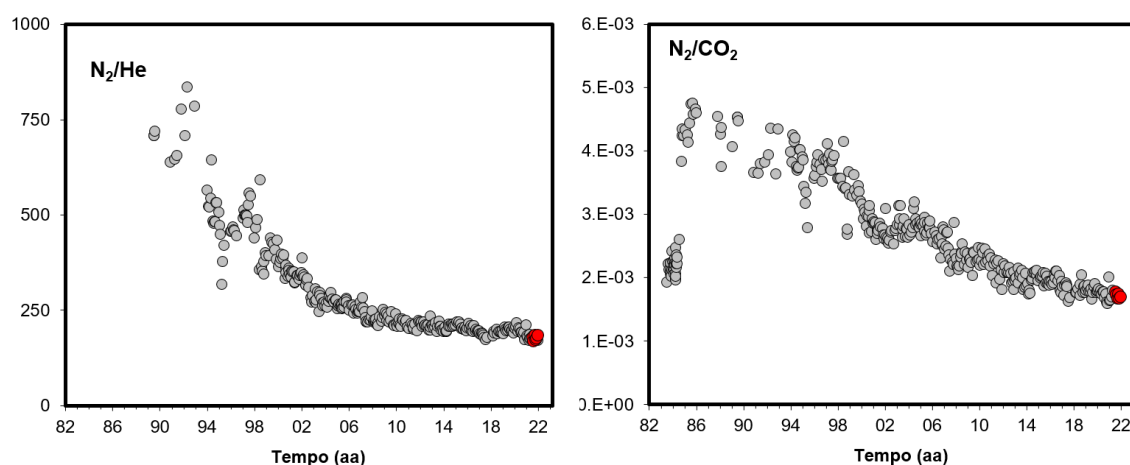


Figura 4.12 - Cronogramma dei rapporti N_2/He e N_2/CO_2 relativi alla fumarola BG. In rosso sono evidenziati i campioni del secondo semestre 2021 che confermano i trend di diminuzione già identificati.

Il processo di degassamento così individuato, comporterebbe nel tempo (indipendentemente dal modello di degassamento 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). 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 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.

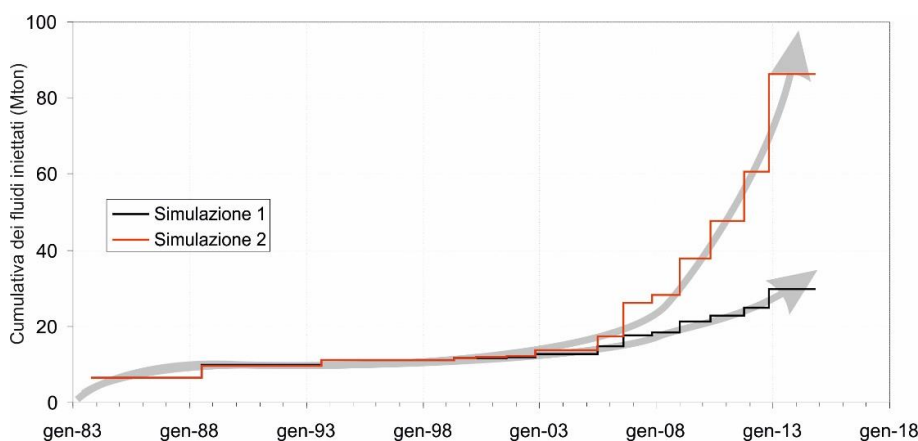


Figura 4.13 - Curve cumulative delle quantità di fluidi magmatici iniettate nel sistema idrotermale dei Campi Flegrei riferite alla simulazione 1 (Chiodini et al., 2012) e alla simulazione 2 (Chiodini et al., 2016). Per maggiori dettagli vedi il testo e i lavori citati.

Variazioni macroscopiche dell'area di Pisciarelli.

Il processo di riscaldamento e pressurizzazione della parte più superficiale del sistema idrotermale, iniziato a partire dal 2007 (Chiodini et al., 2011) e tuttora in corso, è presumibilmente la causa delle variazioni macroscopiche osservate a Pisciarelli e che negli ultimi anni sono consistite nell'apertura di nuovi vent fumarolici e di polle bollenti, nell'emissione di fango, in attività sismica localizzata, nell'aumento della temperatura della fumarola principale (Figura 4.14), nell'aumento dei flussi misurati in continuo dalla stazione FLXOV8 (Figura 4.7).

L'incremento del processo di degassamento dell'area è altresì supportato da recenti misure del flusso di CO_2 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). L'aumento dell'attività di degassamento nell'area di Pisciarelli è anche indicato dalla misura in continuo della concentrazione di CO_2 in aria (Figura 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 CO_2 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.

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.

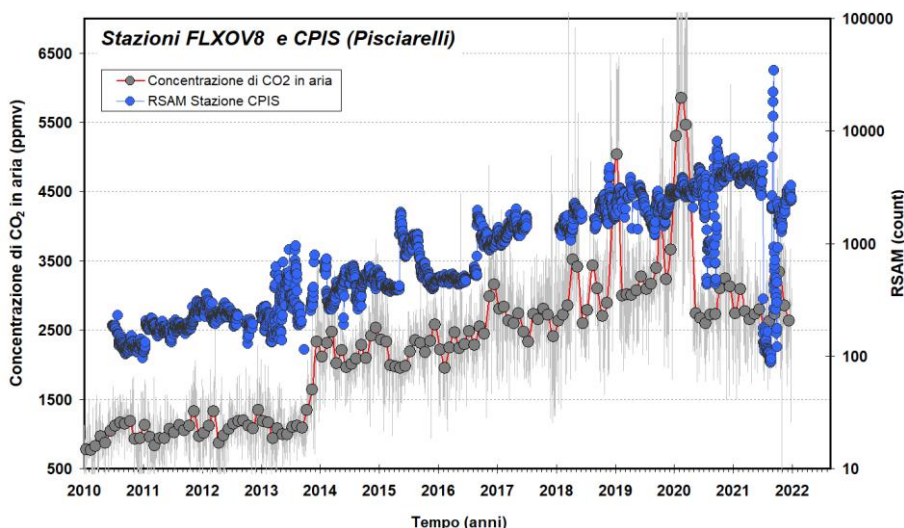
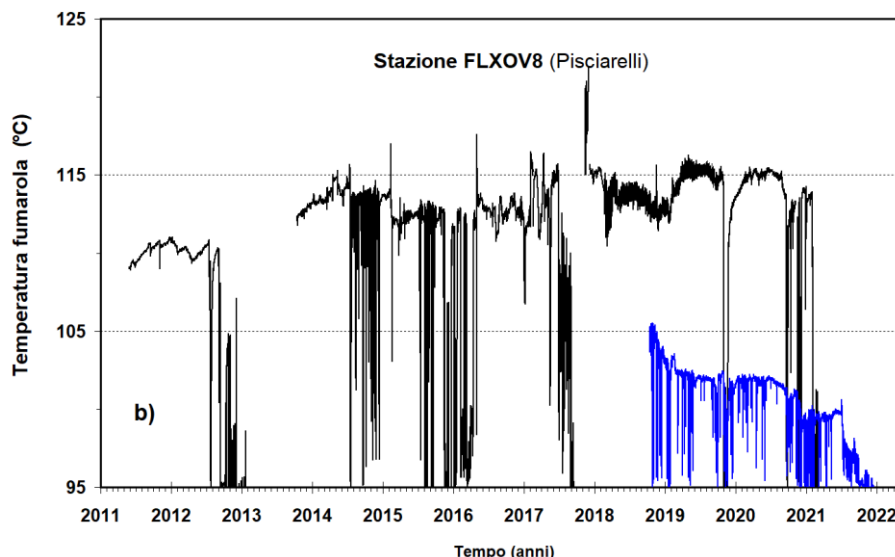


Figura 4.15 - Cronogramma delle medie giornaliere (linea) e medie mensili (cerchi) della concentrazione di CO₂ registrata in aria con frequenza bioraria dalla stazione geochimica per la misura del flusso di CO₂ dal suolo di Pisciarelli (FLXOV8). Nel cronogramma è riportata anche la serie temporale dell'ampiezza del tremore fumarolico su base giornaliera registrata dalla stazione sismica 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). E' da evidenziare il continuo trend d'aumento nel tempo delle concentrazioni di CO₂ in aria e dell'ampiezza del tremore fumarolico sin dal 2013.

Contemporaneamente al flusso di CO₂ dal suolo misurato dalla stazione anche la concentrazione di CO₂ in aria ha mostrato una diminuzione a partire dal mese di aprile.

È da evidenziare negli ultimi mesi un continuo incremento dell'area di emissione e in particolare dell'estensione e modifica della superficie della polla di Pisciarelli. In considerazione di tali evidenti variazioni, in osservanza al principio di precauzione e al fine di operare in sicurezza nel sito di emissione sono al momento sospese le attività di campionamento dei fluidi della fumarola principale di Pisciarelli e di manutenzione del sensore di temperatura installato nella medesima fumarola.

Caratterizzazione chimico-fisica delle acque della falda Flegrea (DPC-INGV All. B2 2019-2021)

Nel secondo semestre 2021, nell'ambito del progetto di potenziamento del monitoraggio dell'attività idrotermale ai Campi Flegrei (DPC-INGV All. B2 2019-2021, WP2-Task3), sono proseguite le attività di misura dei parametri chimico-fisici e del livello piezometrico della falda flegrea, con maggiore dettaglio nelle aree limitrofe di Solfatara – Pisciarelli. E' stato inoltre eseguito il campionamento 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. 4.16). 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.



Figura 4.16 - Ubicazione dei punti di misura e campionamento delle acque di falda relativi alla campagna del 2020, con il simbolo rosso sono riportati i siti della rete di monitoraggio multiparametrico in continuo della falda. In giallo la prima stazione equipaggiata con i nuovi sensori HT (fino a 100 °C).

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, si è proceduto ad acquistare dei sensori di P-T in grado di funzionare a queste temperature e in presenza di fluidi aggressivi. Per questi ultimi sensori è stato sviluppato e ingegnerizzato il sistema d'acquisizione e trasmissione dei dati, poiché a livello commerciale non sono stati individuati sistemi adatti al monitoraggio della falda alle condizioni chimico-fisiche e di alta temperatura incontrate. Un primo prototipo di stazione è stato installato a giugno 2020 in un pozzo a temperatura di 83 °C (Hotel gli Dei) nelle

vicinanze della Solfatara. I parametri acquisiti dalla rete di monitoraggio in continuo sono inseriti nel report del II anno del progetto DPC-INGV All. B2 2019-2021, WP2-Task3.

Nel secondo semestre 2021 è stata ripetuta una campagna di campionamento dei siti monitorati e di altri siti di sicuro interesse per il monitoraggio (Fig. 4.16).

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 Solfatara - 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 4.17 è riportata la ricostruzione della superficie piezometrica basata sui dati disponibili.

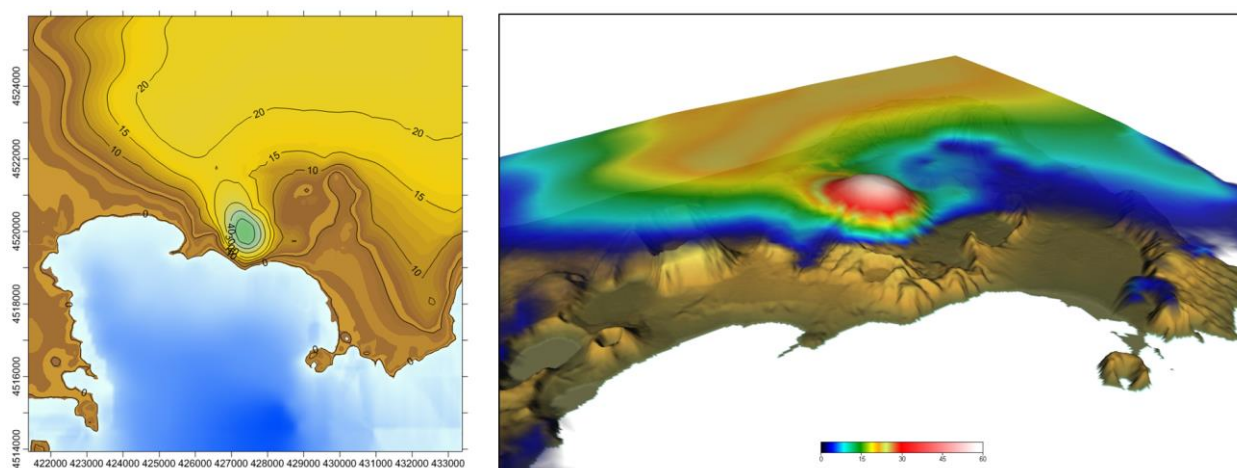


Figura 4.17 - Ricostruzione della superficie di falda nell'area flegrea. Si noti l'alto morfologico della superficie piezometrica nell'area Solfatara-Pisciarelli.

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 4.18a dai diagrammi $\delta^{18}\text{O}$ vs. δD e vs. Cl mette in evidenza, per molte delle acque investigate in area Solfatara-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 Solfatara-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.

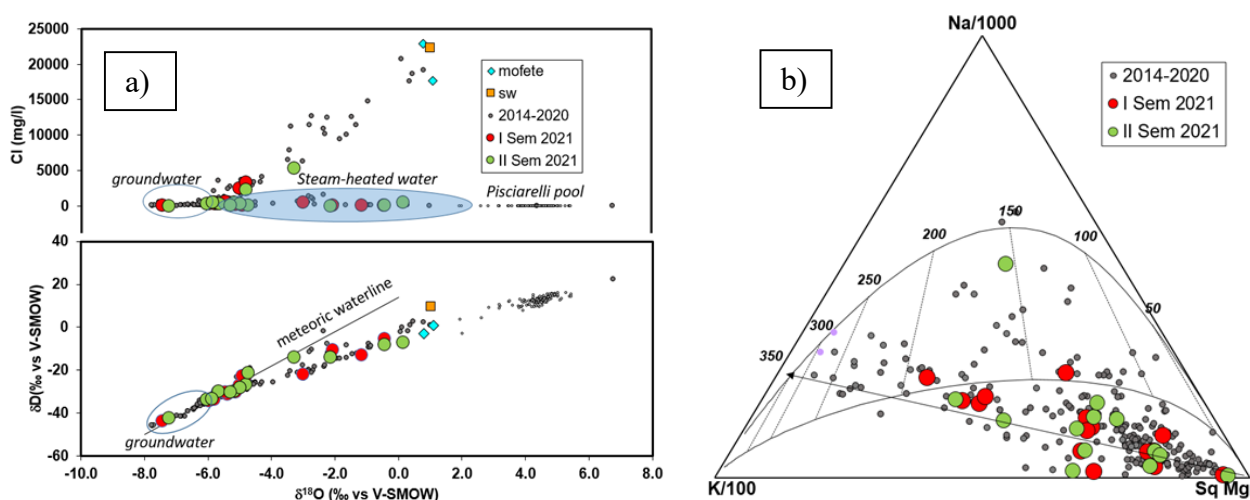


Figura 4.18 - a) composizione chimico-isotopica delle acque di falda relative alla campagna del 2014 e quella effettuata nel secondo semestre 2021 (simbolo verde), da notare che la quasi totalità delle acque campionate in area Pisciarelli-Solfatara mostrano composizioni che indicano un significativo 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.

In Figura 4.18b 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.

ISCHIA

1 - MONITORAGGIO SISMOLOGICO

P. Ricciolino¹, M. Orazi¹, D. Galluzzo¹, E. Bellucci Sessa¹, C. Buonocunto¹, A. Caputo¹,
A. Carandente¹, P. Cusano¹, R. Esposito¹, G. Gaudiosi¹, F. Liguoro¹,
D. Lo Bascio¹, 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 centralizzata 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.

Rete Sismica

La Rete Permanente di Monitoraggio Sismico di Ischia operativa nel secondo semestre 2021 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 di sensori o di ridondanza strumentale.

La Tabella 1.1 sintetizza, per ogni sito, il tipo di sensore e di trasmissione presente. Sono presenti 3 stazioni analogiche equipaggiate con sensori a corto periodo a 3 componenti. Le stazioni digitali sono 8: 3 basate sull'acquisitore GILDA e 5 equipaggiate con l'acquisitore Guralp DM24 a sei canali.

I sensori che equipaggiano le stazioni digitali sono i seguenti: 8 velocimetri a larga banda (BroadBand: 0.016-50 Hz) e 4 accelerometri. A questi si aggiungono un microfono infrasonico Infracyrus (presso IOCA) e un microfono broadband Chaparral (presso IFOR).

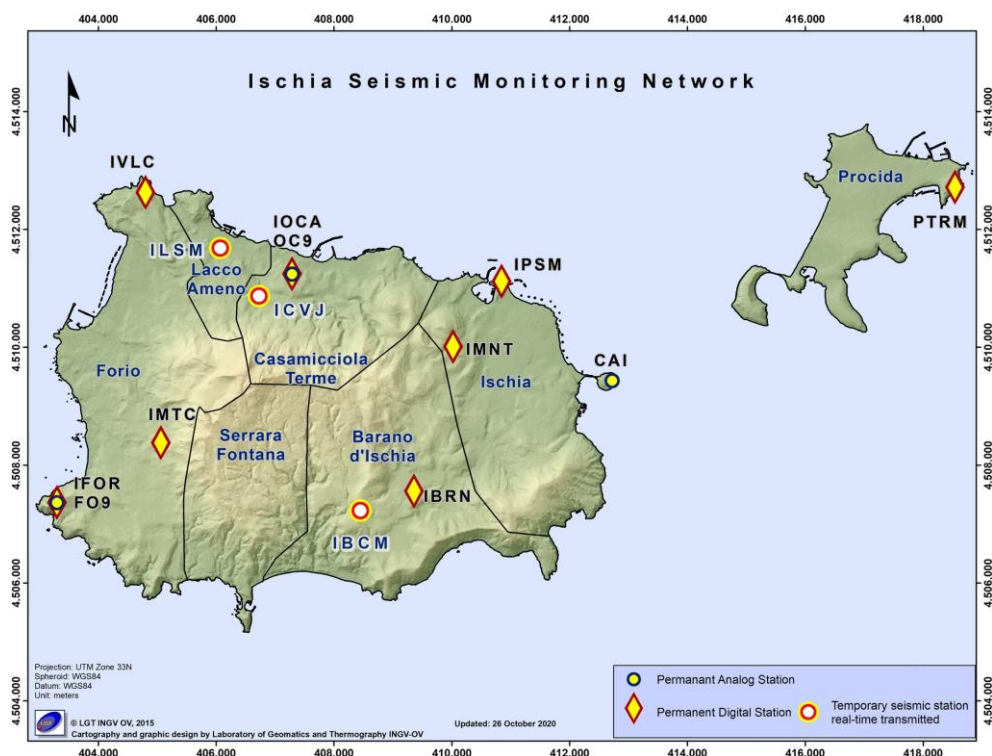


Figura 1.1 – Rete Sismica di Ischia.

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.

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

Tabella 1.1 – Stato della Rete Sismica Permanente di Ischia

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
CAI	40.7322N 13.9655E 103 m	Castello Aragonese	1996	MarkL4-3C	Analogica	Radio UHF analogica
OC9 IOCA	40.7468N 13.9014E 123 m	Ischia Osservatorio di Casamicciola	1993 09/02/2011	MarkL4-3C Guralp CMG-40T 60s Episensor ES-T Microfono Infracyrus	Analogica GILDA GILDA	Radio UHF analogica ADSL
FO9 IFOR	40.7115N 13.8551E 234 m	Forio Punta Imperatore	1995 Ottobre 2009	MarkL4-3C Guralp CMG-40T 60s Microfono Chaparral	Analogica GILDA	Radio UHF Analogica Wi-Fi
IMTC	40.7209N 13.8758E 209 m	Forio Monte Corvo	17/04/2015	Guralp CMG-40T 60s	GILDA	Wi-Fi
PTRM	40.7614N 14.0349E 100 m	Procida Terra Murata	Luglio 2018	Guralp CMG-40T Episensor ES-T	Guralp DM24	Wi-Fi
IPSM	40.7462N 13.9439E 17 m	Ischia Porto	Luglio 2018	Guralp CMG-40T Episensor ES-T	Guralp DM24	Wi-Fi
IVLC	40.7590N 13.8718E 50 m	Monte Zaro	Luglio 2018	Guralp CMG-40T Episensor ES-T	Guralp DM24	Wi-Fi
IBRN	40.7140N 13.9268E 100 m	Barano	Luglio 2018	Guralp CMG-40T	Guralp DM24	UMTS
IMNT	40.7362N 13.9343E 100 m	Montagnone	Luglio 2018	Guralp CMG-40T	Guralp DM24	UMTS

Tabella 1.2 – Stato della Rete Mobile centralizzata 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	GILDA	UMTS
ICVJ	40.7435N 13.8952E 81 m	Casamicciola T. Hotel V.Jantò	05/10/2020	Lennartz LE-3Dlite	Lennartz MARSlite	UMTS
IBCM	40.7109N 13.9161E 314 m	Barano Casolare Madonna	05/06/2020	Lennartz LE-3Dlite Episensor ES-T	Lunitec Atlas	UMTS

Nel corso del secondo semestre 2021, le stazioni della Rete Sismica installata ad Ischia hanno registrato 1 terremoto di bassa magnitudo (17/07/2021 02:18 UTC; $M_d = 0.6 \pm 0.3$) la cui localizzazione è mostrata in Figura 1.2.

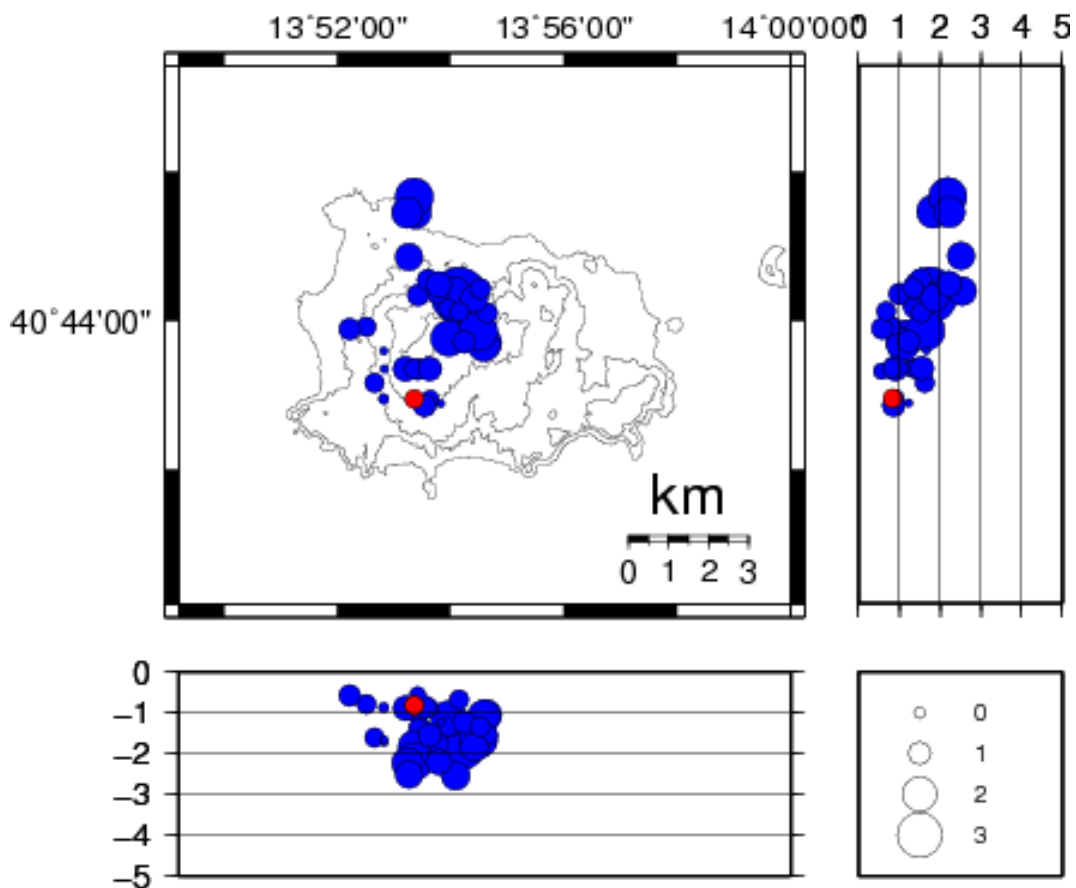


Figura 1.2 – Localizzazioni ipocentrali dei terremoti registrati ad Ischia nel corso degli ultimi 5 anni (in blu) e nel secondo semestre 2021 (in rosso).

Non si evidenziano particolari andamenti 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).

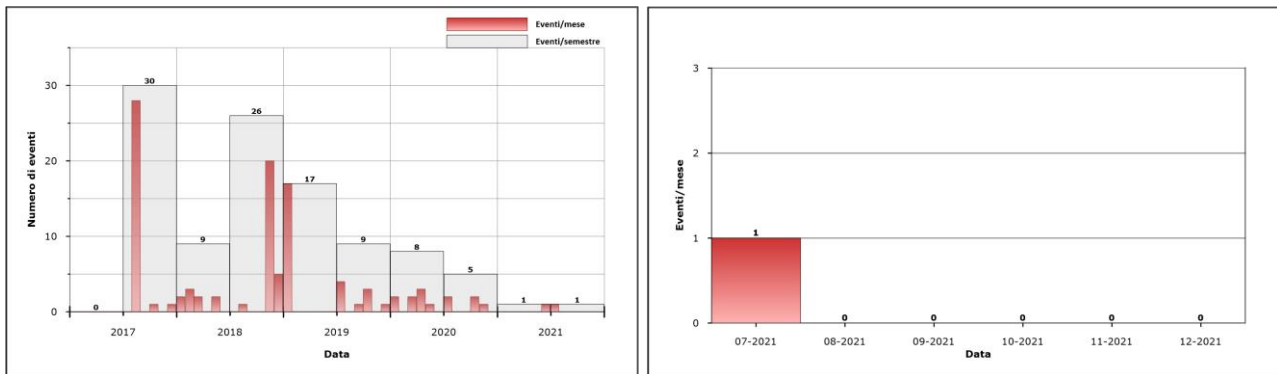


Figura 1.3 – Frequenza di accadimento dei terremoti registrati ad Ischia nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2021 (a destra).

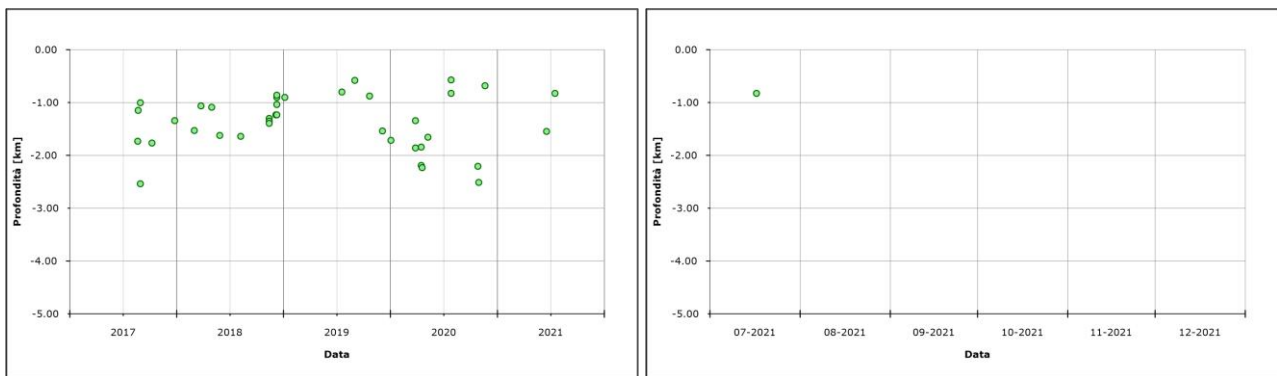


Figura 1.4 – Variazione temporale della profondità ipocentrale dei terremoti localizzati a Ischia nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2021 (a destra).

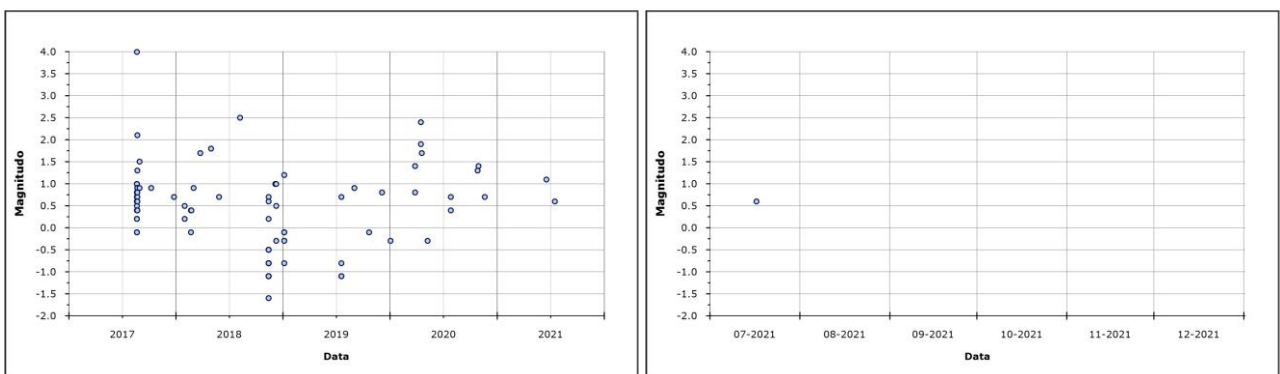


Figura 1.5 - Variazione temporale della magnitudo dei terremoti registrati ad Ischia nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2021 (a destra).

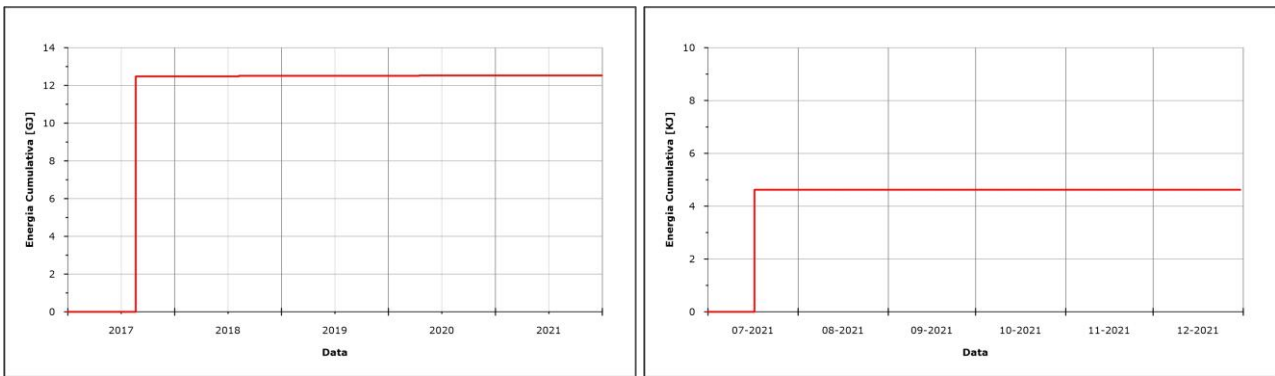


Figura 1.6 – Andamento cumulativo dell’energia rilasciata dai terremoti registrati ad Ischia nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2021 (a destra).

2 - MONITORAGGIO GEODETICO

Durante il secondo semestre 2021 il monitoraggio geodetico di Ischia è stato effettuato attraverso misure continue GPS e tiltmetriche ed elaborazione di dati satellitari.

2.1 Rete GPS (GNSS)

P. De Martino¹, G. Scarpato¹, G. Brandi¹, M. Dolce¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

La rete GNSS permanente operante sull'isola di Ischia è costituita da 6 stazioni ed una stazione è in funzione sull'isola di Procida (Figura 2.1.1). 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. Quattro stazioni sono attrezzate con ricevitori Leica GR10 e 3 con ricevitori Leica GRX1200PRO. I dati vengono trasmessi con varie tecnologie in funzione della logistica del sito. I sistemi di trasmissione comprendono 3 stazioni che utilizzano la connettività LTE/4G, 2 stazioni che si appoggiano alla rete Wi-Fi dell'Osservatorio Vesuviano, 1 che trasmette con tecnologia ADSL e 1 che utilizza una linea GSM.

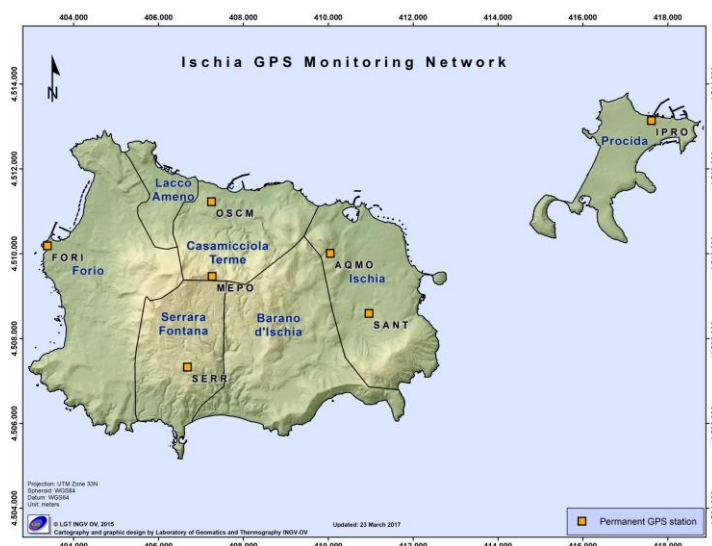


Figura 2.1.1 – Mappa Rete GNSS di Ischia.

Tabella 2.1.1 – Stato della Rete GNSS ad Ischia

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
AQMO	40.7361N 13.9346E	Acquedotto Montagnone (Ischia)	2001	LeicaGR10 LEIAT504 LEIS	30sec/flusso 1sec	UMTS/4G
FORI	40.7369N 13.8557E	Municipio di Forio d'Ischia	1999	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	30sec/flusso 1sec	Wi-Fi
MEPO	40.7309N 13.9018E	Monte Epomeo	2017	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	30sec/flusso 1sec	Wi-Fi
OSCM	40.7467N 13.9013E	Casamicciola Terme (Ischia)	2010	Leica GRX1200GGPRO LEIAT504GG LEIS	30sec/flusso 1sec	ADSL
SANT	40.7234N 13.9453E	Santantuono (Ischia)	2010	Leica GRX1200PRO LEIAT504 NONE	30sec/flusso 1sec	UMTS/4G
SERR	40.7116N 13.8952E	Serrara (Ischia)	2001	Leica GR10 LEIAT504 LEIS	30sec/flusso 1sec	UMTS/4G
IPRO	40.7652N 14.0239E	Procida	2003	Leica GRX1200PRO LEIAT504 LEIS	30sec	GSM

Due stazioni sono alimentate con energia solare tramite pannelli fotovoltaici da 100W (SANT e MEPO). Le restanti stazioni sono alimentate tramite rete elettrica e dotate di batterie a tampone per estenderne l'operatività in caso di blackout.

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 con il software scientifico Bernese e alla restituzione dei risultati (serie temporali delle variazioni lungo le componenti Nord, Est e Quota, campi di velocità e/o spostamento planimetrici e verticali)

Durante il 2021 è stato realizzato e sperimentato anche un nuovo sistema di processamento e visualizzazione in tempo reale dei dati ad alta frequenza (1 Hz) delle stazioni GNSS delle isole di Ischia e Procida (Convenzione DPC-INGV, Allegato B2, WP2-Task2). Tale sistema sarà operativo in Sala di Monitoraggio dal 2022.

L'analisi delle serie temporali GPS conferma la generale subsidenza dell'isola con valori più elevati nel settore centro-meridionale dell'isola (De Martino et al., 2021; Figure 2.1.2 e 2.1.3).

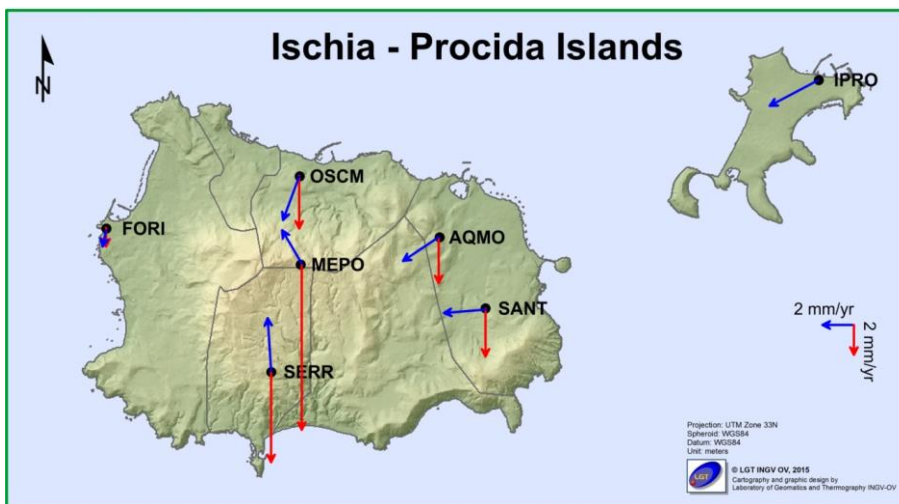


Figura 2.1.2 - Campo di velocità (in mm/anno) degli spostamenti orizzontali (in blu) e verticali (in rosso) alle isole di Ischia e Procida.

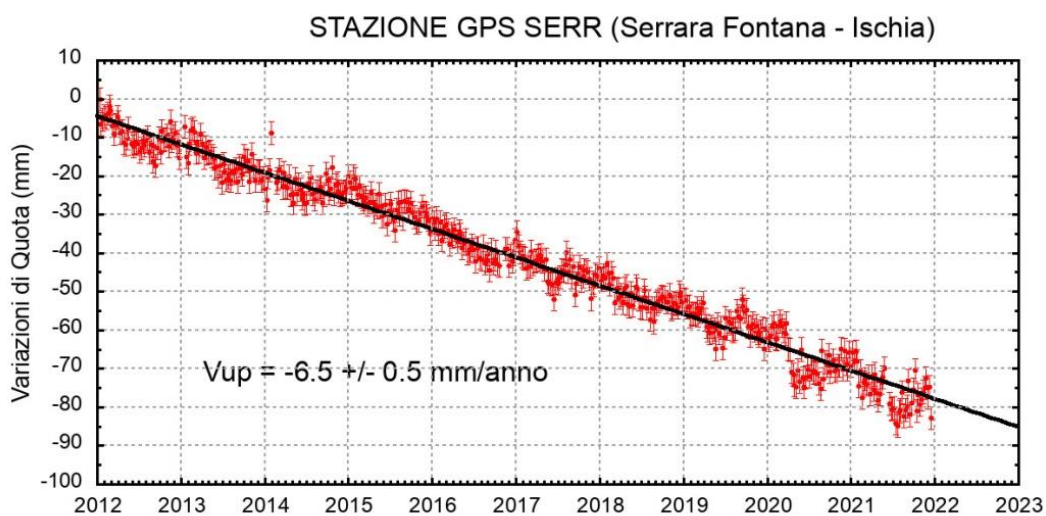


Figura 2.1.3 - Serie temporale delle variazioni settimanali in quota della stazione di SERR (Ischia) da gennaio 2012 a dicembre 2021.

2.2 Rete Tiltmetrica

C. Ricco¹, I. Aquino¹, V. Augusti¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano - Napoli

La Rete Tiltmetrica dell’Isola di Ischia (Figura 2.2.1) consiste in 3 stazioni (le cui specifiche sono riportate in Tabella 2.2.1), attrezzate con sensori digitali da pozzo, mod. Lily (Jewell Instrument) con passo di acquisizione ogni minuto. Tutte le stazioni trasmettono quotidianamente alla Sala di Monitoraggio dell’Osservatorio Vesuviano i file dati.

Figura 2.2.1 – Mappa della Rete Tiltmetrica di Ischia.

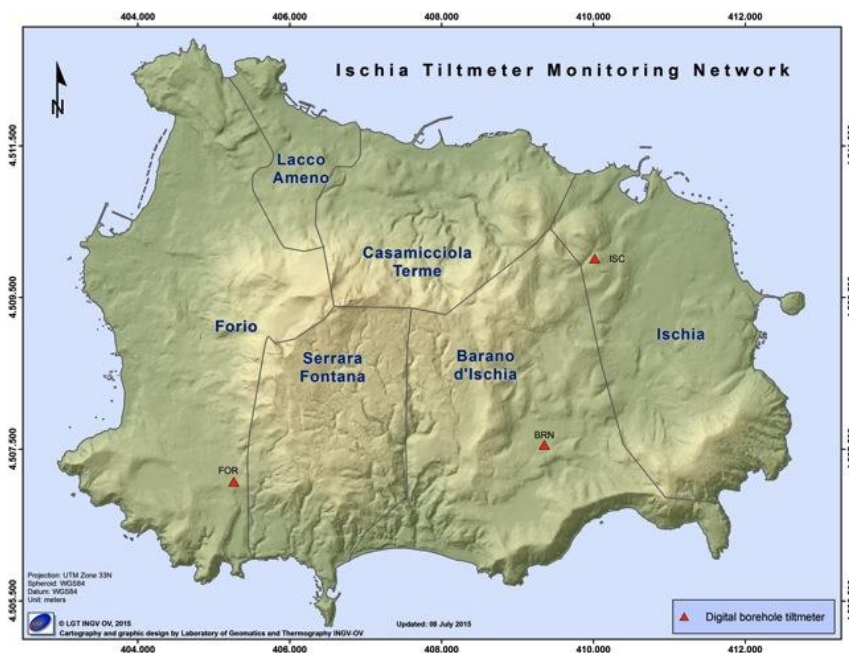


Tabella 2.2.1 – Stato della Rete Tiltmetrica di Ischia

Stazione	Coordinate	Località	Sensore	Profondità	Acquisizione	Trasmissione
ISC	40.7362N 13.9343E	Acquedotto EVI, Ischia	Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri	1'	Router UMTS
BRN	40.7140N 13.9268E	Cimitero Comunale, Barano d’Ischia	Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri	1'	Router UMTS
FOR	40.7091N 13.8785E	Scuola D’Abundo, Forio	Jewell Instrument mod. Lily	-27 metri	1'	Router UMTS

I segnali registrati dalle stazioni tiltmetriche della rete Isola d’Ischia vengono quotidianamente validati ed elaborati. Essi consistono in serie temporali di variazioni di inclinazione del suolo lungo due piani ortogonali (NS ed EW), di temperatura e bussola magnetica. Tali segnali vengono singolarmente analizzati durante il corso dell’anno con delle *routine* di calcolo appositamente realizzate, in quanto mostrano caratteristiche specifiche a effetti di sito di vario tipo.

La variazione tiltmetrica che interessa l’isola di Ischia nel secondo semestre 2021 mostra un pattern di inclinazione fortemente polarizzato in direzione N-NNE con una maggiore inclinazione confinata nel settore sud-orientale dell’isola.

La deformazione registrata è visibile nell’odografo di Figura 2.2.2 che riassume il pattern tiltmetrico registrato dalle 3 stazioni digitali, i cui segnali sono filtrati delle periodicità inferiori a 1 giorno.

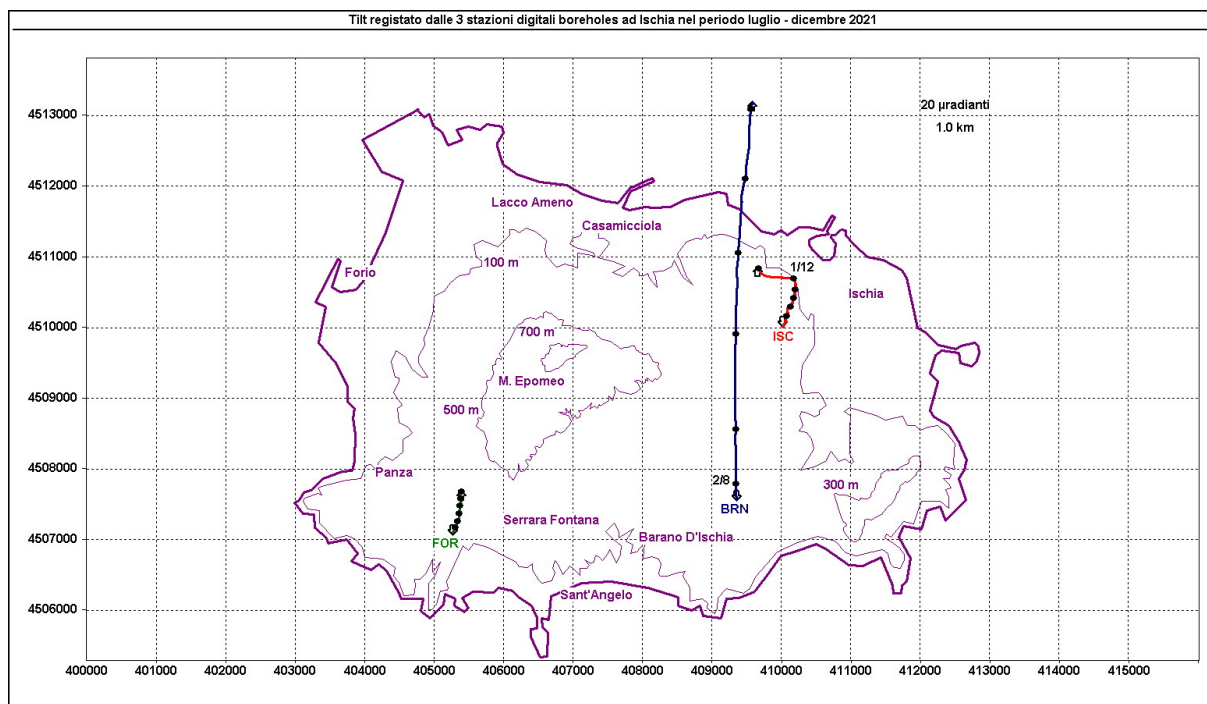


Figura 2.2.2 – Pattern tiltmetrico osservato ad Ischia nel secondo semestre 2021. Il lato di ogni maglia del reticolo equivale a 20 μ radianti o 1 km ed i pallini in colore sovrapposti sui vettori tilt indicano intervalli di un mese.

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

Nella Tabella 2.2.2 sono riportate le variazioni di inclinazione del suolo con le relative direzioni di tilting, nonché quella termica registrata a fondo pozzo (≈ -25 m dal p.c.), acquisite nel periodo considerato.

Tabella 2.2.2 - Tilt registrato e variazione termica associata relativi alle stazioni digitali durante il secondo semestre 2021.

Stazione	Inclinazione	Temperatura
Stazione FOR (157 m s.l.m.)	24.1 μ radianti a NNE-N	0.07 °C
Stazione BRN (145 m s.l.m.)	138.7 μ radianti a N-NNE	0.04 °C
Stazione ISC (173 m s.l.m.)	47.0 μ radianti a N-NNE-NW	-0.02 °C

In Figura 2.2.3 sono riassunti gli andamenti delle componenti tiltmetriche (filtrate dalle periodicità giornaliere) e termica registrate da ognuna delle 3 stazioni borehole.

L’inclinazione del suolo è prevalente sulle 3 componenti NS che indicano l’abbassamento del suolo a N dei rispettivi siti-stazione, mentre le componenti EW registrano invece variazioni minori delle omologhe NS ed oscillazioni di periodo annuale (Figure 2.2.2 e 2.2.3).

La variazione tiltmetrica osservata è mediamente conforme al pattern calcolato negli ultimi 6 anni, almeno per ciò che riguarda la sua polarizzazione in direzione N.

Dal 2 agosto si osserva a BRN un notevole incremento tiltmetrico verso N. La stessa stazione aveva già registrato dagli inizi del 2020 un’accelerazione nel tilt, culminata agli inizi di agosto in una serie di anomalie in direzione ed ampiezza che portarono il sensore fuori scala.

Nonostante la sostituzione di quest'ultimo, si è continuato e tuttora si continuano ad osservare ratei tiltmetrici alti (sulla componente NS) che sono diventati ancora maggiori dagli inizi di agosto di quest'anno. Dal mese di ottobre si osserva però una piccola diminuzione del gradiente. Alla stazione ISC, invece, si osserva una rotazione della direzione di tilting in direzione W dal 1 dicembre (Fig. 2.2.2).

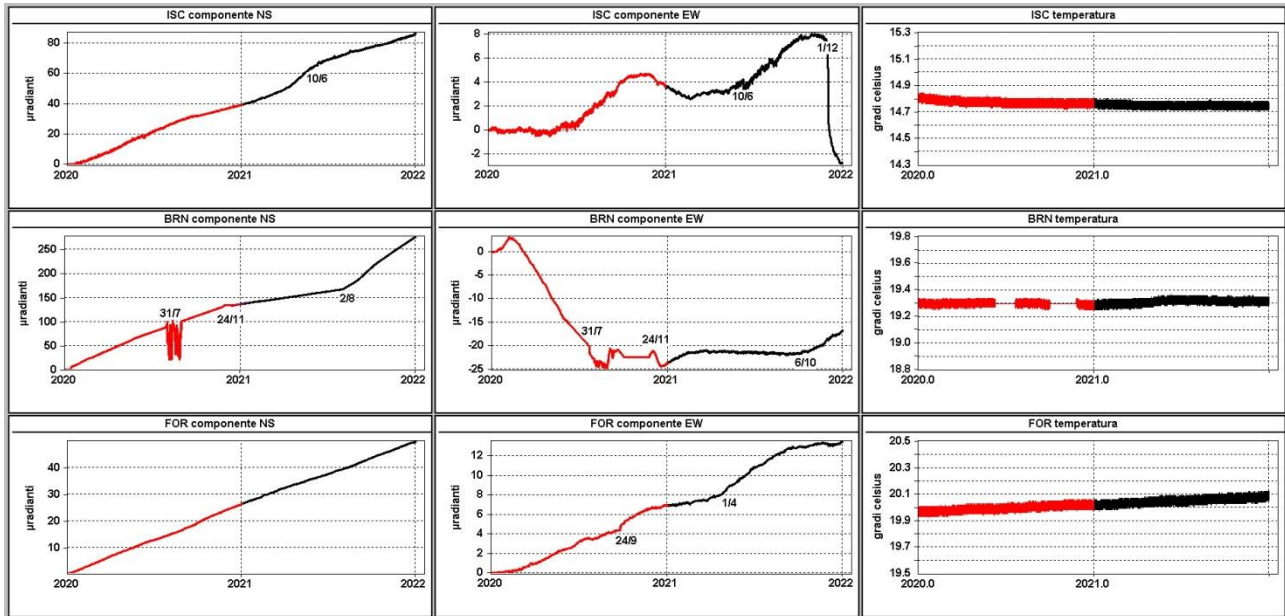


Figura 2.2.3 - Serie temporali dei segnali registrati a partire dal 2020 dalle 3 stazioni "borehole" della rete di Ischia ordinate dal basso verso l'alto secondo la latitudine. Le prime 2 colonne riportano le componenti NS ed EW in μ radianti i cui valori di tilt crescenti nel tempo indicano rispettivamente la variazione di inclinazione del suolo a N e ad E, mentre la terza colonna riporta la temperatura in $^{\circ}$ C registrata da ogni sensore. In rosso sono riportati i segnali relativi al 2020 mentre in nero sono rappresentati quelli registrati nel 2021. Le date riportate sui segnali indicano le variazioni tiltmetriche più significative osservate negli ultimi 2 anni.

2.3 Monitoraggio Satellitare con Interferometria SAR

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-B 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®. L'esportazione dell'immagine in formato *kml* su piattaforma *Google Earth* è stata effettuata per mezzo di un tool di 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.

Interferometria differenziale classica

Al fine di valutare la deformazione in atto sull'Isola d'Ischia, nel secondo semestre 2021 sono state prodotte mappe di deformazione in LoS (Line of Sight) ricavate da interferogrammi differenziali da dati acquisiti in geometria ascendente (track 117). Il periodo considerato va da giugno a dicembre 2021.

A titolo di esempio, viene riportato solo l'interferogramma differenziale in LoS relativa alla coppia 20.06.2021-05.12.2021 (Fig. 2.3.1 a), da cui è stata ricavata la mappa di deformazione del suolo in linea di vista del sensore (Fig. 2.3.1 b).

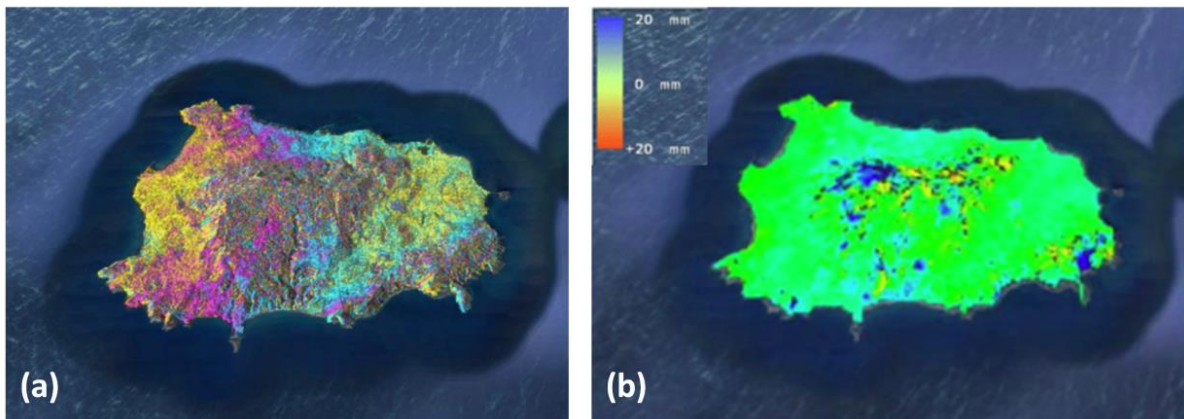


Figura 2.3.1 - Interferogramma (a) e mappa di deformazione del suolo (b) in LoS della coppia 20.06.2021-05.12.2021.

Sebbene il breve periodo temporale considerato (6 mesi), la decorrelazione che interessa parte dell'isola e la presenza di effetti legati a residui atmosferici, dall'analisi della mappa di deformazione in Figura 2.3.1b, si evidenzia nel settore nord-occidentale dell'isola la nota subsidenza che interessa l'area a ridosso del Monte Epomeo (zona Casamicciola – Fango).

Analisi multi-temporale anno 2021

Il monitoraggio interferometrico, in modalità multi-temporale dell'isola d'Ischia per l'anno 2021 (dal 03.01.2021 al 23.12.2021), è stato effettuato a partire da un dataset composto da 24 immagini in geometria ascendente (track 117) che hanno restituito una fitta rete di 236 interferogrammi avente come SuperMaster (SM) la scena del 27/05/2021 (Figura 2.3.2).

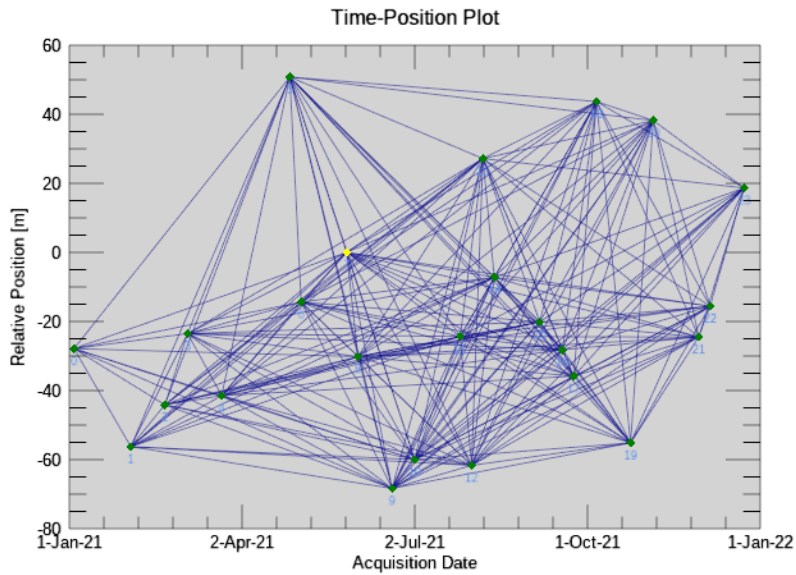


Figura 2.3.2 - Rete di interferogrammi elaborati; il punto giallo corrisponde alla scena SM.

I parametri d'interesse sono:

- Baseline temporale $B_{tmax} = 192\text{gg}$
- Baseline perpendicolare $B_{\perp max} = 118.9\text{m}$
- Modalità d'acquisizione: TOPS mode, IWS (Interferometric Wide Swath)
- Angolo di Incidenza (θ): $\sim 39^\circ$
- Fattore di multi-look: 4×1 (range x azimuth) utilizzato per ridurre lo *speckle* (rumore)

Non è stato possibile, per l'anno 2021, eseguire la scomposizione dello spostamento in LoS nelle componenti verticale ed orizzontale che, invece, era stata possibile effettuare per l'anno 2020 (Figura 2.3.3).

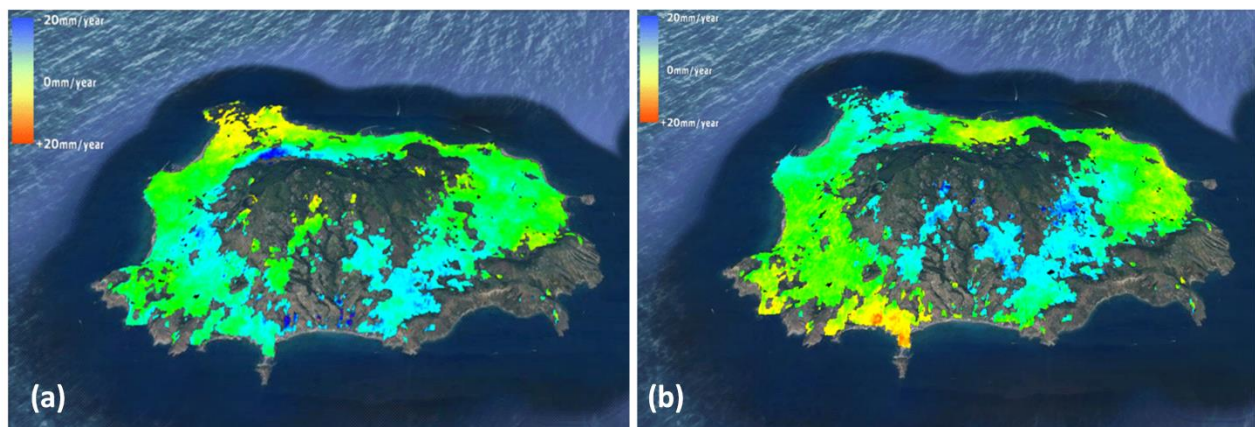


Figura 2.3.3 - Mappa 2020 (03.01.2020-03.01.2021) della componente verticale (a) ed orizzontale (b) della velocità media di deformazione del suolo, ottenute processando i dati provenienti da orbite ascendenti (track 117) e discendenti (track 22).

Per l'anno 2021 è stato possibile elaborare solo i dati provenienti dall'orbita ascendente (*track 117*) a causa della parziale indisponibilità dei dati in geometria discendente (*track 22*, Sentinel 1B). La parziale mancanza di dati è stata tale da non consentire l'uniformità dei due *dataset* (ascendente e discendente) necessaria per effettuare la scomposizione dello spostamento in LoS nelle componenti verticale e orizzontale.

Il processamento dei dati nell'intervallo 03.01.2021_23.12.2021 ha tuttavia consentito di generare la mappa della velocità media di deformazione del suolo lungo la linea di vista del sensore (LoS) e le serie temporali di deformazione cumulativa su pixel coerenti della scena (Figura 2.3.4).

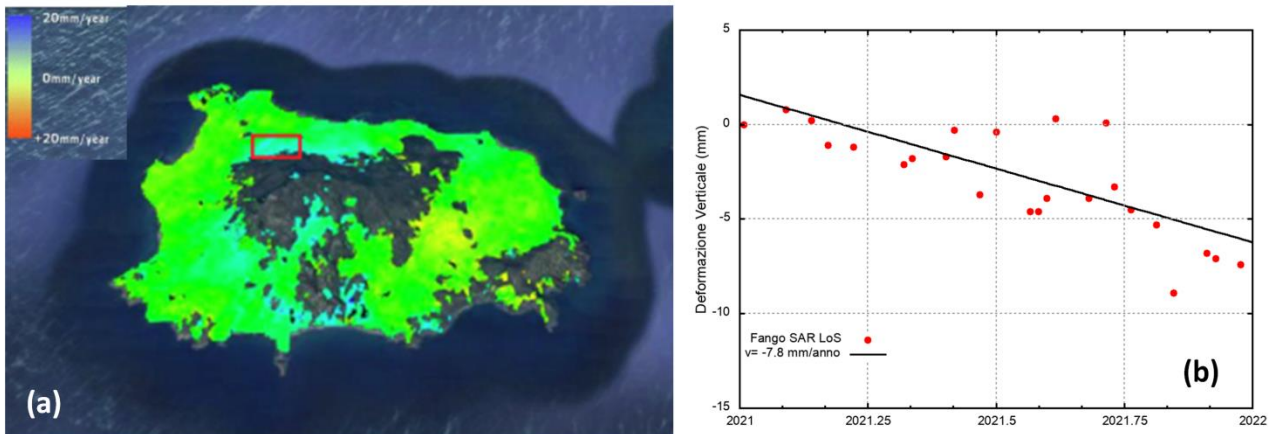


Figura 2.3.4 - Mappa 2021 (03.01.2021_23.12.2021) della velocità media di deformazione (a) e serie temporale (b) in LoS di un pixel coerente nell'area di Fango (riquadro rosso in Figura 2.3.4a).

Dall'analisi della mappa della velocità media della deformazione in LoS per il 2021 in Figura 2.3.4a si conferma la generale subsidenza che interessa l'isola sia nel settore nord-occidentale, a ridosso del Monte Epomeo, che nel settore centro-meridionale. La serie temporale (Figura 2.3.4b), estratta per un pixel coerente nell'area di Casamicciola – Fango, mostra valori della velocità di deformazione in LoS di circa 8 mm/anno, in accordo con i risultati degli anni precedenti e i valori riportati in letteratura.

3 - MONITORAGGIO VULCANOLOGICO

Monitoraggio Termico con Termocamera Mobile e Termocoppia

E. Marotta¹, R. Avino¹, P. Belviso¹, A. Carandente¹, R. Nave¹, 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 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.

Dal mese di 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.

Ubicazione dei punti di misura ad Ischia

I rilievi termici a Ischia in genere sono effettuati in nove punti stazione ubicati in diversi contesti strutturali (Figura 3.1a-h).

Nel primo semestre 2021, in generale, non ci sono significative variazioni di temperatura massima e modificazioni nella distribuzione areale del campo fumarolico nei diversi punti di misura.

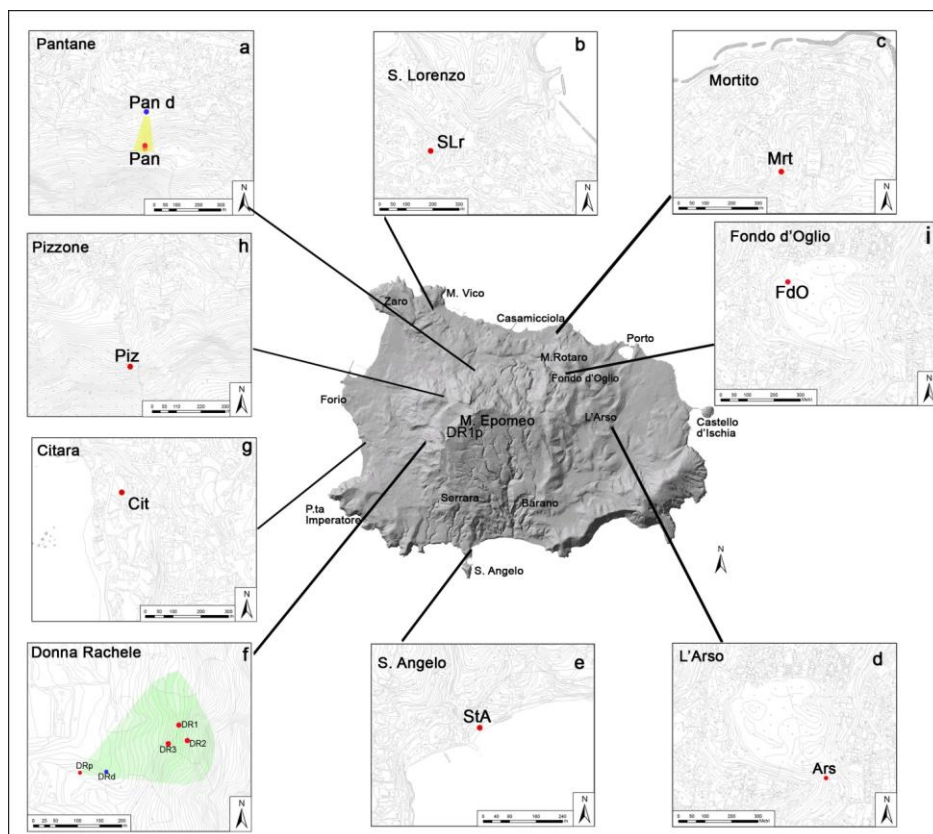


Figura 3.1 – Ubicazione dei punti di misura a Ischia.

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 secondo semestre 2021, non evidenzia significative variazioni nella distribuzione areale del campo fumarolico (Fig. 3.2 b, c, d) anche rispetto al semestre precedente.

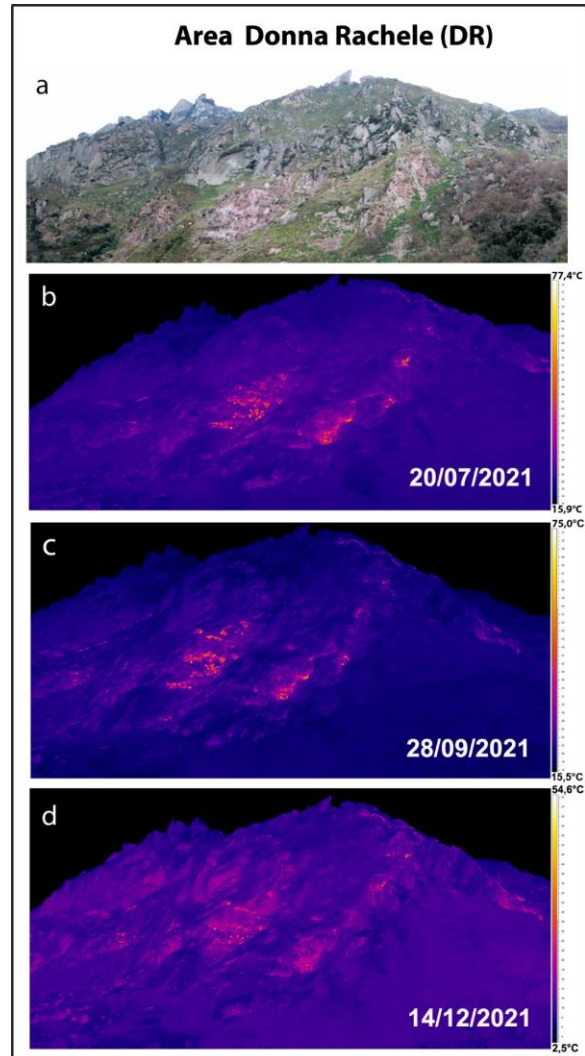


Figura 3.2 - Versante in località Donna Rachele a Ischia. Fotocomposizioni di immagini nel visibile (a) e delle corrispondenti immagini termiche relative al 20/07/2021 (b), 28/09/2021 (c) e 14/12/2021 (d) dal punto stazione DRp di Figura 3.1.

S. Angelo

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

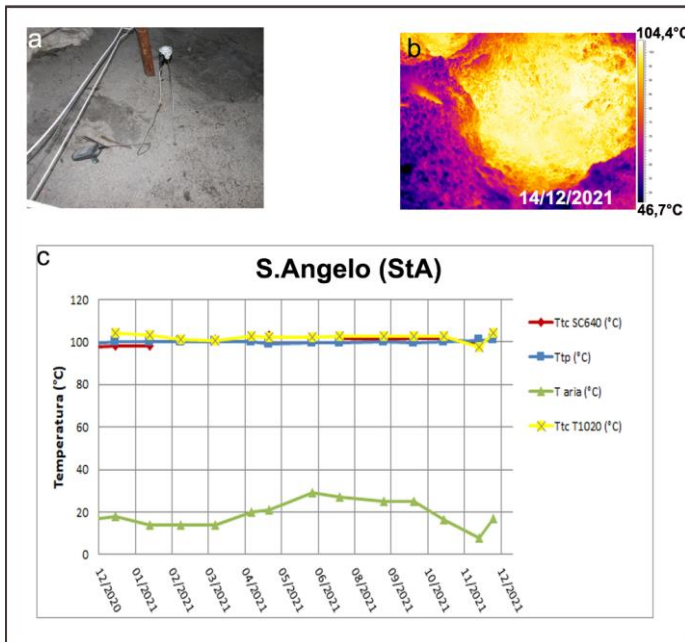
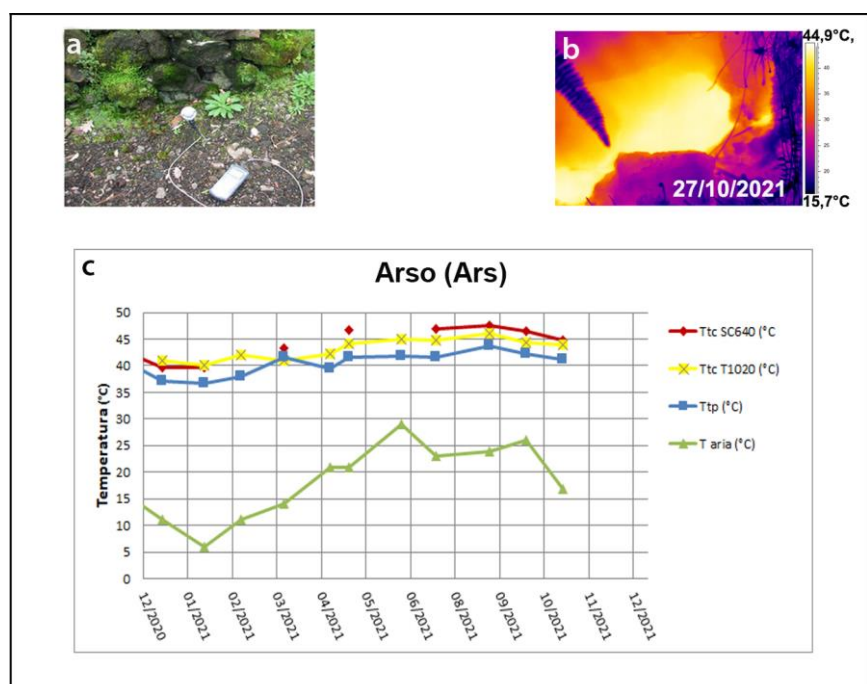


Figura 3.3 – Fumarola in località S. Angelo a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione StA di Figura 3.1e. Valori massimi di temperatura con termocamera FLIR SC640 (TtcSC640), valori massimi di temperatura con termocamera FLIR T1020 (TtcT1020) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell’aria (Taria) misurata nel momento del rilievo termico, da dicembre 2020 a dicembre 2021 (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 mostrano 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 SC640 (TtcSC640), 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 dicembre 2020 a dicembre 2021 (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 mostrano sono piuttosto stabili, confermando l'andamento dei mesi precedenti, a meno delle variazioni stagionali (Figura 3.5c).

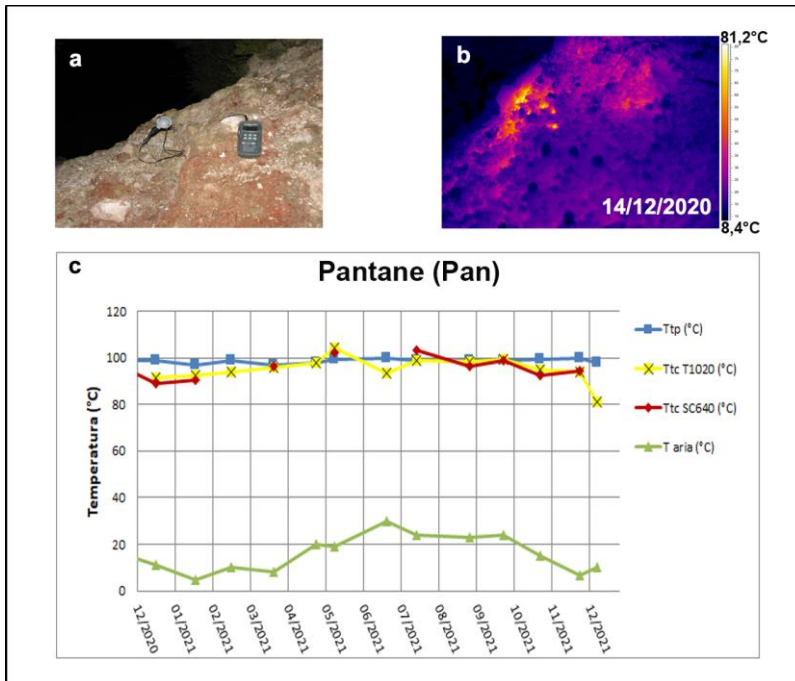
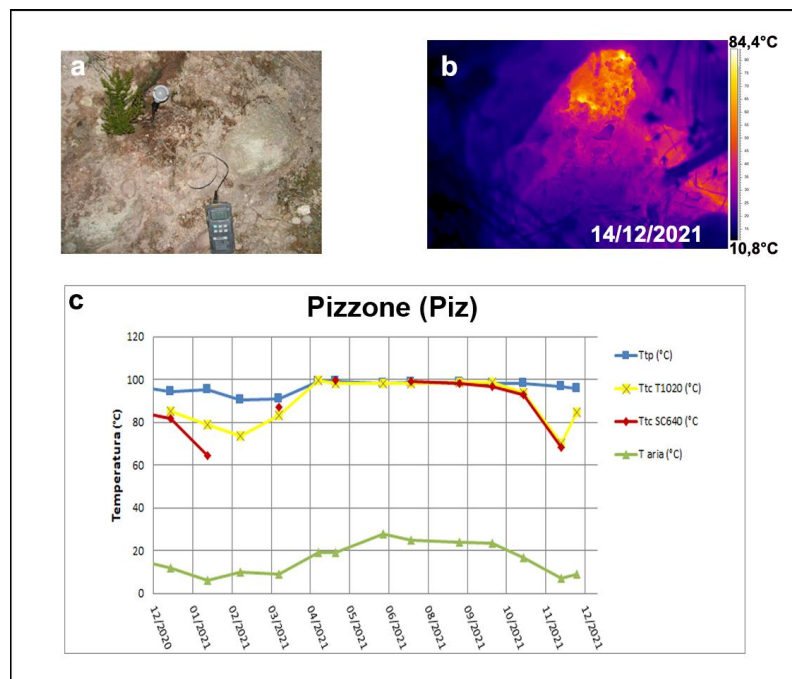


Figura 3.5 – Fumarola in località Pantane a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto di misura Pan di Fig. 3.1a. Valori massimi di temperatura con termocamera FLIR SC640 (TtcSC640), valori massimi di temperatura con termocamera FLIR T1020 (TtcT1020) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell'aria (Taria) misurata nel momento del rilievo termico, da dicembre 2020 a dicembre 2021 (c).

Pizzone

In località Pizzone, a nord-ovest del Monte Epomeo (Figura 3.1h), i valori di temperatura massima misurati con termocamera e i valori di temperatura misurati con termocoppia rigida mostrano sono piuttosto stabili, confermando l'andamento dei mesi precedenti, a meno delle variazioni stagionali (Figura 3.6c).

Figura 3.6 – 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 SC640 (TtcSC640), 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 dicembre 2020 a dicembre 2021 (c).



S. Lorenzo

In località S. Lorenzo, nel settore nord-occidentale di Ischia (Figura 3.1b), i valori di temperatura massima misurati con termocamera e i valori di temperatura misurati con termocoppia rigida mostrano sono piuttosto stabili, confermando l'andamento dei mesi precedenti, a meno delle variazioni stagionali (Figura 3.7c).

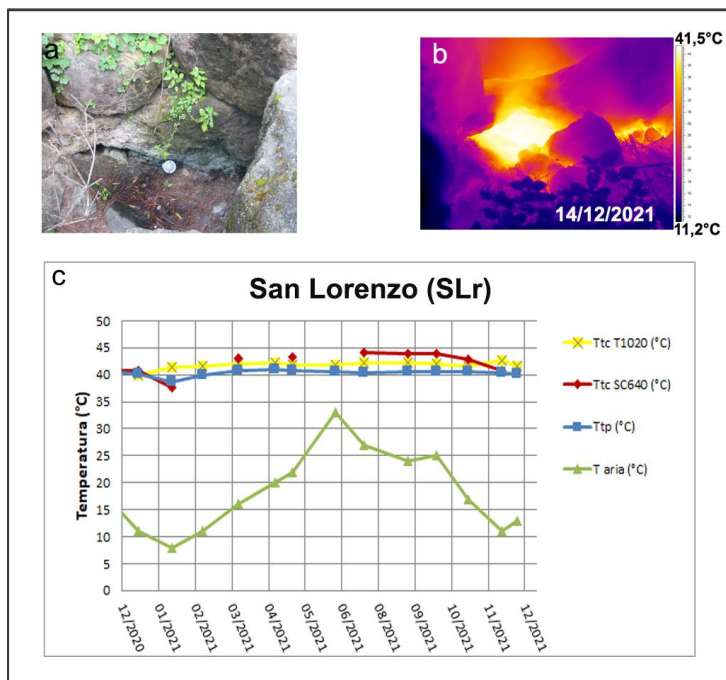
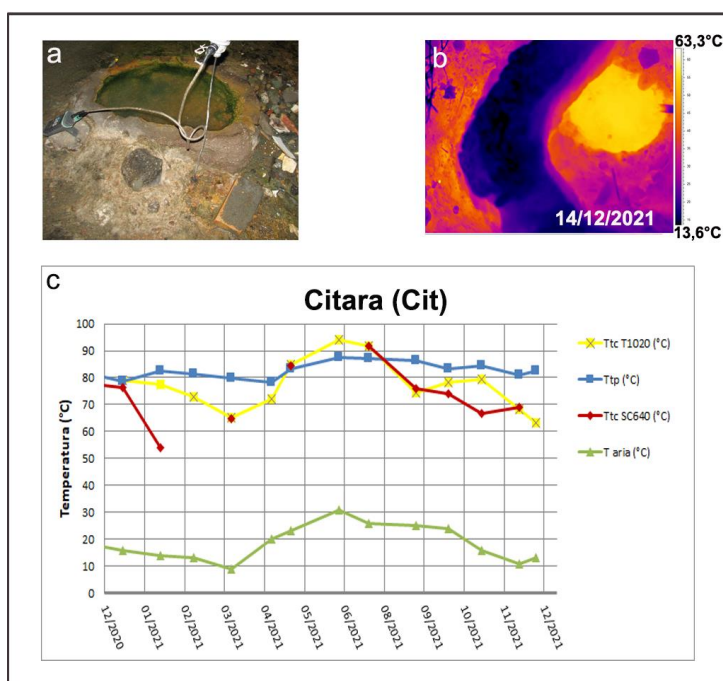


Figura 3.7 – Fumarola in località S. Lorenzo a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto di stazione SLr di Fig. 3.1b. Valori massimi di temperatura con termocamera FLIR SC640 (TtcSC640), valori massimi di temperatura con termocamera FLIR T1020 (TtcT1020) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell'aria (Taria) misurata nel momento del rilievo termico, da dicembre 2020 a dicembre 2021 (c).

Citara

In località Citara, nel settore occidentale di Ischia (Figura 3.1g), 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 3.8c).

Figura 3.8 – 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 con termocamera FLIR SC640 (TtcSC640), 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 dicembre 2020 a dicembre 2021 (c).



Fondo d’Oglio

In località Fondo d’Oglio, nel settore nord orientale di Ischia (Figura 3.1i), 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 3.9c).

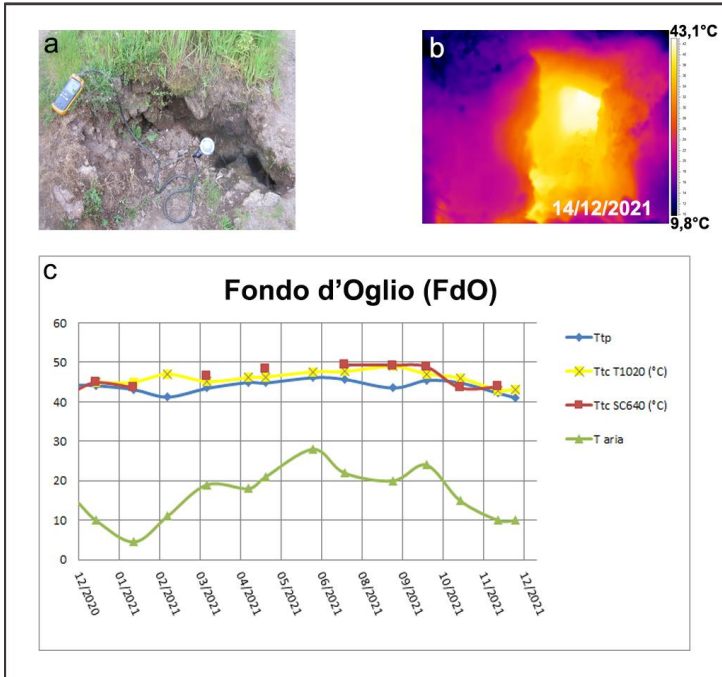


Figura 3.9 – Fumarola in località Fondo d’Oglio a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione FdO di Fig. 3.1i. Valori massimi di temperatura con termocamera FLIR SC640 (TtcSC640), valori massimi di temperatura con termocamera FLIR T1020 (TtcT1020) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell’aria (Taria) misurata nel momento del rilievo termico, da dicembre 2020 a dicembre 2021 (c).

4 - MONITORAGGIO GEOCHIMICO

Le attività di sorveglianza geochimica all'Isola d'Ischia nell'ambito della Convenzione INGV – DPC sono di competenza della Sezione INGV di Palermo, integrate da attività fuori Convenzione svolte dall'Osservatorio Vesuviano.

4.1 Monitoraggio Geochimico della Sezione di Palermo

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

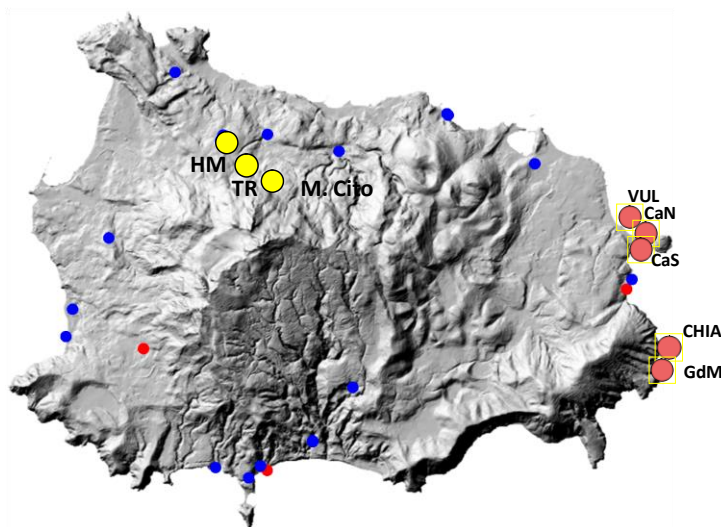
¹ INGV – Sezione di Palermo

Le attività di sorveglianza geochimica dell'isola d'Ischia svolte dalla Sezione di Palermo sono consistite in misure e campionamenti periodici di campioni di acque termali e di gas liberi. Lo studio delle variazioni chimico-fisiche dei gas e delle acque fornisce importanti indicazioni sulla circolazione dei fluidi e sulle dinamiche del sistema geotermico.

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 caratteristiche chimico-fisiche dei campioni prelevati permettono di ricavare indicazioni sullo stato del sistema geotermico dell'isola.

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



Ischia ospita un sistema idrotermale interposto tra la sorgente magmatica e le falde superficiali, che modula il trasferimento di fluidi (e di calore) profondi verso la superficie. Il sistema è composto da (almeno tre) *reservoir* sovrapposti e probabilmente interagenti tra loro, con temperature stimate tra 150 e 300°C e profondità comprese tra 150 e 1000 m (Di Napoli et al., 2009, 2011). I *reservoir* più superficiali (150-300 m sotto il livello del mare), con temperature stimate di 150-200 °C alimentano i settori di Serrara Fontana e Citara. Il più profondo (> -1000 m slm) con T di 270°C e bassa salinità, alimenta il settore di Casamicciola. Le variazioni composizionali delle manifestazioni delle acque termali sono il risultato del mixing tra (almeno) 5 *endmember*: acqua meteorica, acqua marina, gli *endmember* idrotermali di Casamicciola e Serrara di origine meteorica e l'*endmember* idrotermale di Citara. La composizione delle acque sotterranee è determinata dal mescolamento in varie proporzioni tra due o più *endmember*.

La composizione isotopica di C della CO₂ (tra 0 ‰ e -3.0 ‰) e dell’He (~3.5 R/Ra) nei fluidi campionati testimoniano l’interazione fra fluidi magmatici, geotermici e i sistemi idrici superficiali. Nel secondo semestre 2021, a novembre, è stato eseguito il campionamento delle acque termali e dei gas fumarolici e gorgoglianti appartenenti alla rete geochimica di monitoraggio. In ogni campione sono stati determinati: per le acque la composizione chimica (elementi maggiori e minori) e la composizione isotopica δD 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 parametri chimico-fisici delle acque (pH, EC, T, Eh) e le temperature dei gas fumarolici sono stati misurati sul campo.

I dati acquisiti mostrano variazioni che ricadono nei *range* delle oscillazioni stagionali e sono riconducibili a processi di mixing fra una componente profonda, acque marine e meteoriche, nonché a fenomeni di interazione con rocce. L’entità delle variazioni non è sostanzialmente variata nell’ultimo decennio (Fig. 4.1.2 b, c), indicando una sostanziale stabilità delle condizioni dei *reservoir* geotermali.

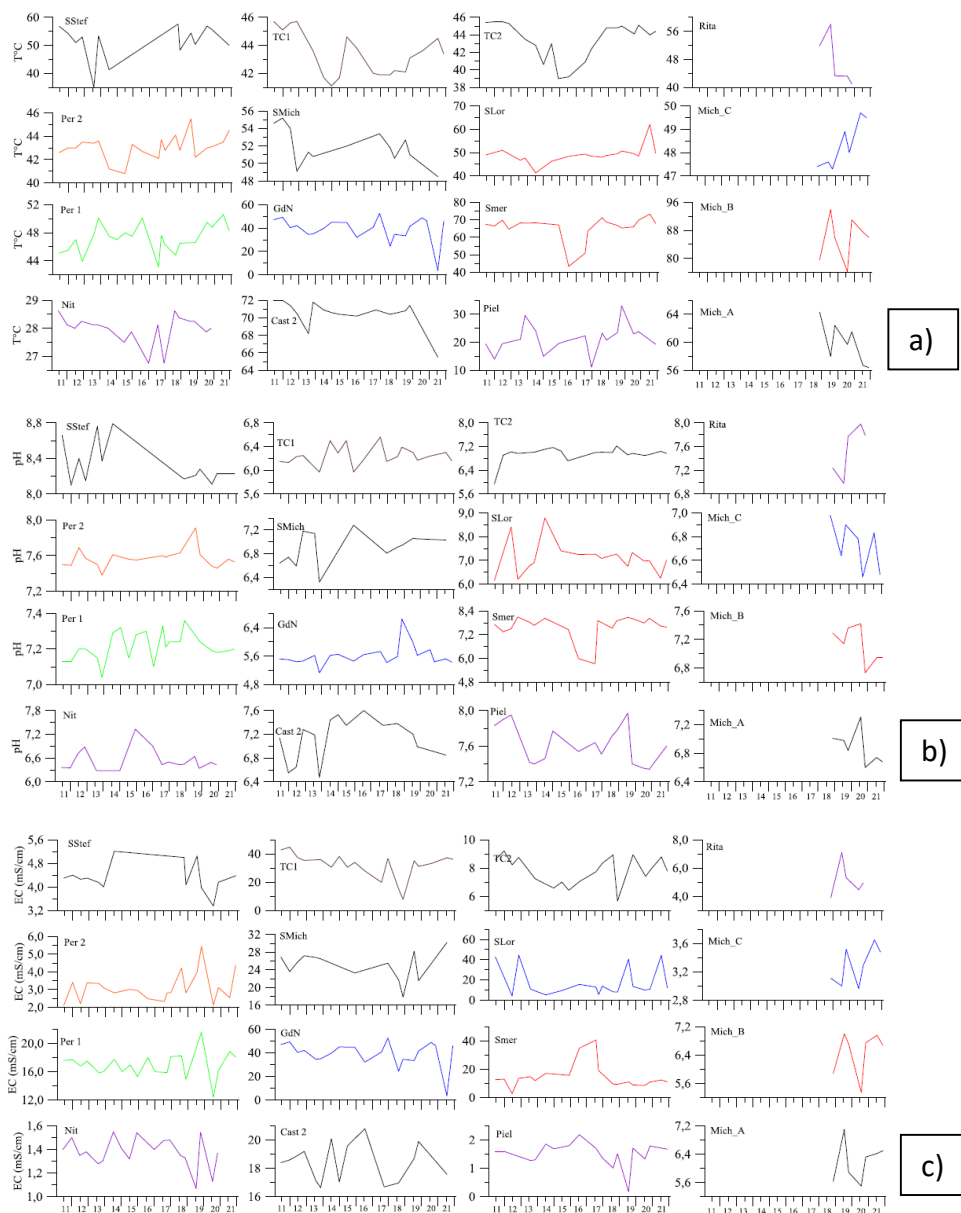


Figura 4.1.2 – Variazioni temporali di temperatura (°C), conducibilità (mS/cm²) e pH delle acque campionate dal 2011 a oggi.

Anche le concentrazioni di alcalinità totale (HCO_3^- e CO_3^{2-} , Fig. 4.1.3) e la PCO_2 calcolata (Fig. 4.1.4) che rappresenta l'interazione tra la CO_2 magmatica e la falda, non presentano variazioni significative.

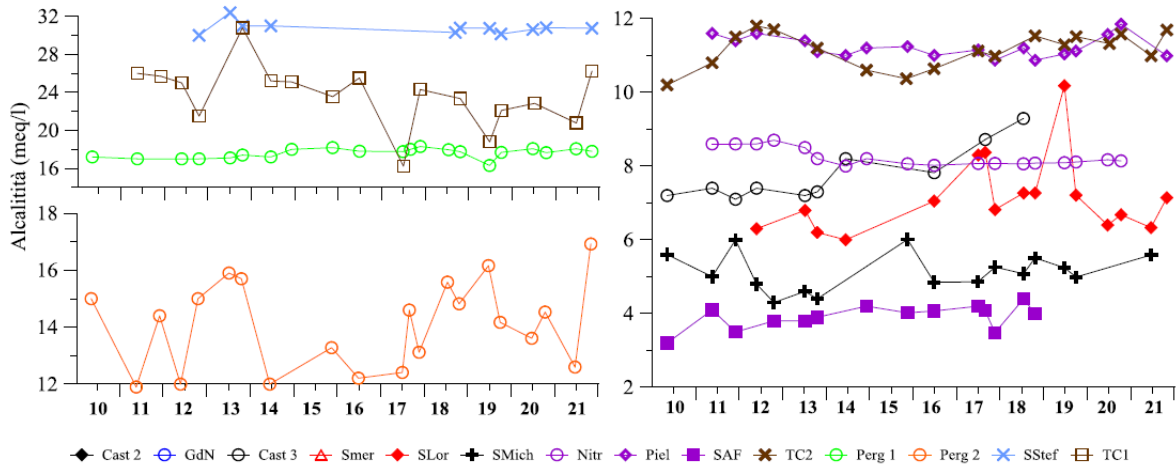


Figura 4.1.3 - Variazione temporale dell'alcalinità totale (meq/l) nelle acque campionate dal 2013 ad oggi.

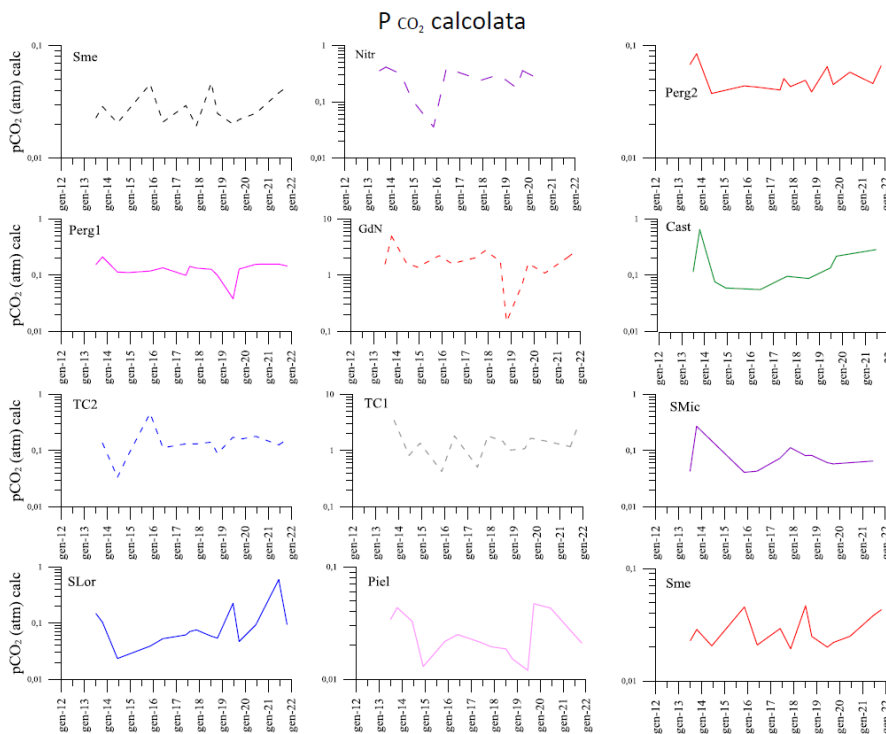


Figura 4.1.4 - Variazione temporale della PCO_2 (atm) nelle acque campionate dal 2013 ad oggi.

Valutazioni geotermometriche effettuate sui campioni prelevati (sia gas che acque) non hanno evidenziato variazioni di rilievo nel tempo testimoniando la stabilità del sistema vulcanico e geotermico (Fig. 4.1.5).

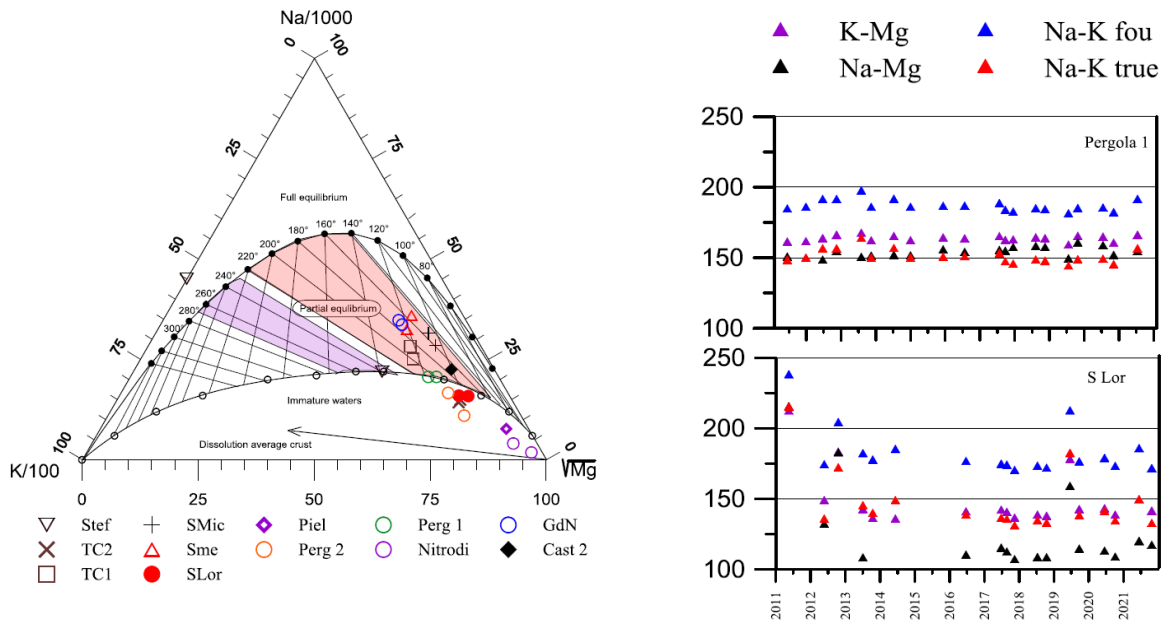


Figura 4.1.5 - Geotermometri in fase liquida. A destra la variazione temporale delle temperature calcolate con diversi geotermometri nei campioni di Pergola 1 e San Lorenzo.

I dati acquisiti nel secondo semestre del 2021 non hanno mostrato variazioni rilevanti ricollegabili a variazioni dell'attività vulcanica. La stabilità nella composizione chimica dei fluidi campionati riflette la stabilità del sistema geotermico.

4.2 Attività fuori Convenzione – Osservatorio Vesuviano

Studio e monitoraggio dell'area fumarolizzata di Mt. Cito.

S. Caliro¹, R. Avino¹, E. Bagnato¹, A. Carandente¹, E. Cuoco¹, C. Minopoli¹, A. Santi¹

¹ INGV Osservatorio Vesuviano

Durante il 2021, da parte dell'Osservatorio Vesuviano, 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 dell'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 $T > 300$ °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). Nel diagramma geotermometrico di Figura 4.2.1, (per la cui interpretazione si rimanda ai lavori di Chiodini e Marini (1998) e Chiodini et al., 2004) sono riportate le composizioni chimiche dei campioni prelevati dopo gli eventi sismici dell'agosto 2017 insieme alle composizioni disponibili delle fumarole di "Donna Rachele".

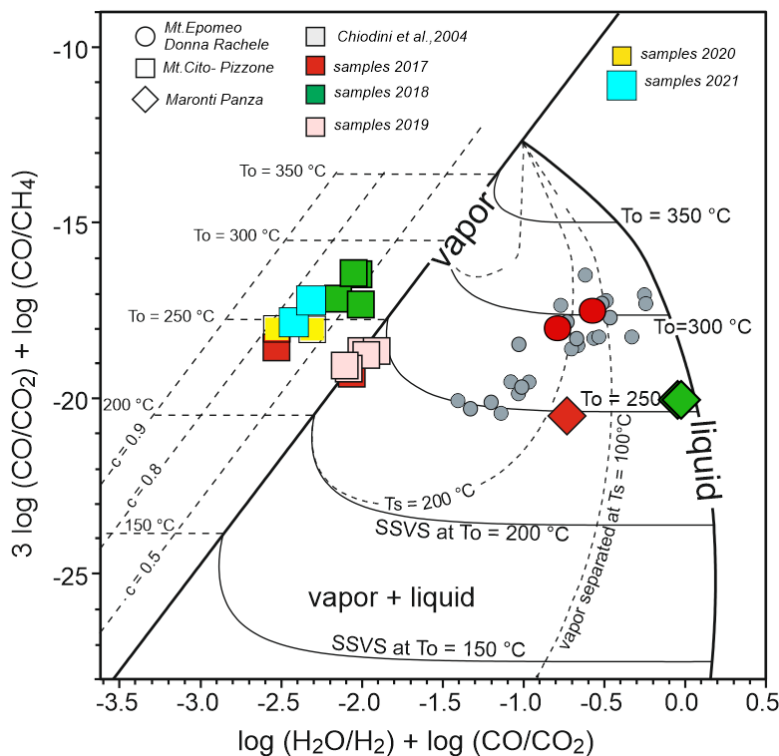


Figura 4.2.1 - Diagramma di equilibrio $3\text{Log} (X_{CO}/X_{CO_2}) + \text{Log} (X_{CO}/X_{CH_4})$ vs $\text{Log} (X_{H_2O}/X_{H_2}) + \text{Log} (X_{CO}/X_{CO_2})$ nel sistema H-C-O. Nel diagramma sono riportati i valori teorici di una fase di vapore satura (linea di vapore) e di una fase liquida 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.

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 2021 sono risultati significativamente frazionati (condensati); comunque, le informazioni suggerite dalla composizione chimica sono di condizioni di equilibrio simili a quelle stimate per i campioni del settembre 2017 e del 2020.

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 dell'agosto 2017 e riconducibili a variazioni dell'attività di degassamento, si è proceduto 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 misura della 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. La stazione, visti i problemi di funzionamento, andrà riprogettata e ingegnerizzata.

Le temperature registrate localmente con frequenza oraria nel 2021 hanno mostrato ripetute oscillazione, 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).

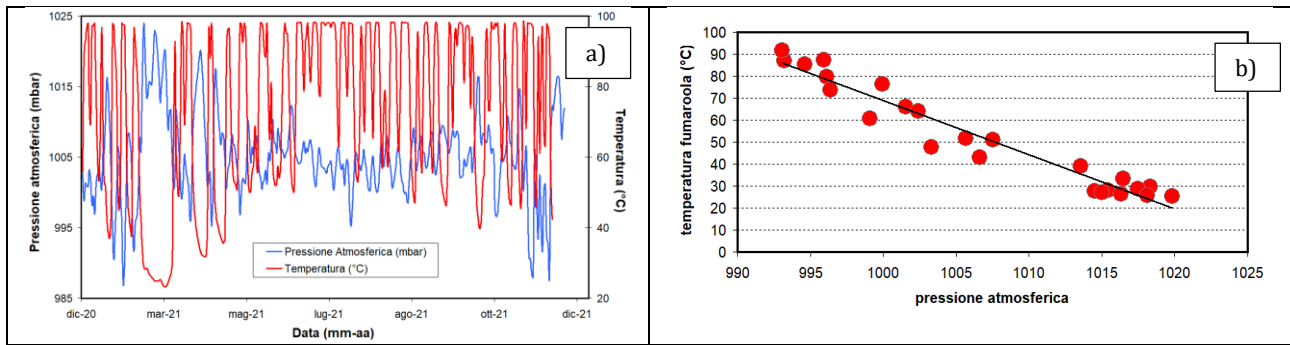


Figura 4.2.3 - a) Valori di temperatura dell’emissione fumarolica di Mt.Cito (Pizzone) e della pressione atmosferica misurati in continuo. La buona correlazione inversa dei due parametri è osservabile nel diagramma (b).

Alla luce del comportamento rilevato, le segnalazioni effettuate in concomitanza degli eventi sismici dell’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. E’ 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.

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 simiche regionali e locali in regime di convenzione con il Dipartimento della Protezione Civile.

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

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

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

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

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

