



ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

RAPPORTO DI SINTESI PRELIMINARE SUL TERREMOTO DELL'ISOLA D'ISCHIA (CASAMICCIOLA) M4.0 DEL 21 AGOSTO 2017

Gruppo di Lavoro INGV

6 settembre 2017

21 agosto 2017

**IL TERREMOTO
di ISCHIA**





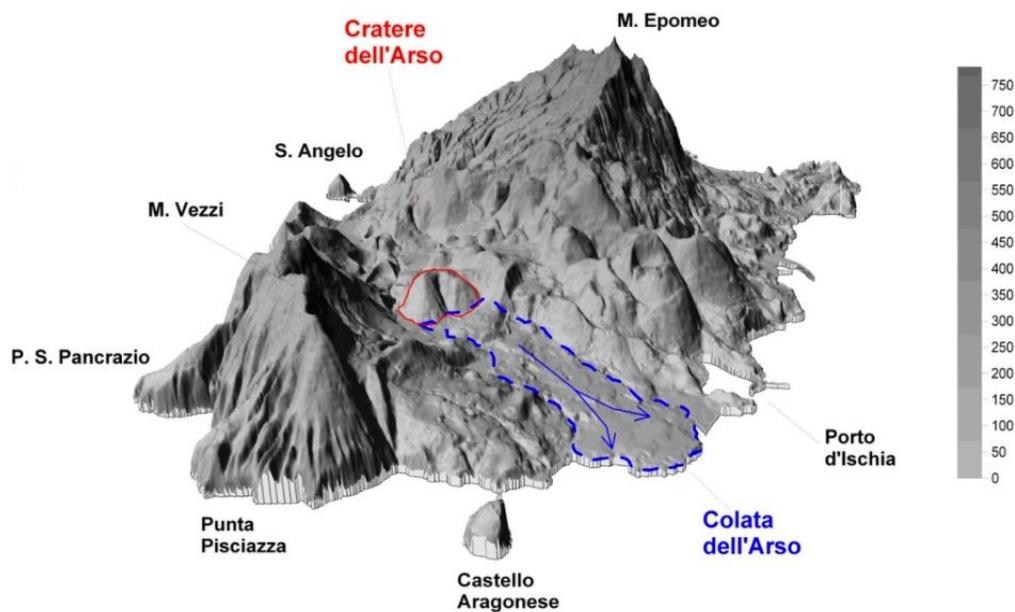
INDICE

Riassunto	5
1. Storia eruttiva e sismica	7
1.1 Inquadramento geologico e storia eruttiva	7
1.2 Sismicità storica dell'isola d'Ischia	17
1.2.1 Il grande terremoto del 28 luglio 1883	21
1.3 Sismicità recente dell'isola d'Ischia	25
1.4 Sorgenti sismogenetiche	27
1.5 Profondità della transizione fragile-duttile	30
2. Le reti di monitoraggio INGV	32
3. Caratterizzazione dell'evento del 21 agosto 2017	40
3.1 Localizzazione dell'evento e calcolo della magnitudo	40
3.2 Momento tensore e magnitudo momento	49
3.3 Accelerazioni del suolo	53
3.3.1 Effetti di sito	53
3.3.2 Shakemaps	56
3.4 Geodesia	61
3.4.1 Dati GPS	61
3.4.2 Dati SAR	64
3.5 Rilievi geologici	78
3.6 Rilievo macrosismico	85
3.7 Rilievi geochimici	89
4. Sintesi preliminare	96
Bibliografia citata e altre pubblicazioni pertinenti	98



Riassunto

Il 21 agosto 2017 alle ore 20:57 (ora italiana) un terremoto di $M_L 3.6 \pm 0.2$, $M_D 4.0 \pm 0.3$ ha colpito l'isola d'Ischia. Il calcolo della magnitudo momento ha preliminarmente fornito valori tra 3.8 e 4.0. L'isola è la parte emersa di un apparato vulcanico che insieme ai Campi Flegrei e all'isola di Procida costituisce il "Distretto Vulcanico Flegreo". Le rocce vulcaniche presenti sull'isola sono il prodotto di eruzioni sia effusive che esplosive, anche di grande intensità, avvenute dalla sua formazione. L'ultimo periodo di attività è iniziato circa 10.000 anni fa ed è proseguito in epoca storica con una serie di eruzioni, l'ultima delle quali è avvenuta nel 1302 d.C. (colata lavica dell'Arso, vedi figura).



L'ipocentro del terremoto è stato localizzato in prossimità del comune di Casamicciola Terme a bassa profondità (latitudine 40.74°, longitudine 13.90°, profondità di circa 2 km). L'INGV è arrivato a questa localizzazione dopo numerose elaborazioni che hanno considerato tutti i dati delle reti di monitoraggio che man mano si rendevano disponibili nonché modelli di velocità crostale resi via via più dettagliati e accurati per l'isola d'Ischia, caratterizzata da un alto flusso di calore (150-200 mW/m²) che pone la transizione fragile-duttile a una profondità inferiore ai 5 km. L'iterazione nei calcoli della localizzazione dell'evento sono stati ampiamente al di sotto dell'incertezza insita nei dati a disposizione della rete sismica nazionale (5-10 km in orizzontale e 5-10 km in verticale), dovuta all'assenza di stazioni sismiche in tutto l'areale tirrenico a ovest. Il meccanismo focale non è ben vincolato per la bassa qualità del segnale sismico e la forte attenuazione in area epicentrale. L'area epicentrale interessata dal danneggiamento è risultata confinata nella porzione centro-settentrionale dell'isola, che è stata interessata da uno scuotimento con accelerazioni del suolo nell'ordine di 0,27 g. Questi valori così elevati sono stati certamente

causati dalla superficialità dell'ipocentro ma anche dall'effetto della geologia di superficie che ha giocato un ruolo fondamentale nell'amplificazione delle onde al passaggio in terreni con velocità sismiche basse.

L'area centro-nord dell'isola è stata inoltre quella interessata dalle deformazioni superficiali maggiori con un abbassamento del suolo fino a 3.6-4 cm come evidenziato dal dato SAR.

I vari modelli elaborati indicano una rottura su un piano $N85^{\circ}\pm 10$ immergente a nord ipoteticamente circa 70° , con dominante componente estensionale. Lo slip ipocentrale è stimabile in circa 10-15 cm.

A seguito della scossa principale sono stati registrati alcune decine di eventi di entità molto piccola (con magnitudo minore o uguale a 1.0) ed un unico evento di $M_p=1.9$ avvenuto il 23 agosto alle 05:04 (ora italiana).

Secondo il catalogo sismico CPTI15 (Rovida et al., 2016 <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>, aggiornato al 2015) il terremoto locale più forte e distruttivo avvenne nel 1883 e devastò il centro di Casamicciola Terme.

In questo primo rapporto di sintesi vengono brevemente illustrate le principali attività, ed i relativi risultati, svolte dall'Istituto nei primi giorni dopo l'evento. Tutte le analisi qui descritte sono ancora in corso per cui devono considerarsi come preliminari e soggette a futuri affinamenti e integrazioni.

1. Storia eruttiva e sismica

1.1 Inquadramento geologico e storia eruttiva

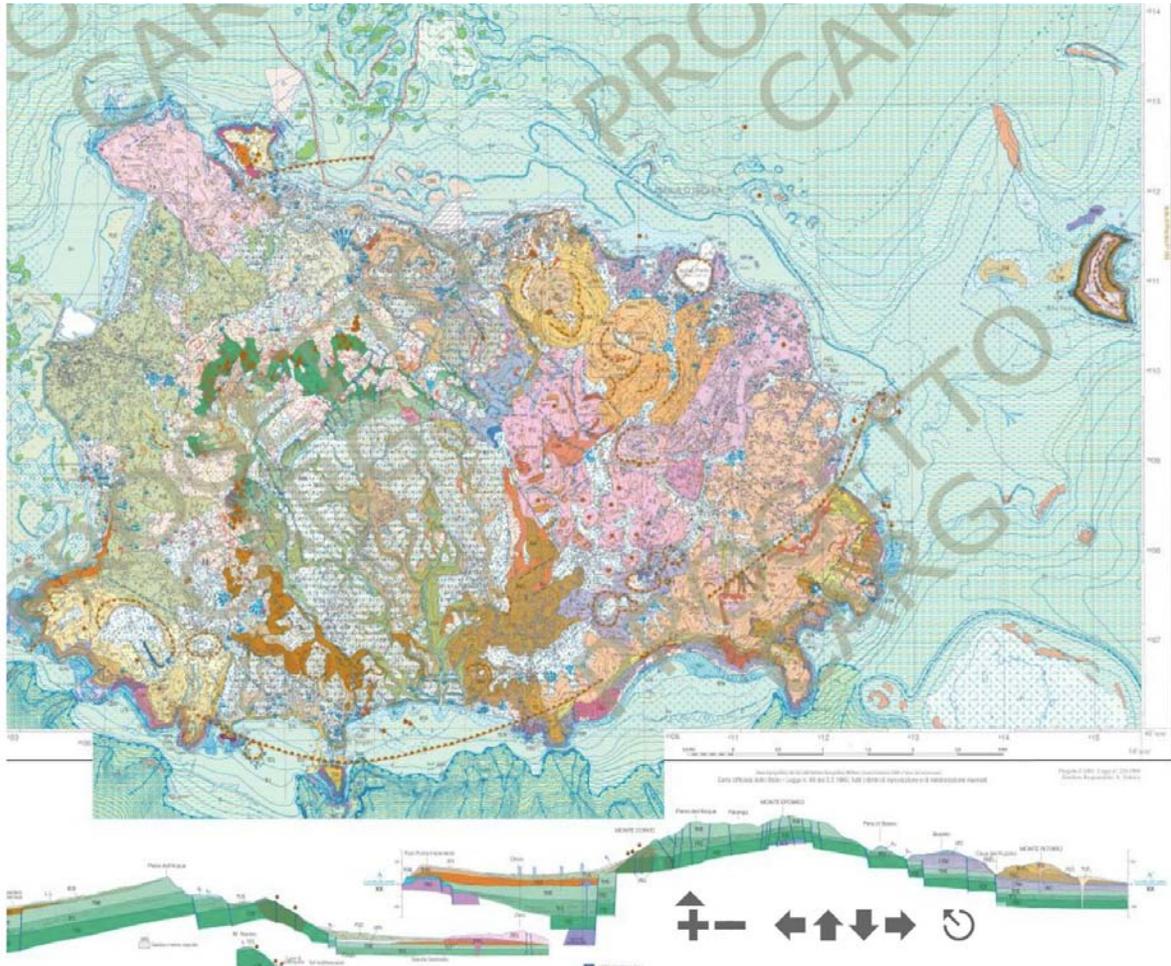


Figura 1.1-1. Carta geologica e profili dell'Isola d'Ischia dal progetto CARG. L'isola è la parte sommitale di un apparato vulcanico sviluppatosi negli ultimi 150.000 anni e tuttora attivo. Sono mappate numerose faglie normali, coerentemente con la sismicità estensionale del 21 agosto 2017. Vi sono numerose frane sui fianchi sia emersi che sommersi, come evidente dalla batimetria del fondo mare immediatamente a nord di Casamicciola.

http://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/464_ISOLA_DISCHIA/Foglio.html

L'isola d'Ischia è la parte emersa di un esteso apparato vulcanico, che si erge per oltre 1.000 m dal fondo del mare, nel settore nord-occidentale del Golfo di Napoli (Bruno et al., 2002).

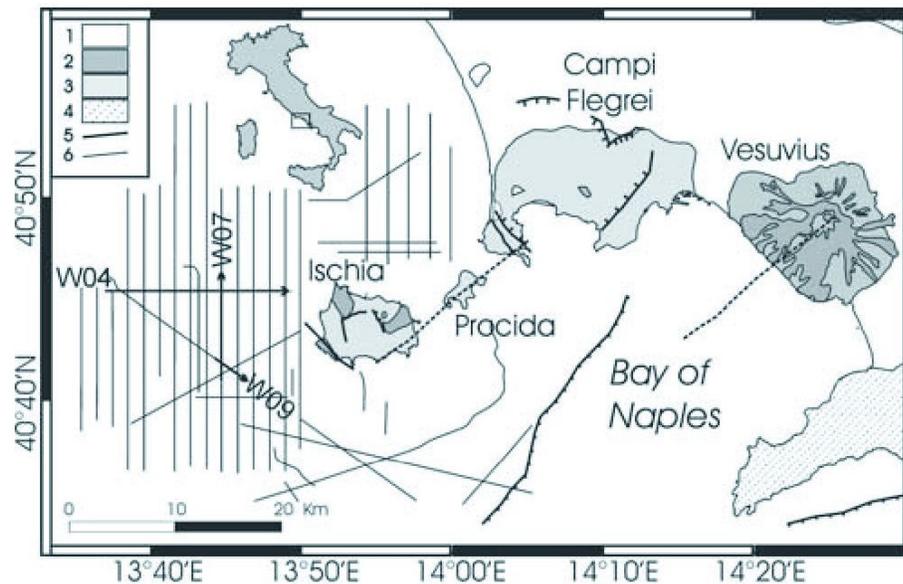


Figura 1.1-2. Schema strutturale semplificato delle aree di vulcanismo attivo del Golfo di Napoli e localizzazione delle linee di sismica a riflessione acquisite a nord e a ovest dell'isola di Ischia durante la crociera GMS00-05, svolta nell'ottobre 2000 dalla nave oceanografica Urania (Bruno et al., 2002).

Unitamente alla caldera dei Campi Flegrei e all'isola di Procida, Ischia costituisce il cosiddetto Distretto Vulcanico Flegreo (Orsi et al., 1996a; 2003). La genesi e la risalita dei magmi in questo distretto, e più in generale nell'intera area vulcanica campana, è da mettersi in relazione ai processi tettonici estensionali Plio-Quaternari che hanno determinato la formazione del graben della Piana Campana, lungo il margine tirrenico della catena appenninica (Ippolito et al., 1973; D'Argenio et al., 1973; Finetti e Morelli, 1974; Bartole, 1984; Piochi et al., 2005; de Vita e Marotta, 2007). Nel corso di tali processi, la formazione di faglie dirette ad andamento NW-SE e di faglie di trasferimento da dirette a trascorrenti, ad andamento NE-SW, ha determinato lo smembramento del graben in una serie di blocchi e la conseguente risalita dei magmi attraverso la crosta (Carrara et al., 1973; 1974; Finetti e Morelli, 1974; Funicello et al., 1976; Agip, 1984; Mariani e Prato, 1988; Faccenna et al., 1994).

La struttura a grande scala dell'isola di Ischia è ben descritta da una serie di profili di sismica a riflessione ottenuti come risultato di una crociera oceanografica svolta nell'ottobre 2000 dalla nave Urania. La Fig. 1.1-2 mostra la localizzazione dei profili, mentre le Fig. 1.1-3 e 1.1-4 mostrano rispettivamente un profilo N-S e un profilo NW-SE eseguiti qualche chilometro a largo dell'isola.

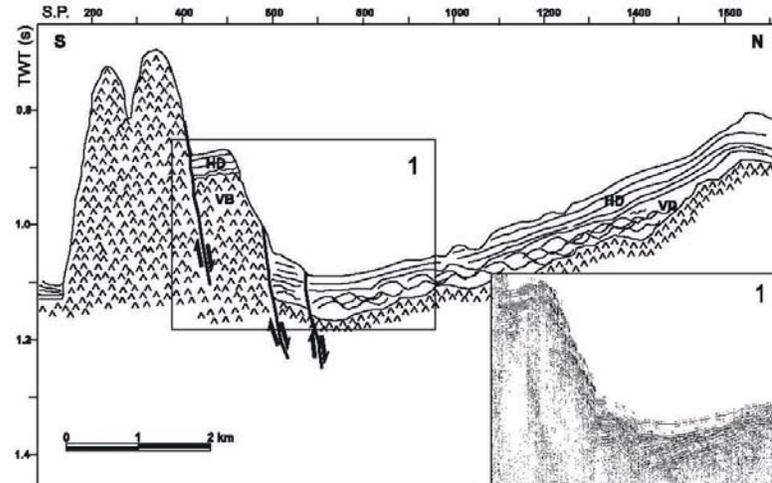


Figura 1.1-3. Interpretazione di una linea sismica N-S (indicata come W07 in Fig. 1.1-2) acquisita circa 10 km a ovest di Ischia (da Bruno et al., 2002). La linea mostra apparati vulcanici minori sommersi dissecati da scarpate di faglia che interessano depositi marini e vulcanoclastici recenti.

L'isola d'Ischia copre un'area di circa 46 km² e, da un punto di vista morfologico, è dominata dal rilievo centrale del M. Epomeo (787 m s.l.m.) e dall'allineamento NE-SW delle cime di M. Vezzi, M. Barano e M. Cotto, nel settore sud-orientale (Fig. 1.1-1). La costa dell'isola è caratterizzata, a sud, da versanti a picco sul mare, intercalati a promontori, e da versanti che degradano dolcemente verso il mare, con subordinati tratti a falesia, per la restante parte. I profili sismici a mare evidenziano una tettonica che disloca tramite faglie a componente estensionale l'apparato vulcanico e la copertura sedimentaria adiacente (Fig. 1.1-4; 1.1-6). Le anomalie magnetiche aiutano inoltre a localizzare la distribuzione dei corpi magmatici più importanti (Fig. 1.1-7) affioranti sull'isola (Fig. 1.1-8).

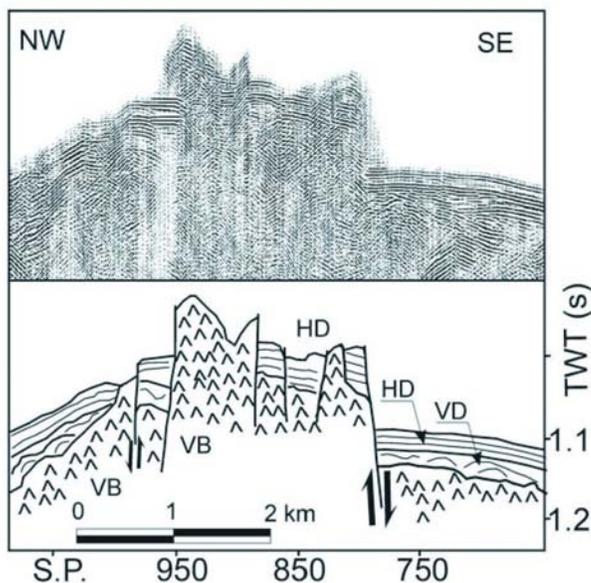


Figura 1.1-4. Interpretazione di una linea sismica NW-SE (indicata come W09 in Fig. 1.1-2) acquisita circa 10 km a sud-ovest di Ischia (da Bruno et al., 2002). L'immagine mostra strutture vulcaniche minori tagliate da faglie in cui prevale nettamente la componente di dislocazione verticale. Una delle faglie sul lato a nord-ovest della sezione (sx) può rappresentare il prolungamento del piano sismogenetico del 21 agosto 2017.

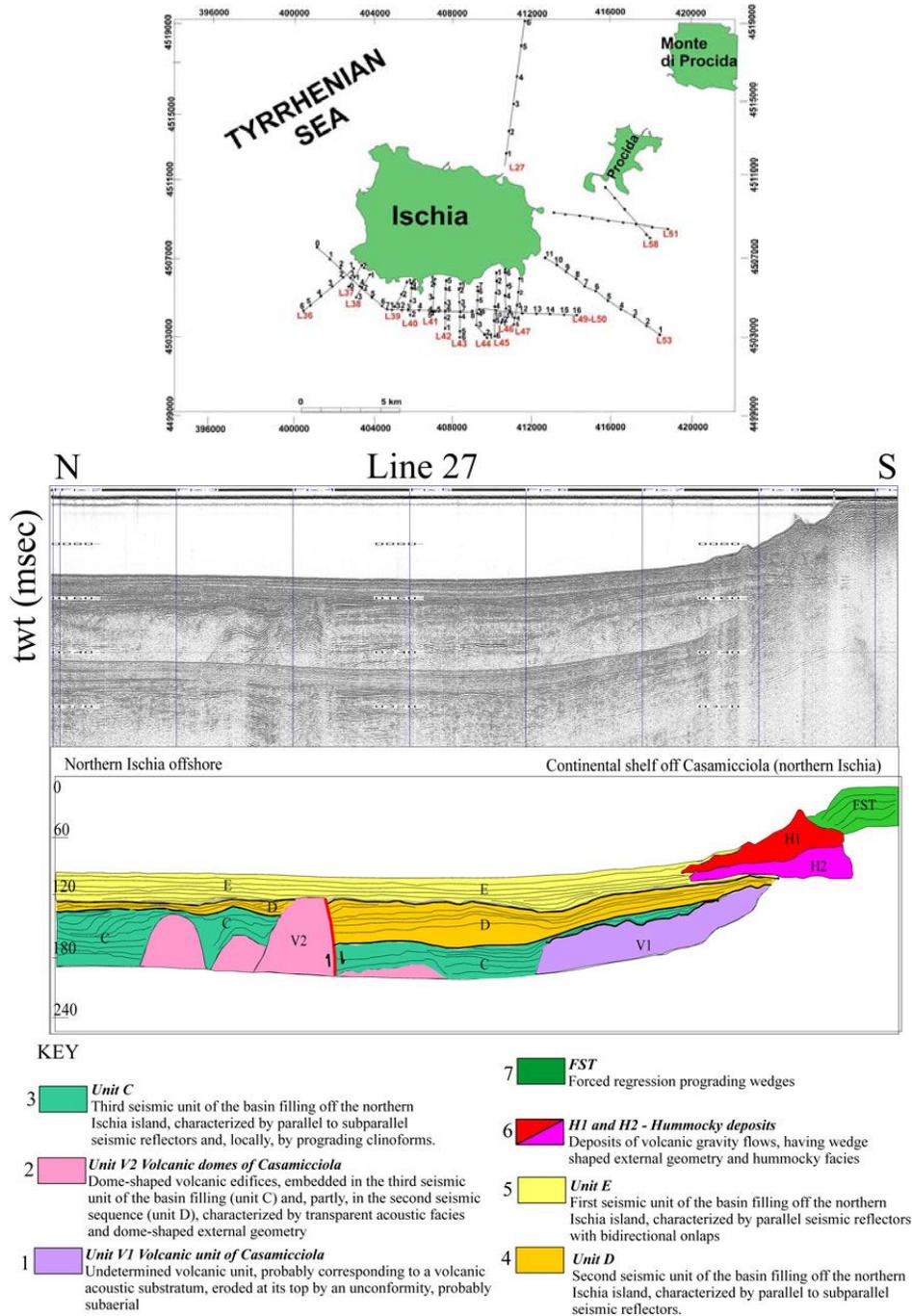


Figura 1.1-5. Mappa (sopra) con la traccia dei profili di Aiello et al. (2012). In particolare la sezione a nord dell'isola L27 (linea sismica sotto, Line 27) corre dalla piattaforma continentale verso il bacino a nord di Casamicciola ed è stata acquisita con una sorgente sismica Sparker Multitip. In basso è riportata la stessa sezione con l'interpretazione geologica. Il bacino a nord dell'isola non evidenzia faglie attive. Cunei progradanti da regressione forzata caratterizzano l'architettura stratigrafica della piattaforma continentale (FST). Due cunei sovrapposti di depositi caotici a sud (dx) suggeriscono la presenza di più sequenze deposizionali ed eventi separati responsabili delle debris avalanches a nord di Casamicciola (H1 e H2). Si noti che le tre unità sedimentarie (E, D, C) colorate nel bacino sono separate da due discordanze erosionali regionali. Da Aiello et al. (2012).

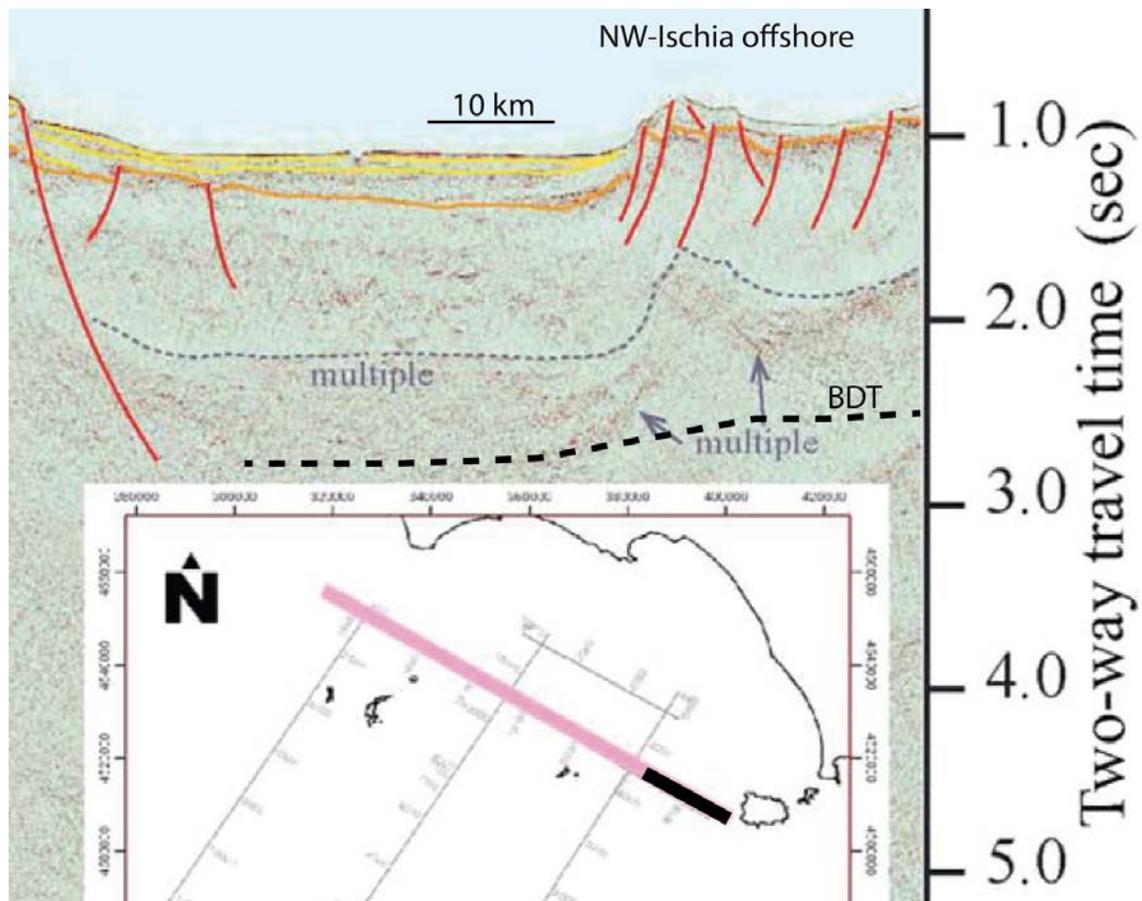


Fig. 1.1-6. Frammento evidenziato col segmento nero del profilo sismico a riflessione (Tir10-13) da Conti et al. (2017) acquisito nell'offshore nord-occidentale dell'isola d'Ischia. Si notino le faglie normali e una possibile interpretazione sulla profondità della transizione fragile-duttile (BDT) come descritto nel testo.

Ischia è un campo vulcanico attivo che, nel corso della sua storia, ha cambiato profondamente aspetto più volte anche in tempi molto recenti. L'isola è costituita da rocce vulcaniche, da depositi di frana e, subordinatamente, da rocce cosiddette sedimentarie, che derivano dall'accumulo e dalla cementazione di frammenti di rocce preesistenti, smembrate dai processi erosionali (Fig. 1.1-8).

Le rocce vulcaniche presenti sull'isola sono il prodotto di eruzioni sia effusive, che hanno formato colate e duomi di lava, sia esplosive, che hanno generato estese coltri di cenere e lapilli (de Vita e Marotta, 2007 e bibliografia annessa).

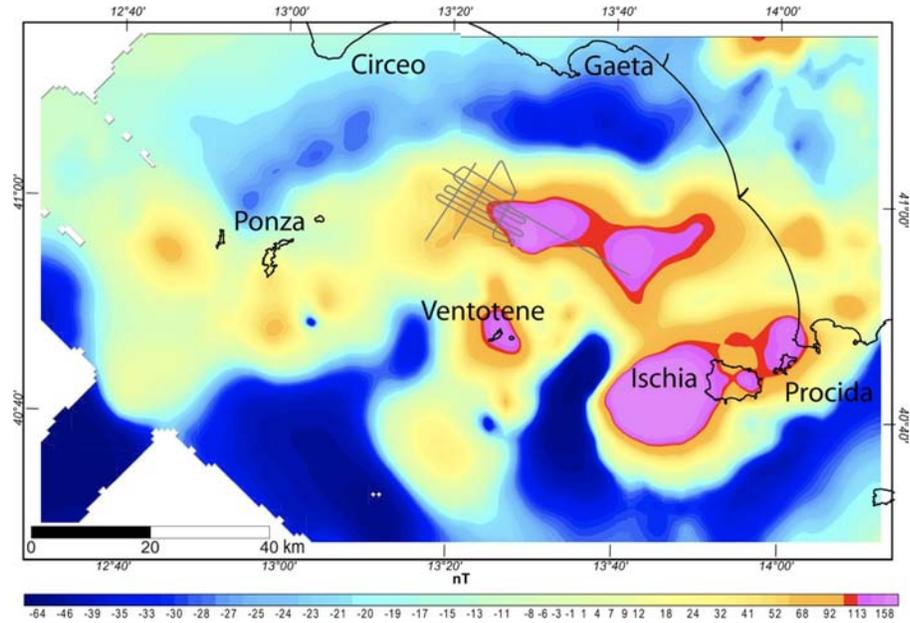


Figura 1.1-7. Anomalie magnetiche ridotte al polo tratte dalla carta aeromagnetica d'Italia (Caratori Tontini et al. 2004, in Cuffaro et al. 2016). Si notino i valori elevati di anomalia magnetica in corrispondenza dell'Isola d'Ischia-Procida.

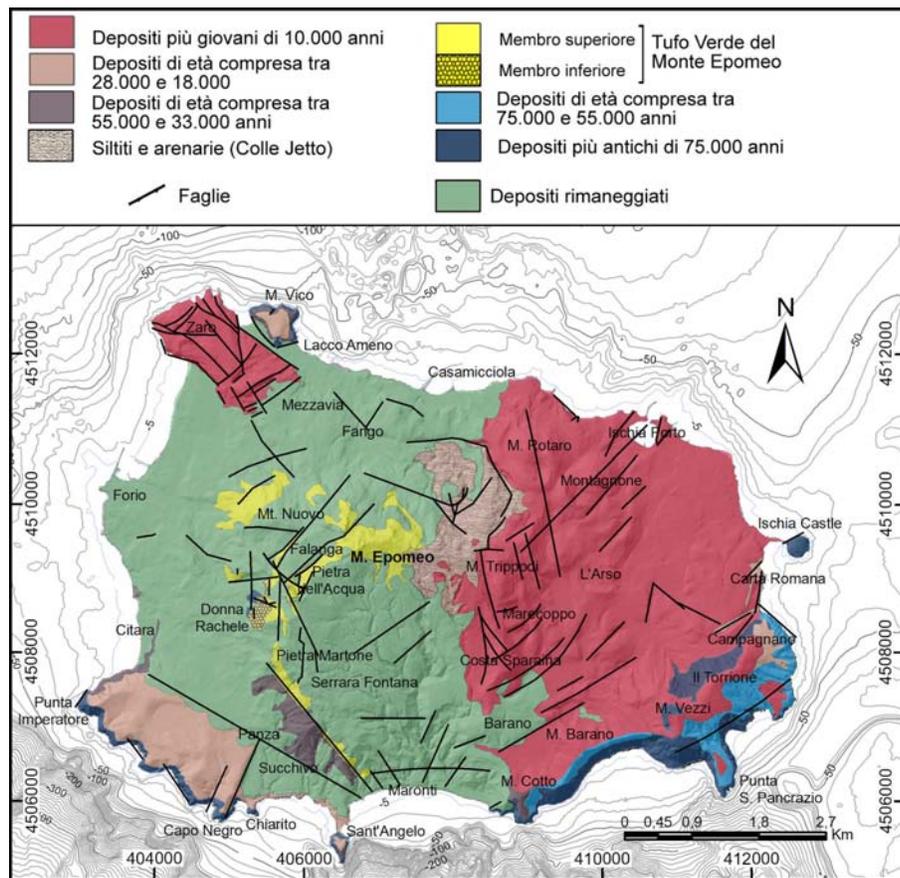


Figura 1.1-8. Carta geologica schematica dell'isola d'Ischia (da: de Vita et al., 2010).

L'età di inizio dell'attività vulcanica sull'isola non è precisamente nota, infatti le rocce più antiche datate, che non sono le più antiche in affioramento, hanno un'età di 150.000 anni (Vezzoli, 1988) e appartengono ad un complesso vulcanico attualmente in parte smantellato e ricoperto dai prodotti dell'attività più recente. I resti di questo apparato si rinvenivano nel settore sud-orientale dell'isola (Fig. 1.1-8). I prodotti dell'attività successiva alla formazione di questo complesso sono costituiti da piccoli duomi lavici. Questi ultimi (Campagnano, Monte Vezzi, Monte Barano, Punta della Signora, Sant'Angelo, Punta Chiarito, Capo Negro, Punta Imperatore, Monte Vico, e l'isolotto del Castello d'Ischia) sono situati lungo le coste dell'isola e hanno un'età compresa tra 150.000 e 74.000 anni (Chiesa et al, 1987) (Fig. 1.1-8).

A questo periodo di attività, cui si deve la formazione dei duomi lavici, fece seguito un periodo caratterizzato da violente eruzioni esplosive, eruzioni di minore energia e intervalli di inattività di durata variabile, che culminò circa 55.000 anni fa con l'eruzione del Tufo Verde del M. Epomeo (Gillot et al, 1982; Chiesa et al., 1987; Poli et al., 1989; Civetta et al., 1991; Brown et al., 2008). Questa eruzione, fortemente esplosiva, è stata responsabile della formazione di una caldera che verosimilmente occupava la zona dove, attualmente, si trova la parte centrale dell'isola (Rittmann, 1930; Barra et al., 1992a, b). L'eruzione del Tufo Verde determinò la formazione di ignimbriti che andarono a colmare parzialmente la depressione calderica, che frattanto veniva invasa dal mare (Chiesa et al, 1987; Vezzoli, 1988; Poli et al., 1989; Brown et al., 2008), e a ricoprire in parte le zone allora emerse. Il Tufo Verde depositato in ambiente subacqueo è attualmente esposto al M. Epomeo. Il Tufo Verde depositato in ambiente subaereo, è attualmente esposto a Punta Imperatore, a Sant'Angelo e alla Scarrupata di Barano, lungo la periferia dell'isola (Brown et al., 2008; Fig. 1.1-8).

Dopo l'eruzione del Tufo Verde, l'attività vulcanica è proseguita con una serie di eruzioni esplosive, fino a circa 33.000 anni fa (Civetta et al., 1991), i cui centri erano ubicati lungo i margini sud-occidentale e nord-occidentale dell'isola. Le rocce originate nel corso di queste eruzioni sono esposte lungo le falesie tra Sant'Angelo e Punta Imperatore, a Citara e a Monte Vico (Fig. 1.1-8).

Il lungo periodo di quiescenza che seguì, terminò circa 28.000 anni fa con l'eruzione di Grotta di Terra, avvenuta lungo la costa sud-orientale dell'isola (Fig. 1.1-8). Successivamente l'attività vulcanica è continuata sporadicamente fino a 18.000 anni fa, con l'emissione di magmi che hanno alimentato eruzioni effusive ed esplosive (magmatiche e freatomagmatiche), con la messa in posto di colate laviche, depositi da caduta e la costruzione di piccoli coni di tufo. Le rocce appartenenti a questo periodo di attività sono ben esposte al M. di Vezzi, nell'area di S. Anna e Carta Romana, a M. Cotto e tra Punta Imperatore e Sant'Angelo (Fig. 1.1-8).

Frattanto la geografia dell'isola andava profondamente modificandosi non solo a causa delle continue eruzioni vulcaniche, ma anche a seguito dell'emersione della sua parte centrale, dovuta all'instaurarsi di un fenomeno di sollevamento del fondo della caldera generata dall'eruzione del Tufo Verde del Monte Epomeo. Questo fenomeno, detto di risorgenza (Fig. 1.1-9), è cominciato a seguito dell'intrusione di nuovo magma nel sistema,

e ha causato il sollevamento del blocco centrale dell'isola di almeno 900 m negli ultimi 30.000 anni (Orsi et al., 1991).

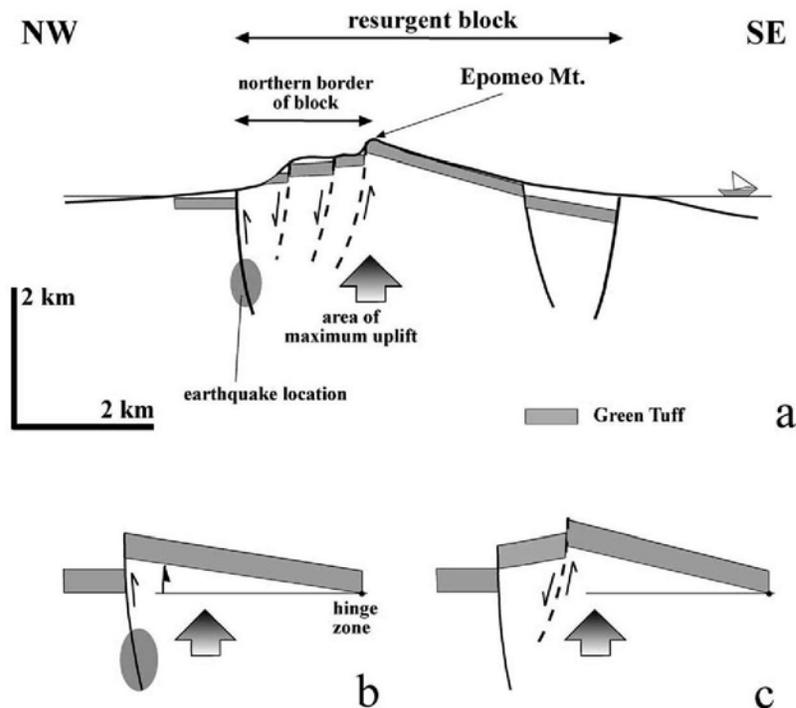


Figura 1.1-9. Modello schematico del fenomeno della risorgenza nell'interpretazione proposta da Molin et al. (2003). a. configurazione attuale; b. alcune faglie inverse innescano attività sismica; c. il proseguire dell'attività delle faglie inverse causa il collasso del blocco sollevato, accompagnato da faglie estensionali come quelle che si ritengono responsabili della sismicità attuale.

Il fenomeno della risorgenza ha fortemente condizionato l'attività vulcanica almeno negli ultimi 10.000 anni, determinando le condizioni per la risalita dei magmi prevalentemente nel settore orientale dell'isola e lungo sistemi di faglie regionali preesistenti. La risorgenza si è realizzata attraverso un meccanismo che ha determinato l'instaurarsi di un regime di sforzo di tipo compressivo lungo il margine occidentale del blocco risorgente, con la formazione di faglie inverse e l'impossibilità per i magmi di risalire verso la superficie, e di un regime di sforzo di tipo distensivo a est, con la formazione di faglie dirette, che avrebbero facilitato la risalita dei magmi in questo settore (Orsi et al., 1991). Infatti, dopo un periodo di stasi cominciato circa 18.000 anni fa, il vulcanismo sull'isola riprese intorno a 10.000 anni fa, dando inizio all'ultimo periodo di attività, che è proseguito anche in epoca storica con una serie di eruzioni, localizzate prevalentemente nel settore orientale dell'isola, di cui l'ultima avvenne nel 1302 d.C., dopo un periodo di quiescenza di circa 250 anni, e formò la colata lavica dell'Arso (Iacono, 1996; Fig. 1.1-10).

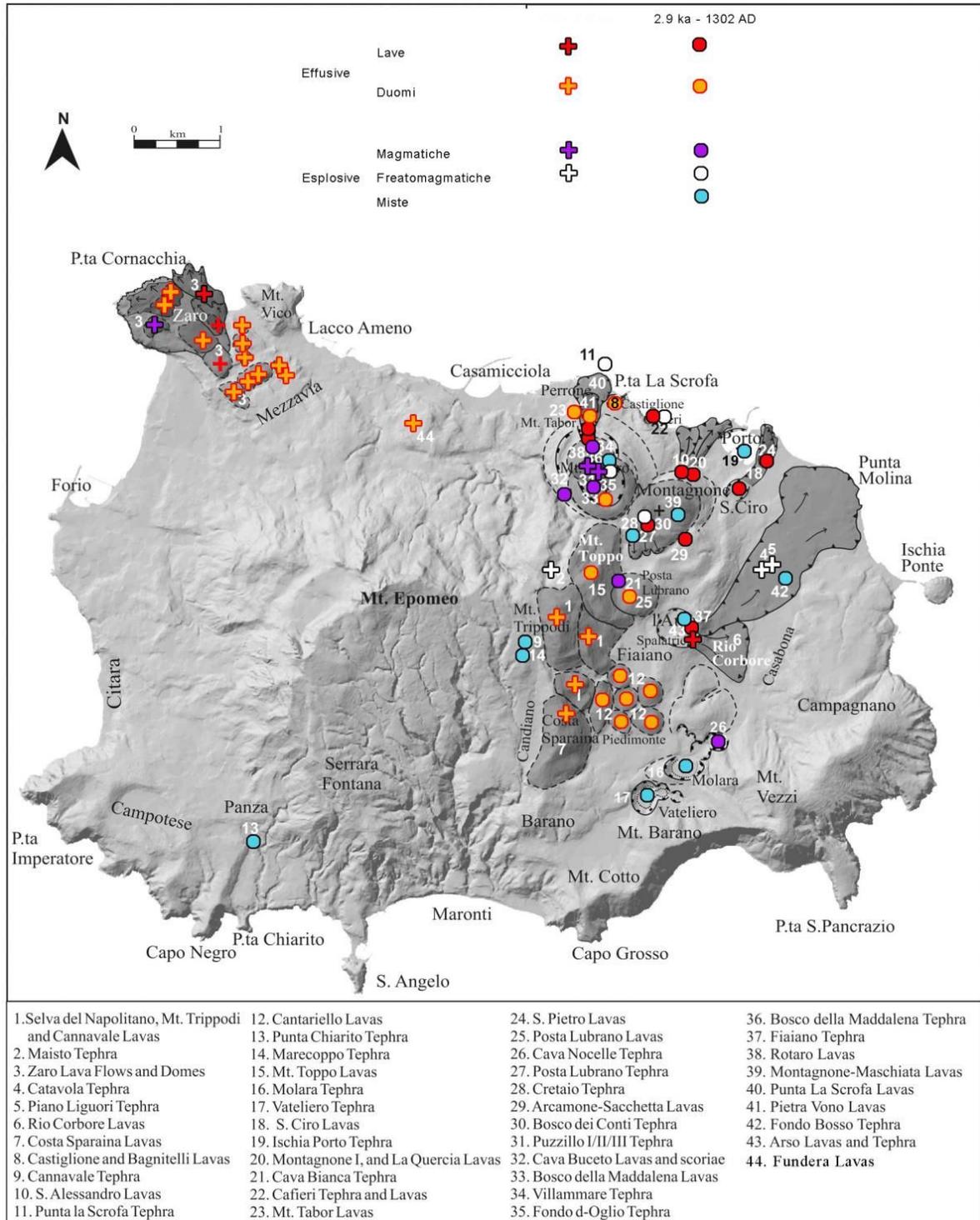


Figura 1.1-10. Centri attivi negli ultimi 10 ka, divisi per età (10-4.3 ka e 2.9 ka - 1302 AD), e per tipo di attività (effusive lave, effusive duomi, esplosive magmatiche, freatomagmatiche e miste), da CPV-TdL Ischia (2016).

Questo periodo è stato caratterizzato da un'intensa attività vulcanica sia effusiva che esplosiva. In particolare sono stati riconosciuti i prodotti di 46 diverse eruzioni, concentrate principalmente nel periodo compreso tra circa 3.000 anni fa e il 1302 d.C. (Sansivero, 1999; de Vita et al., 2006; 2010), che hanno prodotto colate e duomi lavici, coni di pomici e scorie, *tuff cone* e *tuff ring* e depositi piroclastici da caduta e da flusso più o meno ampiamente distribuiti (Sansivero, 1999; de Vita et al., 2006; 2010). La maggior parte dei centri eruttivi attivi in questo periodo, come detto, è situata nella depressione posta ad est del M. Epomeo e comprende tra gli altri Selva del Napolitano, Trippodi, Costa Sparaina, Posta Lubrano, M. Rotaro e Montagnone, nell'area immediatamente a ridosso dei versanti del M. Epomeo; Punta La Scrofa, Cafieri, e l'abitato di Ischia Porto, lungo la costa settentrionale; Vateliero, Cava Nocelle, Molara, Arso e Fondo Bosso, nel settore sud-orientale dell'isola (Figg. 1.1-1 e 1.1-10).

Solo alcuni centri, come ad esempio quelli da cui si sono originati le colate e i duomi lavici di Zaro e il deposito di pomici e ceneri dell'unità di Chiarito, sono ubicati al di fuori dell'area descritta lungo importanti strutture regionali. Gli studi più recenti condotti sull'isola hanno dimostrato che negli ultimi 10.000 anni si sono alternati periodi di quiescenza, di durata anche plurisecolare, e periodi di intensa attività eruttiva. Poiché, come abbiamo visto, il vulcanismo è direttamente connesso alla dinamica della risorgenza del M. Epomeo, se ne deduce che questo fenomeno non è stato continuo nel tempo, ma si è realizzato attraverso fasi intermittenti di sollevamento e di quiete tettonica. Negli ultimi 5.000 anni, in particolare, la riattivazione di faglie e la relativa ripresa dell'attività vulcanica, sono state accompagnate dalla formazione di depositi di frane, che si intercalano a varie altezze nella serie stratigrafica, precedendo e seguendo di poco i depositi delle principali eruzioni di quest'ultimo periodo. Questi depositi individuano dei periodi di intensa erosione e rideposizione dei depositi vulcanici primari e dimostrano che le condizioni di instabilità dei versanti sono state indotte dagli stessi movimenti verticali responsabili della formazione di faglie e fratture che hanno alimentato l'attività vulcanica (de Vita et al., 2006).

Come abbiamo visto, quindi, l'intensa attività vulcanica di epoca storica, particolarmente concentrata nelle ultime migliaia di anni, si è manifestata con un considerevole numero di eruzioni a carattere sia effusivo che esplosivo, separate nel tempo da periodi di quiescenza che, talora, hanno avuto durata di alcuni secoli. A partire dall'ultima eruzione verificatasi a Ischia, il sistema vulcanico dell'isola ha continuato a manifestare la sua attività attraverso una intensa sismicità, culminata nel disastroso terremoto di Casamicciola del 1883, una diffusa attività fumarolica e idrotermale (numerose fumarole sono state identificate nella zona compresa tra la spiaggia di Maronti e la località Panza (SSO), sul fianco nord di M. Epomeo, nell'area di Pizzone-M. Nuovo e M. Cito, e sul fianco occidentale di M. Epomeo, come l'area fumarolizzata di Donna Rachele; Panichi et al., 1992; Inguaggiato et al., 2000; Chiodini et al., 2004), e una intensa attività gravitativa con fenomeni franosi che interessano larga parte del territorio ischitano. Tale attività si manifesta attraverso fenomenologie superficiali, che spesso interessano le coltri detritiche lungo i versanti acclivi del Monte Epomeo, frane di crollo/ribaltamento, che invece sono molto frequenti lungo le falesie della fascia costiera, ma è caratterizzata anche da deformazioni gravitative profonde

potenzialmente collegate a grandi frane in roccia (CPV - TdL Ischia, 2016; Fig. 1.1-11). Tra queste, va segnalata la deformazione gravitativa profonda che interessa il Monte Epomeo nella sua porzione occidentale, corrispondente al Monte Nuovo (e.g., Della Seta et al. 2015; Figura 1.1-11). Il possibile collasso di Monte Nuovo sul versante NO dell'Epomeo potrebbe essere accelerato da eventi sismici, verosimilmente a bassa frequenza (Lenti et al., 2015). Al contrario, Paparo e Tinti (2017) ipotizzano un possibile innesco da parte di eventi simili al terremoto di Casamicciola del 1883. Tale collasso rappresenterebbe uno scenario di grande frana in roccia che, oltre a investire il settore sottostante della costa, potrebbe generare uno tsunami di notevole dimensione, con impatto significativo sull'isola e su ampi tratti della costa campana (Zaniboni et al., 2013).

Tutte queste fenomenologie sono una manifestazione della dinamica del sistema che va considerato, pertanto, ancora attivo al presente e potenzialmente in grado di produrre eruzioni in futuro, così come ad indurre diverse fenomenologie pericolose non eruttive tipiche di tutte le aree vulcaniche (CPV - TdL Ischia, 2016).

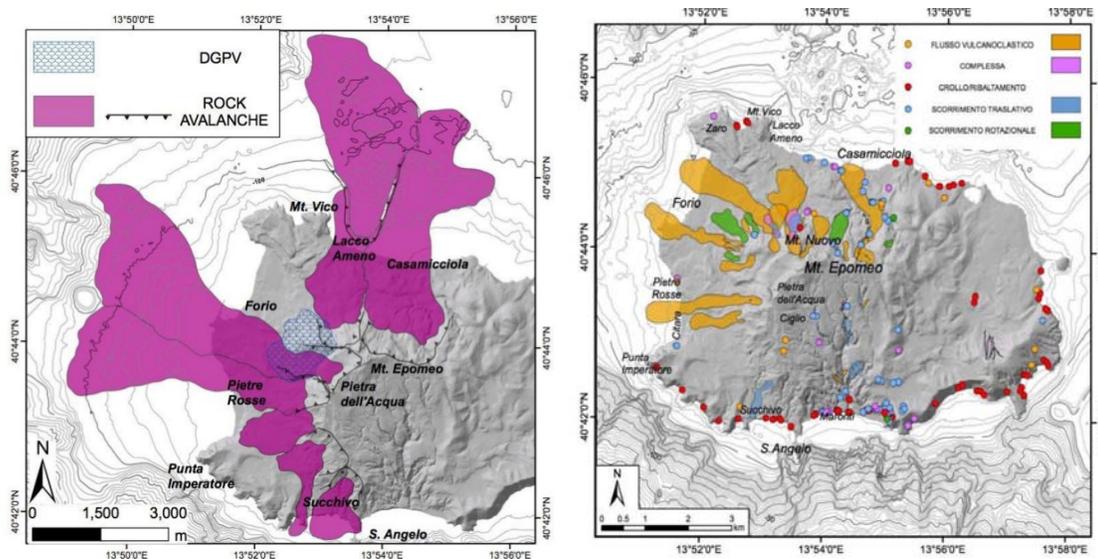


Figura 1.1-11. Distribuzione spaziale di (a sinistra) rock avalanche e della DGPV (deformazione gravitativa profonda di versante) di Monte Nuovo e (a destra) di frane impulsive superficiali (da CPV - TdL Ischia, 2016). I depositi di rock avalanche e frane del lato nord possono rappresentare il substrato che ha generato l'effetto di sito a Casamicciola, amplificando l'oscillazione sismica e l'accelerazione del 21 agosto.

1.2 Sismicità storica dell'isola d'Ischia

Il Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani CPTI15 (Rovida et al., 2016) contiene i parametri epicentrali di 12 terremoti localizzati nell'isola o a mare negli immediati dintorni

(Tab. 1.2-1, Fig. 1.2-1), con magnitudo Mw compresa tra poco meno di 3 e poco superiori a 4. Il più antico di questi terremoti (sempre che non sia stato una frana) avvenne qualche tempo prima del 2 novembre 1275, il più recente risale al 23 aprile 1980. Occorre precisare che l'evento datato 1228, segnalato da diversi studi come un possibile terremoto, è certamente una frana (non un terremoto, il testo di Riccardo di San Germano dice semplicemente "Mons Iscle subversus est") e che gli effetti attribuiti alle scosse di terremoto che verosimilmente accompagnano l'ultimo evento eruttivo dell'isola (databile probabilmente al gennaio-marzo 1302) non sono parametrizzabili.

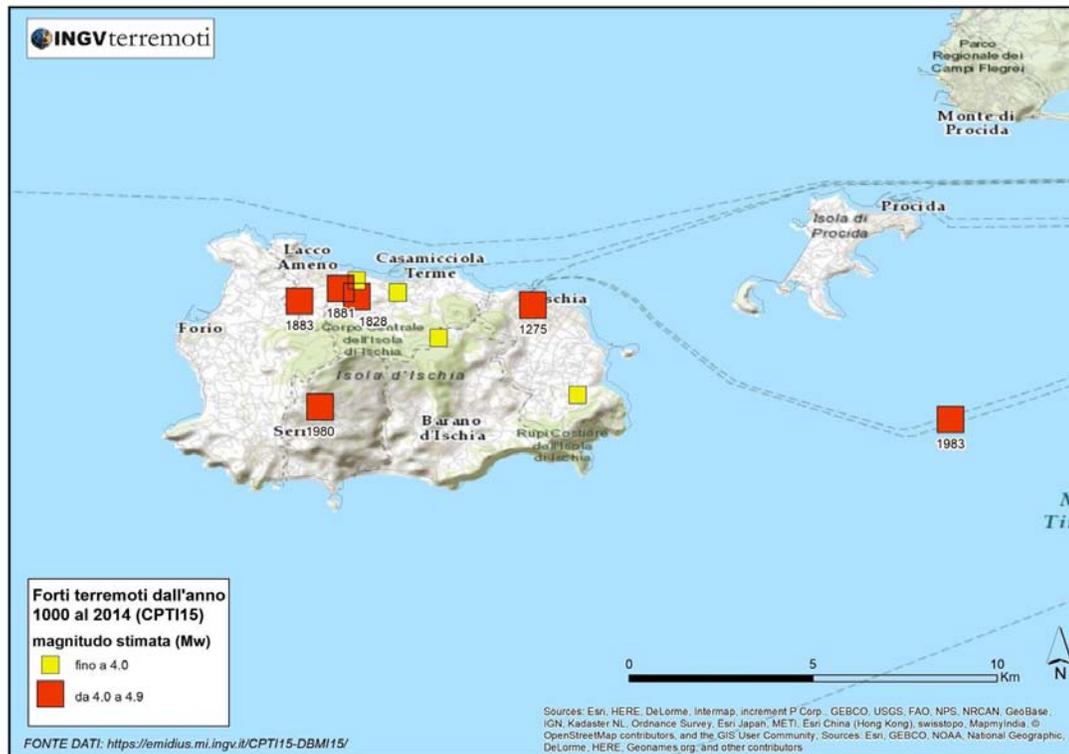


Figura 1.2-1. Terremoti dell'isola d'Ischia nel catalogo CPTI15 (Rovida et al., 2016).

La maggior parte di questi eventi era già nota al grande repertorio descrittivo di terremoti italiani compilato da Mario Baratta alla fine dell'Ottocento (Baratta, 1901). Gli studi svolti nell'ultimo ventennio hanno documentato con un buon livello di approfondimento gli effetti di tutti i terremoti noti che hanno interessato l'isola.

Anno	Me	Gi	Or	Mi	Area epicentrale	Ref	Lat	Lon	Imax	Mw	ErMw
1275	11	02			Isola d'Ischia	CFTI4med	40,743	13,942	8-9	4,01	0,5
1557					Isola d'Ischia	MOLAL008	40,721	13,953	D	3,5	0,5
1762	07	23			Isola d'Ischia	AMGNDT995	40,746	13,909	6-7	3,5	0,5
1767					Isola d'Ischia	AMGNDT995	40,735	13,919	D	3,5	0,5
1796	03	18	16	30	Isola d'Ischia	CFTI4med	40,746	13,909	8	3,88	0,5

1828	02	02	09	15	Isola d'Ischia	CFTI4med	40,745	13,899	9	4,01	0,5
1841	03	06	12		Isola d'Ischia	MOLAL008	40,749	13,899	6	3,25	0,5
1863	01	30	11	30	Isola d'Ischia	MOLAL008	40,746	13,909	5	2,87	0,5
1867	08	15	23	30	Isola d'Ischia	MOLAL008	40,746	13,909	5-6	2,99	0,5
1881	03	04	12	15	Isola d'Ischia	CFTI4med	40,747	13,895	9	4,14	0,5
1883	07	28	20	25	Isola d'Ischia	CFTI4med	40,744	13,885	10	4,26	0,5
1980	04	23	11	11	Isola d'Ischia	MOLAL008	40,718	13,89	5	4,37	0,2

Tabella 1.2-1. Terremoti dell'isola d'Ischia nel catalogo CPTI15 (Rovida et al., 2016).

I terremoti principali, meglio documentati, sono rispettivamente quelli del 1762, 1796, 1828, 1881 e 1883.

Il **23 luglio 1762** un forte terremoto colpì l'isola d'Ischia, che - come scrive una corrispondenza giornalistica coeva da Napoli - *“oltre il gran terrore dato a quegli abitanti, ed ad una quantità di convalescenti colà pertativi per causa de bagni, e stufe di quei minerali, aveva cagionato del notabilissimo danno, colla caduta di un intiera chiesa in Casamicciola di alcune colonnate, ed altri danni”*. La notizia è ripresa, sostanzialmente identica, da numerose gazzette europee. Non ci furono vittime e non si hanno informazioni di ulteriori effetti di danno in altre località dell'isola o di avvertimento in area napoletana.

Intorno alle ore 17.30 locali del **18 marzo 1796** un altro forte terremoto fu avvertito nell'isola: a Casamicciola produsse il crollo di diverse case “presso la parrocchia” (Mercalli, 1884; Baratta, 1901), ma non produsse danni né in altre parti di Casamicciola né in altre località dell'isola. Nessuna traccia del terremoto emerge dalle numerose gazzette a stampa del tempo (saturate da notizie di natura ben diversa, legate al particolare momento storico e politico), a conferma del carattere strettamente locale degli effetti prodotti da questo evento.

La mattina del **2 febbraio 1828** un forte terremoto colpì l'isola d'Ischia, e in particolare Casamicciola, dove, secondo una corrispondenza da Napoli del Giornale del Regno delle Due Sicilie *“produsse ivi orribili guasti. Parte delle case ed edificii di quel comune crollò dalle fondamenta e parte per le enormi lesioni; il numero degli individui rimasti estinti sotto le ruine ascende a 29 [...] non piccolo è pure il numero dei feriti”*. Danni gravi si ebbero anche a Lacco Ameno e Fango, mentre non si ebbero danni a Serrara Fontana, Forio e Ischia. Anche in questo caso il terremoto, pur forte, non fu avvertito a Napoli. Il 14 febbraio si ebbe una replica abbastanza forte (che produsse qualche danno ulteriore a Casamicciola) e altre repliche si avvertirono nei mesi successivi fino al 24 settembre, quando a Casamicciola fu avvertita una nuova scossa piuttosto forte, che non produsse però alcun danno.

Il **4 marzo 1881**, poco dopo l'una pomeridiana a Casamicciola fu avvertita una scossa di terremoto che fece uscire molte persone dalle case e fu seguita, pochi minuti dopo, da una seconda scossa più forte che causò crolli, danni e vittime. I massimi effetti si concentrarono in un'area limitata del versante occidentale dell'isola, a Casamicciola, Fango e Lacco Ameno. Ci furono 127 morti, quasi tutti a Casamicciola e una novantina di feriti; circa 300 persone rimasero senza tetto. A Casamicciola i danni più gravi si focalizzarono nella parte

alta e più antica dell'abitato mentre furono più lievi nel quartiere costiero della "Marina". Fango rimase quasi completamente distrutta, con 5 vittime; a Lacco Ameno crollarono alcune case nella parte alta dell'abitato e le altre furono gravemente danneggiate ma non ci furono vittime. La scossa fu avvertita fortemente ma senza causare danni sul versante orientale dell'isola d'Ischia. L'avvertimento fu più leggero a Procida, nelle isole Pontine e nei Campi Flegrei ma non raggiunse la città di Napoli.

Solo due anni dopo l'evento del 1881, la sera del **28 luglio 1883**, in piena stagione turistica estiva, mentre gli alberghi delle rinomate stazioni balneari e termali dell'isola erano affollati di villeggianti, molti dei quali stranieri, si verificò il più forte terremoto della storia sismica dell'isola d'Ischia. Per una descrizione dettagliata degli effetti di questo terremoto il lettore può fare riferimento al successivo Par. 1.2.1.

Un cenno particolare merita il caso del terremoto più recente, quello del **23 aprile 1980**, che in catalogo presenta un valore di magnitudo relativamente elevato per quest'area (Mw 4.37, Tab. 1.2-1), valore che deriva da un dato strumentale (4.6) affetto da molte incertezze (incertezze che riguardano anche la localizzazione: l'Osservatorio Vesuviano lo riteneva localizzato a 20 km a Sud di Ischia) combinato alla magnitudo macrosismica (3.1) per un terremoto che produsse spavento ma non danni: l'evento è probabilmente da ridimensionare e rilocalizzare.

Caratteristica comune di tutti questi terremoti è che a stime di magnitudo piuttosto modeste (valori calcolati con procedure specifiche per terremoti di area vulcanica e con valori di incertezza molto forti) corrispondono effetti di intensità macrosismica molto elevata e distruttiva (X MCS nel 1883 a Casamicciola), che però in genere interessano un'area estremamente limitata. Anche l'area complessiva di risentimento di questi terremoti è in genere poco estesa. Questi scenari particolarmente drammatici – riscontrabili nella storia sismica di Casamicciola (Fig. 1.2-2) - sono indubbiamente frutto di un concorso di fattori complesso e da analizzare però caso per caso.

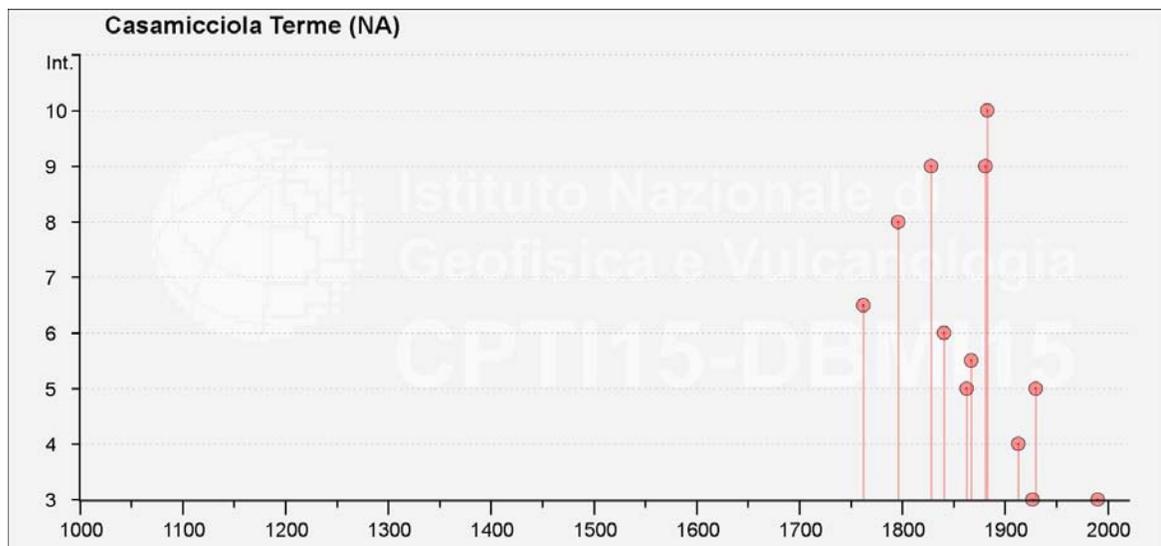


Figura 1.2-2. Storia sismica osservata di Casamicciola (Locati et al., 2016).

Tra le concause che in passato hanno determinato la elevata consistenza degli effetti ci sono gli ipocentri molto superficiali, la geologia dell'isola, la vulnerabilità del patrimonio edilizio e la elevata densità abitativa.

Insieme ai terremoti maggiori, inclusi nella versione più recente del catalogo parametrico, sono disponibili, a partire dal XVI secolo, numerose tracce (in corso di revisione) di eventi minori non noti ai cataloghi parametrici moderni. In particolare si segnalano due eventi cinquecenteschi (1577 e 1587), attestati da tracce archivistiche, due eventi fra XVII e XVIII secolo (1635 e 1711) attestati da fonti giornalistiche e una decina di eventi ottocenteschi, fra i quali vale la pena ricordare l'11 aprile 1827 – evento probabilmente localizzabile a Ponza –, il 24 settembre 1828, forte replica non nota del terremoto del 2 febbraio, e il 7 giugno 1852.

L'individuazione di numerosi eventi minori (solo un paio dei quali raggiungono apparentemente la soglia del danno) a partire da metà '500 non è garanzia di completezza del catalogo sopra la soglia del danno per una finestra temporale tanto ampia: come si è visto anche per terremoti maggiori, eventi ischitani che producono danni hanno una buona probabilità di non essere avvertiti a Napoli, che è l'unico centro che ha una buona continuità di osservazione a partire dal Cinquecento, sia per l'elevata produzione di fonti cronachistiche e memorialistiche, sia per l'opera di selezione di informazioni sulla storia sismica operata dal Pacca (XVI) e dal Bonito (1691). Pertanto la storia sismica maggiore nota dell'isola d'Ischia si deve ritenere rappresentativa della sismicità reale solo per gli ultimi due secoli.

1.2.1 Il grande terremoto del 28 luglio 1883

La sintesi che segue è tratta dal Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (CFTI4Med: Guidoboni et al., 2007), al quale si rimanda il lettore per ulteriori dettagli.

La scossa principale avvenne il 28 luglio 1883 alle ore 20:25 GMT. Seguirono numerose repliche fino alla metà di settembre, le più intense delle quali furono quelle avvertite nei sei giorni che seguirono, soprattutto il 3 agosto.

Il terremoto colpì con effetti distruttivi un'area molto limitata, corrispondente alla parte occidentale dell'isola di Ischia. Le località più danneggiate furono Casamicciola (oggi Casamicciola Terme), Lacco Ameno e Forio; in particolare, le borgate della parte alta dei paesi furono completamente distrutte. Dalla relazione del Comitato centrale di soccorso risulta che a Casamicciola fu distrutto l'80% del patrimonio edilizio; a Lacco Ameno il 70%; a Forio il 50%. Crolli e danni gravi alle strutture edilizie furono rilevati in quasi tutti gli altri centri dell'isola; furono gravemente colpite anche le case sparse della dorsale montuosa dell'isola. I danni furono invece molto limitati sul versante orientale dell'isola (Ischia, Porto d'Ischia). La vicina isola di Procida subì solo lievi lesioni. L'area di risentimento fu estremamente circoscritta: la scossa fu sentita a Napoli e a Salerno; appena avvertita a Roma.



Figura 1.2-3. Crolli di edifici sul Monte della Misericordia (da Guidoboni e Valensise, 2011).

A partire dalla fine del '700 l'isola di Ischia aveva assunto rinomanza europea per i bagni termali; la presenza di turisti stranieri era dunque sempre numerosa nel periodo estivo. L'economia era basata in parte su attività tradizionali, quali la pesca e l'agricoltura, dove la viticoltura era preminente, e in parte sull'attività turistica. Il terremoto ebbe un forte impatto sulla vita sociale ed economica dell'isola, che andò oltre gli effetti distruttivi immediati. La relazione del Comitato governativo di soccorso quantificò l'entità dei danni ai beni immobili in lire 9.857.017 e i danni ai beni mobili in lire 1.388.466. I danni riguardarono anche l'agricoltura: frane e smottamenti invasero vigne e campi, danneggiando gravemente la produzione.

Complessivamente perirono 2.333 persone (1.235 morti e 451 feriti a Casamicciola; 307 morti e 63 feriti a Forio; 128 morti e 72 feriti a Lacco Ameno; 10 morti e 15 feriti a Barano; 28 morti e 21 feriti nel comune di Serrara-Fontana). Vi furono, inoltre, 625 vittime e 79 feriti tra i turisti, ospiti al momento del terremoto degli alberghi e delle ville nei centri più colpiti.

Il mattino successivo alla scossa arrivarono 1.200 militari del presidio di Napoli per portare i primi aiuti. Il governo istituì un comitato per l'organizzazione dei soccorsi, presieduto dal prefetto di Napoli. Comitanti di solidarietà per la raccolta di fondi furono costituiti nelle province del Regno d'Italia e in molte capitali europee. Le carenze organizzative e le piogge che seguirono il terremoto aggravarono le difficoltà dei soccorsi. Per evitare epidemie, le autorità ordinarono la ricopertura delle macerie con calce viva e acido fenico;

un provvedimento che animò la polemica sulla stampa nazionale, già aspra per l'inadeguatezza degli aiuti. Alla fine di settembre a Casamicciola si verificarono alcuni casi di tifo e fu costruita una baracca isolata per ricoverare gli infetti. Per dare alloggio alla popolazione, furono costruite complessivamente 800 baracche di legno.

La vasta eco suscitata dalla catastrofe di Casamicciola ebbe notevoli ripercussioni anche a livello politico e richiamò per la prima volta l'attenzione del governo dell'Italia unitaria sul problema sismico e sui sistemi di costruzione nelle aree soggette a terremoti. Il ministro dei Lavori Pubblici Genala istituì una speciale commissione di tecnici del Genio Civile per la elaborazione di un apposito regolamento edilizio sull'isola. Nella relazione redatta al termine dell'incarico la commissione mise in rilievo, tra l'altro, la cattiva natura delle costruzioni e delle malte usate sull'isola come una importante concausa del disastro sismico.

Il terremoto ebbe anche significativi effetti sull'ambiente, e in particolare sulle numerose manifestazioni idrotermali che caratterizzano Ischia. Nei giorni precedenti il terremoto le acque termo-minerali erano aumentate di temperatura, in alcuni casi erano divenute torbide. I pochi pozzi presenti sull'isola diminuirono di portata e le acque di alcune sorgenti subirono alterazioni chimiche; questi fenomeni cessarono alcuni giorni dopo la scossa. In vari punti del monte Epomeo il terremoto causò la caduta di frane e la formazione di spaccature nel terreno. Alcune fumarole aumentarono la loro attività, altre la interruppero. In mare, di fronte alla costa occidentale, si sollevò in superficie una grande quantità di fango, e nella stessa area fu segnalato un sollevamento della costa. Al momento della scossa molte persone osservarono fenomeni elettrici come lampi, globi di fuoco, fiammelle. L'insieme di questi fenomeni non mancò di richiamare a Ischia alcuni tra i più famosi studiosi dell'epoca, le cui relazioni costituiscono un prezioso repertorio di osservazioni e di ipotesi interpretative, di notevole interesse anche per la storia della Sismologia e della Vulcanologia.

Il sismologo Mario Baratta riporta un'accurata sintesi delle scosse di questo periodo sismico, desunta oltre che dalle fonti scientifiche anche da giornali. Complessivamente furono avvertite scosse sensibili per quasi due mesi.

- Il 28 luglio 1883, alle ore 20:25 GMT, una fortissima scossa di terremoto causò distruzioni in numerosi paesi dell'isola di Ischia; entro la mezzanotte a Casamicciola si verificarono sei repliche.
- 29 luglio 1883: a Panza si verificò una scossa alle ore 1:00 GMT e altre numerose repliche durante il giorno; tra Forio e Casamicciola si avvertì una scossa molto forte dopo la mezzanotte; a Casamicciola fu avvertita una forte replica alle ore 4:00 GMT accompagnata da rombo; una leggera replica fu avvertita a Casamicciola alle ore 11:00 GMT.
- 29 luglio-3 agosto 1883: in questo periodo furono avvertite numerose scosse, a Forio ne furono contate 15.
- 1 agosto 1883: a Casamicciola furono avvertite due repliche: la prima alle ore 11:30 GMT e la seconda alle ore 15:00 GMT. Quest'ultima causò il crollo di alcuni muri già lesionati.
- 2 agosto 1883: una scossa leggera fu avvertita a Casamicciola alle 11:30 GMT seguita

nel pomeriggio da una seconda replica accompagnata da rombo.

- 3 agosto 1883: alle ore 9:00 GMT una scossa fece cadere dei muri già lesionati a Casamicciola. Una ulteriore scossa molto forte si verificò alle ore 13:30 GMT e fu avvertita in tutta l'isola; a Forio crollò una casa e a Barano, Fiaiano e Fontana si aprirono nuove lesioni nei fabbricati.
- 8 agosto 1883: una replica fu avvertita a Casamicciola durante il giorno.
- 12 agosto 1883: a Casamicciola si verificò una replica alle ore 5:45 GMT.
- 14-15 agosto 1883: nella notte fu avvertita una replica a Casamicciola.
- 9 settembre 1883: a Casamicciola si avvertì una scossa alle ore 20:25 GMT.
- 10 settembre 1883: alle ore 1:00 GMT fu avvertita una replica a Casamicciola.
- 21-22 settembre 1883: due scosse avvertite nella notte fecero cadere dei muri già lesionati nella parte alta di Casamicciola.

La Tabella 1.2-2 riporta le intensità risentite per effetto della scossa del 28 luglio (tratte da Guidoboni et al., 2007):

Località	Provincia	Latitudine	Longitudine	Intensità
Casamicciola	NA	40.7461	13.9089	X
Lacco Ameno	NA	40.7519	13.8881	IX-X
Forio	NA	40.7350	13.8589	IX
Barano d'Ischia	NA	40.7089	13.9186	VIII
Ciglio	NA	40.7122	13.8825	VIII
Fango	NA	40.7428	13.8881	VIII
Fiaiano	NA	40.7253	13.9289	VIII
Fontana	NA	40.7189	13.8983	VIII
Panza	NA	40.7083	13.8739	VII-VIII
Serrara	NA	40.7092	13.8925	VII-VIII
Buonopane	NA	40.7139	13.9114	VII
Sant'Angelo	NA	40.6967	13.8925	VII
Sant'Antuono	NA	40.7242	13.9469	VII
Succhivo	NA	40.7017	13.8842	VII
Campagnano	NA	40.7211	13.9528	VI-VII
Testaccio	NA	40.7039	13.9189	VI-VII
Ischia	NA	40.7428	13.9419	VI
Noia	NA	40.7153	13.8956	VI
Procida	NA	40.7583	14.0164	VI
Napoli	NA	40.8553	14.2603	V
Pozzuoli	NA	40.8217	14.1233	IV-V

Miliscola	NA	40.7883	14.065	III
Ponza	LT	40.8858	12.9667	III
Monte Cavo	RM	41.7511	12.7097	II-III
Roma	RM	41.8953	12.4822	II
Cercola	NA	40.8558	14.3553	Risentito
Salerno	SA	40.6786	14.7653	Risentito

Tabella 1.2-2. Intensità osservate per il terremoto del 28 luglio 1883 (Guidoboni et al., 2007).

1.3 Sismicità recente dell'isola d'Ischia

Dal punto di vista sismico, Ischia è caratterizzata da una sismicità abbastanza rara e di bassa magnitudo con alcuni eventi che hanno raggiunto magnitudo medio-basse. La gran parte della sismicità storica, localizzata solo sulla base degli effetti al suolo e dei danni, è concentrata nel settore nord-occidentale dell'isola, tra i comuni di Casamicciola e Lacco Ameno, area in cui è stato localizzato l'evento di massima magnitudo avvenuto il 28 luglio 1883 ($M_w=4.3$; catalogo CPTI15 (Rovida et al., 2016).

Con lo sviluppo e il potenziamento della Rete Sismica di Monitoraggio è stato possibile aumentare il livello di detezione registrando e localizzando anche eventi di bassa magnitudo. In ogni caso, negli ultimi anni la sismicità si è mantenuta su livelli decisamente bassi sia come frequenza che come energia. In figura 1.3-1 sono riportate le localizzazioni degli eventi registrati dal 1999.

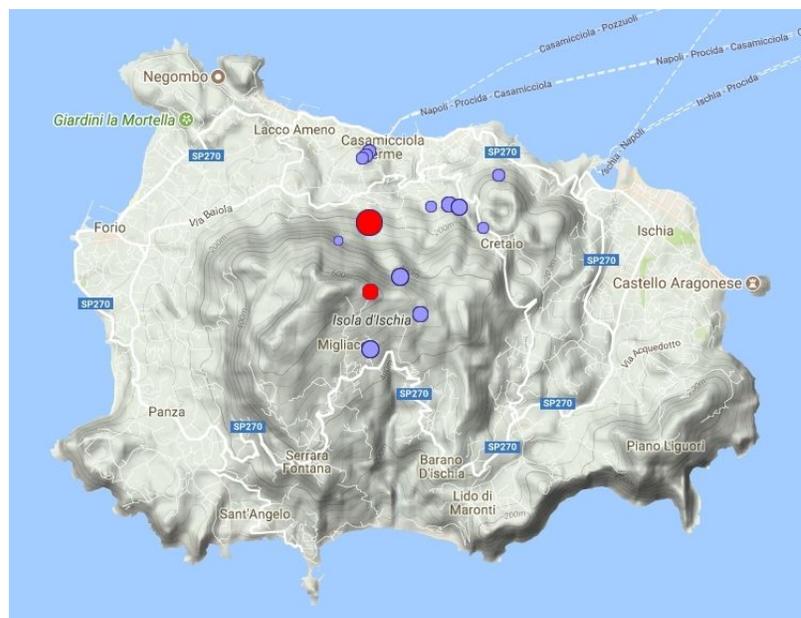


Figura 1.3-1. Localizzazioni dei terremoti ad Ischia nel periodo 1999-2017. In rosso gli eventi del 21/08/2017 ($M_d=4.0$) e del 23/08/2017 ($M_d=1.9$).

Nel grafico di figura 1.3-2 è mostrata la frequenza sismica dei terremoti registrati a Ischia a partire dal 1999. Da notare che a causa della loro bassa energia non è stato possibile localizzare tutti i terremoti registrati in quanto per la maggior parte rilevati da una o massimo due stazioni.

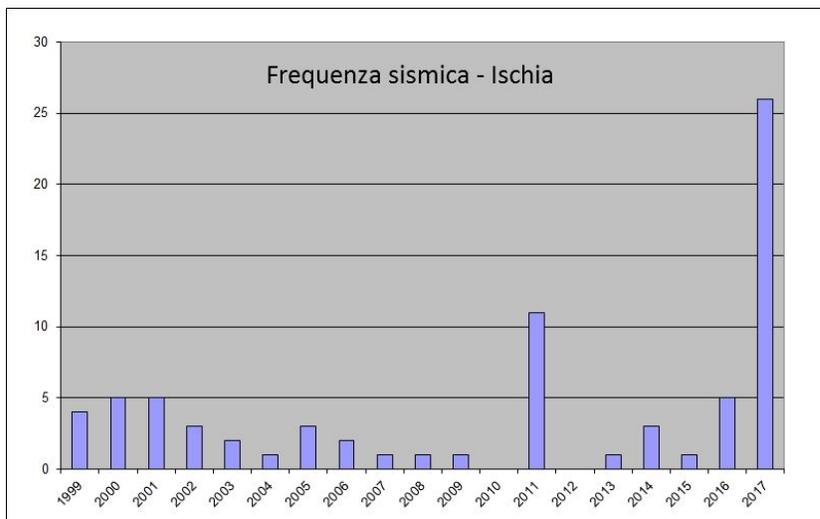


Figura 1.3-2. Frequenza sismica dei terremoti registrati ad Ischia dal 1999 al 2017.

Anche l'energia dei terremoti registrati a Ischia si è mantenuta su livelli molto bassi fino all'evento del 21 agosto 2017 (Fig. 1.3-3).

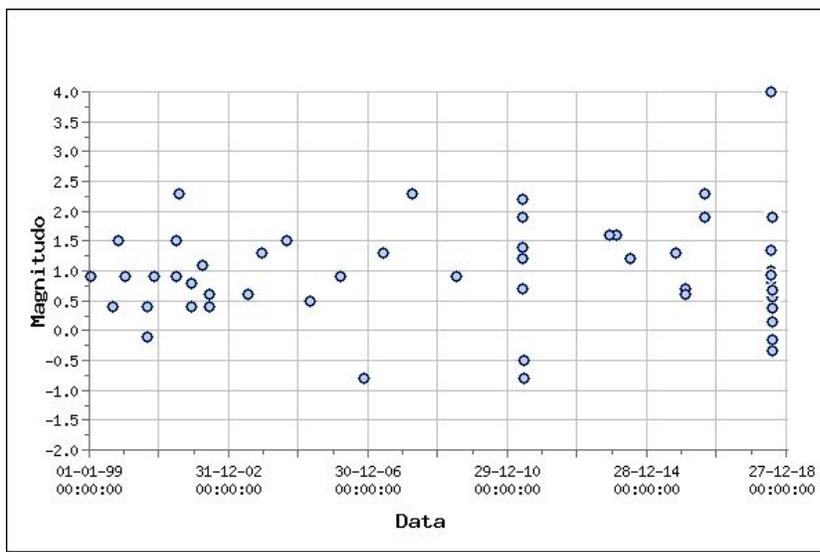


Figura 1.3-3. Distribuzione temporale della magnitudo degli eventi registrati a Ischia nel periodo 1999-2017.

Altra caratteristica dei terremoti che vengono localizzati sull'isola d'Ischia è la superficialità degli ipocentri (Fig. 1.3-4). Ciò è dovuto alla presenza di strutture sismogenetiche a bassa profondità che bordano l'horst vulcano-tettonico del M. Epomeo o insistono lungo i suoi versanti.

Questa caratteristica è la causa principale dell'avvertibilità da parte della popolazione anche di eventi di magnitudo inferiori a 2.4, magnitudo massima osservata dal 1999 prima della sequenza iniziata il 21 agosto 2017.

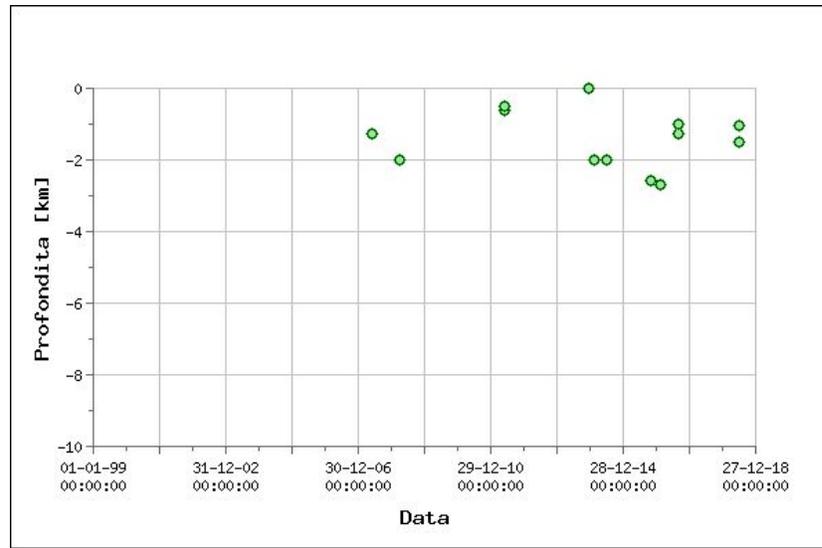


Figura 1.3-4. Distribuzione temporale delle profondità ipocentrali dei terremoti localizzati ad Ischia nel periodo 1999-2017.

In conclusione, a partire dalla seconda metà degli anni '90 da quando cioè sono disponibili dati strumentali affidabili della sismicità dell'isola d'Ischia, e fino all'evento del 21 agosto 2017, il livello di attività sismica rilevato è stato molto basso con solo tre eventi che hanno raggiunto una magnitudo massima di 2.4.

1.4 Sorgenti sismogenetiche

La sorgente sismogenetica che si presume responsabile dei più forti terremoti dell'isola di Ischia, e segnatamente di quello del 28 luglio 1883, è caratterizzata nel Database delle Sorgenti Sismogenetiche dell'INGV (DISS; <http://diss.rm.ingv.it/diss/>). La sorgente, denominata ITIS068-Casamicciola Terme, è stata realizzata nel 2004 e da allora progressivamente aggiornata. Analogamente alle altre sorgenti contenute nel DISS, è parametrizzata e corredata da una esaustiva descrizione, da immagini tratte dalla letteratura disponibile e da una ricca bibliografia. La rappresentazione della sorgente Casamicciola Terme (si veda Fig. 1.4-1) è visualizzabile tramite Web GIS (<http://diss.rm.ingv.it/dissmap/dissmap.phtml>) o Google Maps. I suoi parametri - con tutte le

relative informazioni di corredo - possono essere visualizzati direttamente dalla pagina web:

http://diss.rm.ingv.it/dissnet/CadmoDriver?_action_do_single=1&_state=find&_token=NULLNULLNULLNULL&_tabber=0&_page=pGGSources_d&IDSource=ITIS068



Figura 1.4-1 La sorgente sismogenetica proposta per il terremoto del 1883 è una faglia con direzione NE-SW che delimita a nord-ovest il rilievo del Monte Epomeo. Si tratta di un elemento molto superficiale, con dip elevato e cinematica estensionale pura. La sorgente ITIS068 ha una lunghezza di 5 km e una larghezza di 3.5 km. Queste dimensioni sono coerenti con una Mw di 5.4.

La sorgente proposta appare in buon accordo con l'evento del 21 agosto scorso, dopo averla scalata opportunamente per un terremoto di magnitudo sensibilmente più bassa di quella dell'evento del 1883. Va ricordato a questo proposito che, oltre a causare ad Ischia effetti enormemente più devastanti di quello del 21 agosto scorso, il terremoto del 1883 fu avvertito distintamente a Napoli e debolmente in altre località, mentre il terremoto del 21 agosto è stato debolmente avvertito solo nell'area flegrea.

Lo scuotimento dovuto al terremoto del 1883 causò la caduta di frane e la formazione di spaccature nel terreno, soprattutto nel versante nord-occidentale del Monte Epomeo, a ulteriore dimostrazione della maggiore energia sprigionata rispetto a quella che ha caratterizzato il terremoto del 21 agosto scorso. Alcune fumarole aumentarono la loro attività, altre la interruppero. In mare, di fronte alla costa occidentale, si sollevò in superficie una grande quantità di fango. Nella stessa area fu segnalato un sollevamento della costa (De Rossi, 1884; Guidoboni et al., 1997). In generale si osserva come sia il versante meridionale sia il versante nord-occidentale del Monte Epomeo, il rilievo più elevato dell'isola (787 m s.l.m.), siano caratterizzati da una diffusa franosità attiva.

Come abbiamo visto nel Paragrafo 1.1 l'area vulcanica attiva dell'Isola d'Ischia è localizzata all'estremità nord-occidentale della depressione Plio-Quaternaria della Piana Campana, ed è caratterizzata da un'importante attività idrotermale. La Piana Campana è caratterizzata

da una tettonica estensionale delimitata da fratture con direzione NE-SW (Vezzoli, 1988). L'isola di Ischia è la parte sommitale emersa di un ampio complesso vulcanico localizzato lungo questo trend NE-SW, che alcuni autori hanno interpretato come costituito da *transfer faults* sub-verticali interessate dalla risalita di magma (Acocella e Funiciello, 1999).

I depositi più antichi dell'isola (130-150 ka) affiorano lungo la costa, mentre l'eruzione più recente (colata lavica dell'Arso) si è verificata nel 1302 AD (Vezzoli, 1988). La storia dell'Isola d'Ischia è stata caratterizzata dall'interazione tra la tettonica, il vulcanismo e i diffusi fenomeni di instabilità dei versanti.

Come già accennato in precedenza, l'aspetto più caratteristico della evoluzione recente dell'isola di Ischia è il fenomeno della "risorgenza", ossia quel meccanismo che ha portato all'emersione della caldera del Monte Epomeo. In passato si attribuiva l'esistenza dell'isola di Ischia ad un "horst vulcano-tettonico" delimitato da faglie normali (e.g. Vezzoli, 1988) con un basculamento verso SE (e.g. Rittmann e Gottini, 1980). Oggi in letteratura viene comunemente accettata l'intrusione di nuovo magma quale causa del sollevamento del fondo della caldera del Tufo Verde del Monte Epomeo. La risorgenza ha interessato la parte centrale dell'isola attraverso la riattivazione di strutture tettoniche regionali ad andamento NW-SE e NE-SW, e attraverso la generazione di nuove strutture direttamente connesse con la vulcano-tettonica (Orsi et al., 1991). L'entità di tale sollevamento è stimata dell'ordine di 900-1.100 m. Né l'epoca di inizio né quella di eventuale conclusione di questa fase di sollevamento sono ben vincolate. Il fenomeno del sollevamento collegato alla risorgenza ha notevolmente contribuito a modellare i versanti dell'isola e a causarne la forte instabilità (De Vita et al., 2006). Sappiamo inoltre come la sismicità abbia spesso attivato delle frane (De Rossi, 1884).

Carlino et al. (2006) hanno invece proposto che sia la sismicità, sia l'attività vulcanica dell'isola siano da collegare alla presenza di un laccolite del diametro di circa 10 km, localizzato alla profondità di 1 km. L'Isola d'Ischia è caratterizzata da quattro principali sistemi di faglie: a) un sistema con direzione da ENE-WSW a E-W localizzato a nord del Monte Epomeo; b) un sistema con direzione NE-SW nel settore orientale; c) un sistema NW-SE nella parte sud-occidentale; d) un sistema orientato da NNW-SSE a N-S nel lato est ed ovest dell'isola (Vezzoli, 1988).

La localizzazione della sorgente *ITIS068-Casamicciola Terme* è stata dedotta dalle conoscenze geologiche disponibili sul blocco risorgente del Monte Epomeo e dal trend strutturale regionale. La letteratura mostra infatti un generale accordo sulla presenza di importanti faglie estensionali, ad alto angolo e orientate NE-SW, che delimitano il blocco risorgente dell'isola. La localizzazione della sorgente è inoltre in ottimo accordo con la distribuzione delle intensità macrosismiche valutate per il terremoto del 1883. I cataloghi storici documentano come la parte settentrionale e occidentale dell'isola siano le aree caratterizzate da maggiore sismicità.

Va sottolineato come nella parametrizzazione della sorgente si è scelto di non utilizzare la magnitudo proveniente dai cataloghi storici disponibili nel 2004 e negli anni successivi (ossia Mw 5.8, secondo CPTI04, CPTI11 e SHEEC; Me 5.8 secondo CFTI4med), ma una magnitudo inferiore. L'esperienza mostra infatti che utilizzando nelle aree vulcaniche le formule empiriche valide per i cosiddetti "terremoti tettonici" si ottiene una sovrastima dei

valori della magnitudo. Come visto nel paragrafo 1.2, il catalogo CPT115 assegna all'evento del 28 luglio 1883 una M_w pari a 4.3 sulla base della recente applicazione ai terremoti di Ischia di una relazione empirica messa a punto per i terremoti etnei (Azzaro et al., 2011). La localizzazione e i parametri geometrico-cinematici della sorgente *Casamicciola Terme* sono in accordo con i dati batimetrici e i dati dedotti dai profili a riflessione sismica dell'offshore della parte occidentale dell'Isola d'Ischia (Bruno et al., 2002; si veda il Par. 1.1). La profondità massima della sorgente è in accordo con l'elevatissimo gradiente geotermico dell'area. Le dimensioni della sorgente sono dedotte dalle usuali relazioni empiriche tra magnitudo e dimensioni della faglia (Wells and Coppersmith, 1994). In definitiva, come sorgente del terremoto del luglio 1883 viene proposta una faglia molto superficiale, caratterizzata da cinematica estensionale pura, con una orientazione $N235^\circ$ (NE-SW) e una pendenza ad alto angolo verso nord-ovest. In sintesi, la sorgente ITIS068-*Casamicciola Terme* mostra un buon accordo con la geologia nota, con la batimetria *offshore* e con le attuali conoscenze del blocco risorgente dell'Epomeo.

1.5 Profondità della transizione fragile-duttile

L'area ha uno strain rate di circa 70 nanostrain (Devoti et al., 2017) e, premesso che il flusso di calore può essere fortemente depresso dalla circolazione dei fluidi negli acquiferi superficiali, può essere interpretato un flusso di calore variabile tra 100 e 200 mW/m^2 (Corrado et al., 1998; Carlino et al., 2015).

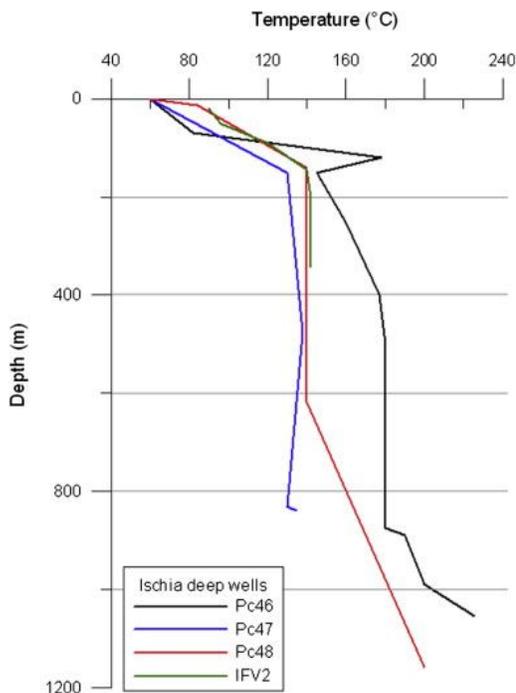


Fig. 1.5-1. Variazione della temperatura in profondità sotto Ischia misurata durante la perforazione di pozzi profondi dell'AGIP (da Carlino et al., 2014).

Assumendo un flusso di calore con 100, 120, 150 e 200 mW/m², la transizione fragile/duttile (brittle-ductile transition, BDT) ha le seguenti profondità:

- 100 mW/m² - BDT 6 km
- 120 mW/m² - BDT 5 km
- 150 mW/m² - BDT 4 km
- 200 mW/m² - BDT 3 km

Considerando che un valore compreso tra 150 e 200 mW/m² è probabilmente realistico, la BDT potrebbe essere anche a meno di 3-4 km nell'area epicentrale, posizionandosi a livelli più profondi allontanandosi verso le zone a nord dove il flusso diminuisce drasticamente e la BDT potrebbe approfondirsi a oltre 6-7 km. La superficialità della BDT è compatibile con la stima della profondità ipocentrale elaborata per il mainshock Md 4 del 21 agosto 2017 alle ore 20.57.

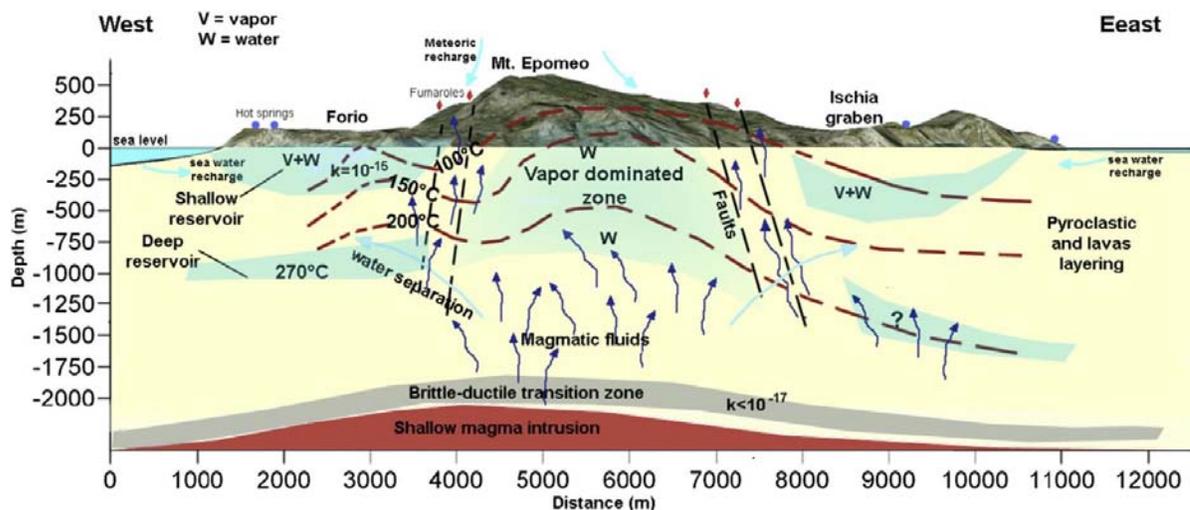


Fig. 1.5-2. Interpretazione della distribuzione dei fluidi idrotermali e della transizione fragile-duttile sotto l'Isola d'Ischia secondo Carlino et al. (2014).

2. Le reti di monitoraggio INGV

Il monitoraggio geofisico dell'isola d'Ischia viene effettuato con Reti Permanenti (Sismica, GPS, Tiltmetrica) e campagne periodiche di misura (Gravimetrica, Livellazioni di precisione) e un Mareografo in via sperimentale (Figura 2-1).



Figura 2-1. Reti di Monitoraggio Geofisico sull'isola d'Ischia.

Rete Sismica Permanente

Attualmente la Rete Permanente di monitoraggio sismico di Ischia conta 4 siti di installazione (Figura 2-2, Tabella 2-1). 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 2-1 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, basate sull'acquisitore GILDA, sono 3.

I sensori che equipaggiano le stazioni digitali sono i seguenti: 3 velocimetri a larga banda (BroadBand: 0.016-50 Hz) e un accelerometro.



Figura 2-2. 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	40.7468N 13.9014E 123 m	Ischia Osservatorio di Casamicciola	1993 9/2/2011	MarkL4-3C Guralp CMG-40T 60s Episensor ES-T	Analogica GILDA	Radio UHF Analogica ADSL
FO9	40.7115N 13.8551E 234 m	Forio Punta Imperatore	1995 Ottobre 2009	MarkL4-3C Guralp CMG-40T 60s	Analogica GILDA	Radio UHF Analogica Wi-Fi
IMTC	40.7209N 13.8758E 209 m	Forio Monte Corvo	17/4/2015	Guralp CMG-40T 60s	GILDA	Wi-Fi

Tabella 2-1. Stato della Rete Sismica di Ischia.

Rete GPS

Sull'isola di Ischia sono operative sei stazioni GPS (Figura 2-3, Tabella 2-2), mentre una stazione è in funzione sull'isola di Procida. Su tutti i siti sono operativi ricevitori di ultima generazione GR10 o della serie GRX1200PRO. Solo sull'isola di Procida è operativo un ricevitore di vecchia generazione RS500. Le stazioni sono alimentate principalmente tramite rete elettrica, solo i siti di Santantuono (SANT) e Monte Epomeo (MEPO) sono attrezzati con alimentazione a pannelli solari.

I sistemi di trasmissione attualmente in uso sono principalmente con connettività UMTS/4G (4 siti), mentre gli altri due trasmettono rispettivamente via ADSL e via Wi-Fi. Solo sull'isola di Procida, è attiva ancora una linea GSM.



Figura 2-3. Mappa Rete GPS di Ischia.

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
AQMO	40.7361N 13.9346E	Acquedotto Montagnone (Ischia)	2001	LeicaGR10 LEIAT504 LEIS	30sec	UMTS/4G
FORI	40.7369N 13.8557E	Municipio di Forio d'Ischia	1999	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	30sec	Wi-Fi
MEPO	40.7309N 13.9018E	Monte Epomeo	2017	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	30sec	UMTS/4G

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	UMTS/4G
SERR	40.7116N 13.8952E	Serrara (Ischia)	2001	Leica GR10 LEIAT504 LEIS	30sec	UMTS/4G
IPRO	40.76516N 14.0239E	Procida	2003	Leica RS500 LEIAT504 LEIS	30sec	GSM

Tabella 2-2. Stato della Rete GPS ad Ischia.

Rete Tiltmetrica

Attualmente la Rete Tiltmetrica dell'isola di Ischia (Figura 2-4) consiste di 3 stazioni (le cui specifiche sono riportate in Tabella 2-3), attrezzate con sensori digitali da pozzo, mod. Lily (Jewell Instrument) con passo di acquisizione ogni minuto. Tutte le stazioni trasmettono quotidianamente all'INGV - Centro di Monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano i file dati.

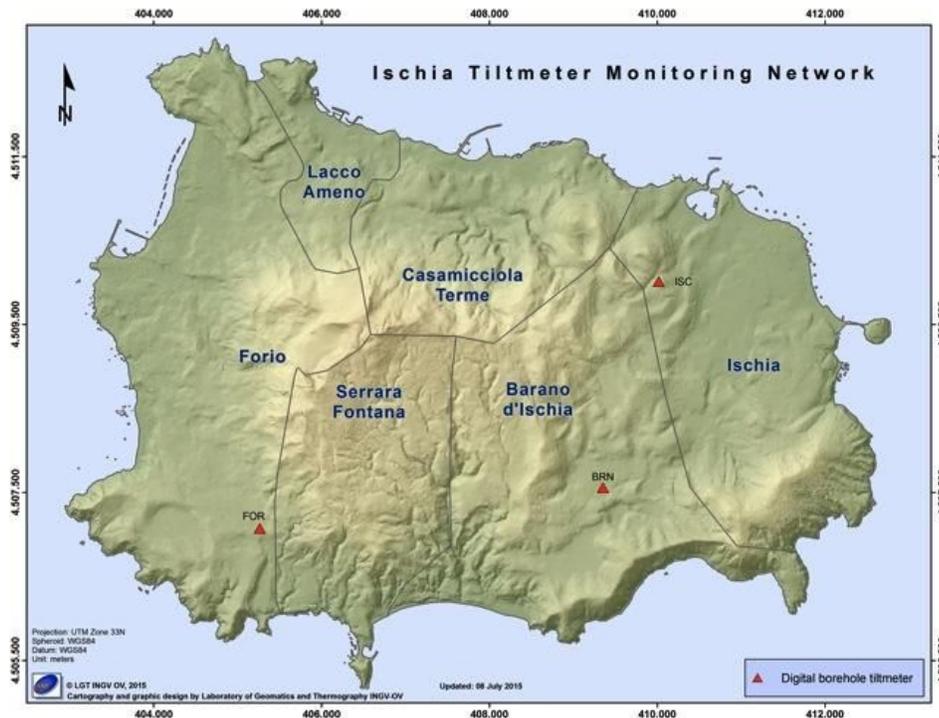


Figura 2-4. Mappa Rete Tiltmetrica di Ischia.

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 13.878%E	Scuola D'Abundo, Forio	Jewell Instrument mod. Lily	-27 metri	1'	Router UMTS

Tabella 2-3. Stato della Rete Tiltmetrica di Ischia.

Rete Gravimetrica

La Rete Gravimetrica dell'isola di Ischia è composta da 26 punti-stazione (Figura 2-5).



Figura 2-5. Mappa della Rete Gravimetrica di Ischia.

Rete di Livellazione

La Linea di Livellazione di precisione dell'isola d'Ischia è composta da 257 caposaldi su un percorso di circa 100km (Figura 2-6).



Figura 2-6. Linea di livellazione di precisione all'isola d'Ischia.

Le stazioni temporanee installate dopo l'evento del 21 agosto dal Gruppo SISMICO

A seguito del terremoto di magnitudo 4.0 che ha colpito l'isola di Ischia il giorno 21 agosto 2017 alle ore 18:57 UTC si è proceduto all'installazione, in data 26/08/2017, di due stazioni temporanee della rete mobile dell'Osservatorio Vesuviano nei comuni di Lacco Ameno e Casamicciola Terme (Tabella 2-4), a supporto delle stazioni della rete permanente (Figura 2-7). In data 31/08/2017 ulteriori due stazioni sono state installate sempre nella zona nord dell'Isola ed è stato aggiunto un modulo Trident Nanometrics con accelerometro Episensor Kinematics FBA-EST alla T1362.

Sigla	Comune/Frazione	Provincia	Lat	Lon	Quota (m)	Start	Stop
T1361	Lacco Ameno / Parco Negombo	NA	40.75669	13.87889	7	26/08/17	----
T1362	Casamicciola T. Via Pera di Basso	NA	40.73456	13.91003	303	26/08/17	----
T1363	Casamicciola T. Via Cretaiò	NA	40.74550	13.91351	50	31/08/17	----
T1364	Lacco Ameno / Hotel Grazia	NA	40.74261	13.89047	129	31/08/17	----

Tabella 2-4.



Figura 2-7. Ortofoto dell'isola d'Ischia. I triangoli gialli identificano le stazioni della rete permanente dell'Osservatorio Vesuviano; i quadrati gialli identificano le stazioni temporanee della rete mobile.

Stazione T1361

La stazione T1361 è stata installata nel Parco del Negombo nel comune di Lacco Ameno (NA). Questa stazione è composta da un acquirente Nanometric – Taurus, con frequenza di campionamento pari a 100 campioni al secondo (sps) e un velocimetro a corto periodo Lennartz 3Dlite. La stazione (Figura 2-8), in configurazione standalone, ha iniziato l'acquisizione alle ore 09:20 UTC del giorno 26/08/2017.

Stazione T1362

La stazione T1362 è stata installata nell'Agriturismo Tenuta Pera di Basso, in Via Pera di Basso, nel comune di Casamicciola Terme (NA). Questa stazione è composta da un acquirente Nanometric – Taurus, con frequenza di campionamento pari a 100 campioni al secondo (sps) e un velocimetro a corto periodo Lennartz 3Dlite. La stazione (Figura 2-9), in configurazione standalone, ha iniziato l'acquisizione alle ore 11:40 UTC del giorno 26/08/2017.

Stazione T1363

La stazione T1363 è stata installata in Via Cretaio nel comune di Casamicciola Terme (NA). Questa stazione è composta da un acquirente MARS Lite Lennartz, con frequenza di campionamento pari a 125 campioni al secondo (sps) e un sismometro a corto periodo Lennartz 3Dlite. La stazione (Figura 2-10), in configurazione standalone, ha iniziato l'acquisizione alle ore 09:50 (UTC) del giorno 31/08/2017.

Stazione T1364

La stazione T1364 è stata installata nell'Hotel Grazia Terme nel comune di Lacco Ameno (NA). Questa stazione è composta da un acquirente Nanometric – Taurus, con frequenza di campionamento pari a 100 campioni al secondo (sps) e un sismometro a corto periodo Lennartz 3Dlite. La stazione (Figura 2-11), in configurazione “stand alone”, ha iniziato l'acquisizione alle ore 12:00 UTC del giorno 31/08/2017 ed è alimentata con pannello solare.



Figura 2-8. La stazione T1361.



Figura 2-9. La stazione T1362.



Figura 2-10. La stazione T1363.



Figura 2-11. La stazione T1364.

3. Caratterizzazione dell'evento del 21 agosto 2017

3.1 Localizzazione dell'evento e calcolo della magnitudo

La sera del 21 agosto 2017 ad Ischia si è verificato un evento sismico $M_D=4.0$ alle 18:57 UTC (20:57 ora italiana) che è stato seguito nei giorni successivi da una trentina di eventi di magnitudo molto bassa ($M_D < 2$).

Nei primi minuti dopo l'accadimento del terremoto nella sala di monitoraggio sismico di Roma si è seguito il protocollo 2'-5'-30' di comunicazione verso la sala Italia del Dipartimento di Protezione Civile (DPC).

La sala di monitoraggio di Roma riceve ed analizza le stazioni della Rete Sismica Nazionale che per l'area più vicina all'epicentro consta di tre stazioni nell'isola di Ischia, una in quella di Ventotene e diverse stazioni nella zona dei Campi Flegrei. Il picking delle fasi P è stato abbastanza agevole mentre le fasi S erano molto complesse e scarsamente riconoscibili. Il tentativo di identificare le fasi S ha richiesto molti minuti e la quasi totalità del tempo a disposizione è stato utilizzato a questo scopo e alla successiva fase di controllo dei residui. L'assenza di fasi S alla stazione ad Ischia (IOCA, velocimetro saturato, IMTC e IFOR, le altre due stazioni in trasmissione da Ischia alla sala di Roma, hanno interrotto il collegamento) ha determinato la stima di una profondità ipocentrale poco vincolata. Essendo la stima epicentrale ottenuta localizzata in mare, a circa 3 km dalla costa dell'isola di Ischia ed essendo il GAP azimutale della localizzazione alto, come sempre accade quando gli eventi si localizzano al margine della rete sismica, è stata scelta la profondità ipocentrale di 10 km. Questa soluzione era suggerita dall'arrivo impulsivo sulla componente verticale di MODR (Mondragone, 45 km a Nord di Ischia nei pressi della Baia Domizia) con scarsi effetti attenuativi e un chiaro impulso Down.

La M_L dell'evento determinata dal sistema automatico e verificata durante la localizzazione è pari a 3.6. Le due figure sottostanti mostrano i valori di M_L calcolati alle singole componenti orizzontali delle stazioni della Rete Sismica Nazionale, la loro distribuzione in classi di magnitudo, istogramma (figura 3.1-1) che ci fornisce anche l'errore di 0.2 sulla stima della M_L , e la loro distribuzione in base alla distanza epicentrale (figura 3.1-2).

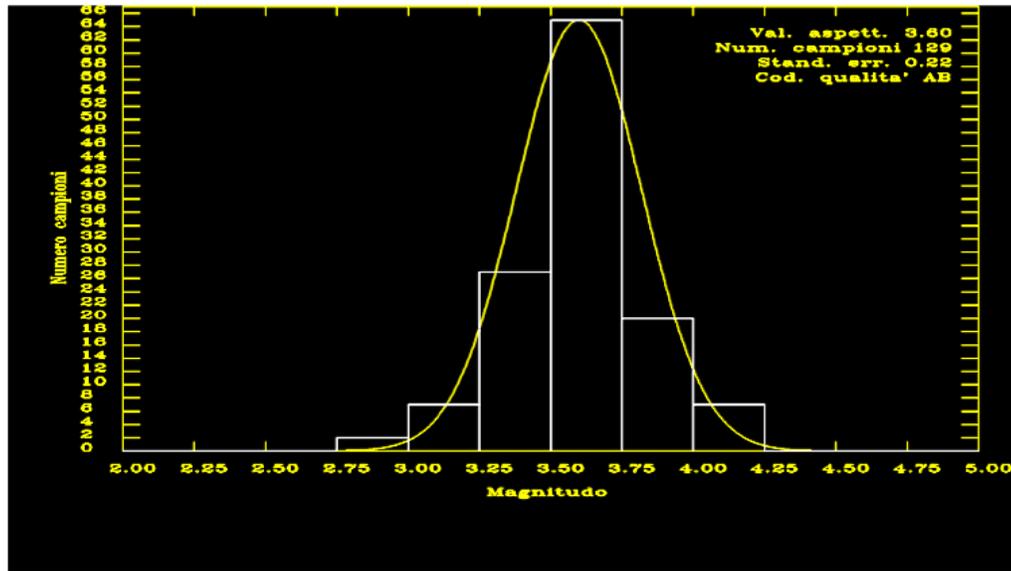


Figura 3.1-1. Il grafico mostra la distribuzione dei valori di magnitudo locale alle stazioni della rete sismica nazionale per il terremoto di Ischia. Il valore di magnitudo di evento risulta da 129 misure (campioni) aventi distribuzione gaussiana con una chiara media intorno a 3.6 e deviazione standard di 0.2.

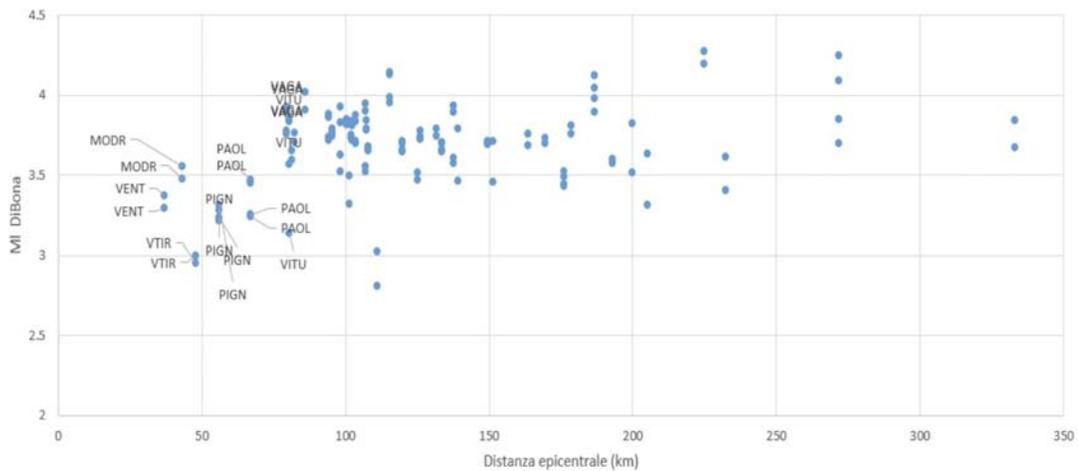


Figura 3.1-2. Magnitudo locale rilevata dalla rete nazionale fino a circa 350 km di distanza e analizzata con il metodo proposto da Di Bona (2016). Si notino i bassi valori di MI nei primi 70 km dovuti alla forte attenuazione legata all'alto flusso di calore dell'area del vulcanismo campano.

In seguito nella sala operativa INGV di Roma, con i dati disponibili, si è provato a fissare la profondità ipocentrale tra 1 e 10 km e si è visto che questo avrebbe spostato di poco l'epicentro di 1 o 2 km in latitudine lungo la costa occidentale dell'isola (vedi figura 3.1-3) modificando in modo poco significativo la qualità della localizzazione.

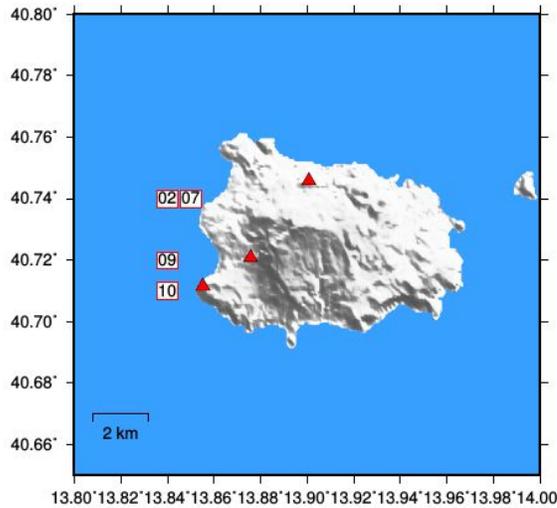


Figura 3.1-3. Le varie posizioni epicentrali fissando la profondità: i quadrati con il bordo in rosso sono gli epicentri con le profondità (in km) fissate al valore scritto nel riquadro stesso (02 comprende gli epicentri a 1 km e 2 km, 07 comprende gli epicentri a 3 4 5 6 e 7 km, 09 comprende gli epicentri a 8 e 9 km).

L'incertezza sulle localizzazioni nella zona di Ischia, così come in molte delle zone costiere italiane, anche in fase di revisione da parte del Bollettino Sismico Italiano (Castellano et al., 2017; Berardi et al., 2016; Battelli et al., 2013), è generalmente maggiore di 3 km (figura 3.1-4).

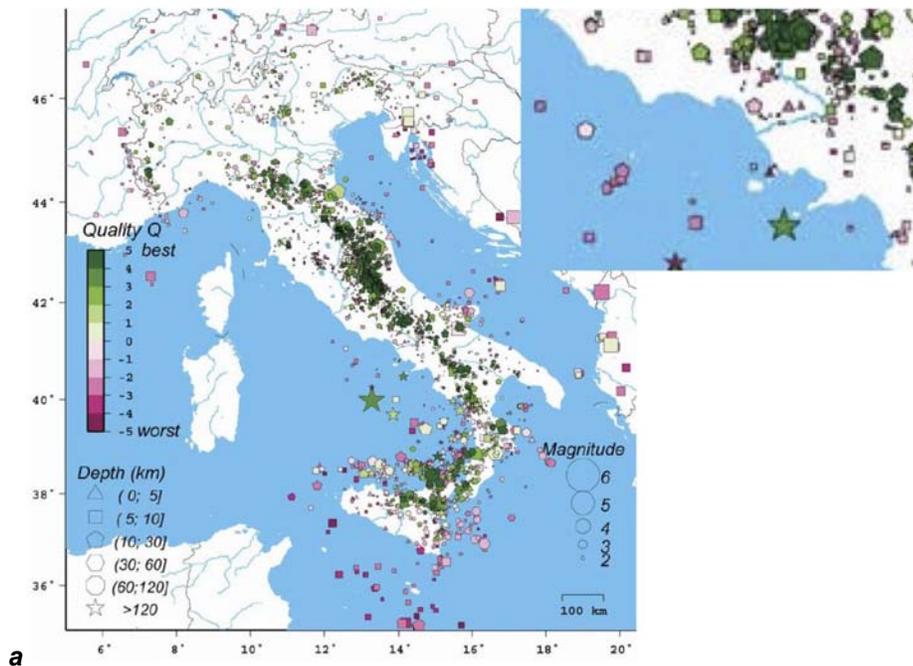


Figura 3.1-4a. La qualità dei dati sismologici è necessariamente più bassa nelle aree marine per l'assenza di stazioni sismiche nei mari Tirreno, Ionio e Adriatico. Nel riquadro in alto a destra si vede come l'area prospiciente a ovest della Campania e il Lazio abbiano una qualità e una precisione della localizzazione conseguentemente inferiore (colori sul rosa), rispetto alle aree peninsulari (colori sul verde); da Battelli et al. (2013).

b

Qualità Q1	RMS pesato	Errore orizzontale	Errore verticale	Numero pesato di fasi (WNP)
A	< 0.45 s	< 2 km	< 4 km	≥ 3
B	< 0.90 s	< 5 km	< 10 km	≥ 3
C	< 1.50 s	< 10 km	< 10 km	≥ 3
D	≥ 1.50 s	≥ 10 km	≥ 10 km	< 3

c

Qualità Q2	Massimo gap azimutale	Distanza stazione più vicina	Numero pesato di fasi (WNP)
A	< 90°	< 10 km o < Depth	≥ 6
B	< 135°	< 20 km o < 2*Depth	≥ 6
C	< 180°	< 100 km	≥ 6
D	≥ 180°	≥ 100 km	< 6

Figura 3.1-4b,c. Tabelle che definiscono la qualità della localizzazioni in base a parametri stabiliti (da Battelli et al., 2013) che definiscono la scala di colore dal rosa al verde della figura precedente. L'RMS pesato di 1.32 s dell'evento Md 4 del 21/08/2018 ore 18:57 (UTC) determina un'incertezza nella localizzazione orizzontale e verticale fino a 10 km. La seconda localizzazione epicentrale a circa 5 km dalla prima stima e la rivalutazione della profondità da 5 a 2 km sono ben al di sotto delle incertezze insite nel dato. Il gap azimutale di 176° indica una qualità di tipo C per la localizzazione dell'evento del 21/08/2018 ore 18:57 (UTC).

Nel frattempo i colleghi della sala di monitoraggio INGV dell'Osservatorio Vesuviano hanno fornito la localizzazione da loro effettuata, che ha preso in considerazione il maggior numero possibile di stazioni (anche le stazioni analogiche) che avevano registrato l'evento, integrando anche le stazioni di FO9 e CAI che si trovano sull'isola di Ischia ed altre nella zona dei Campi Flegrei. Questi dati aggiuntivi hanno portato l'ipocentro a 5 km di profondità e l'epicentro a mare a circa 3 km a NW di Casamicciola.

Inoltre è stata fornita una stima della magnitudo durata M_D pari a 4.0. La localizzazione dell'evento in un'area vulcanica, il vulcano di Ischia, ad una profondità di soli 5 km, quindi all'interno di una porzione della crosta molto superficiale ed eterogenea ci hanno indotti a preferire come stima dell'energia rilasciata dal terremoto la magnitudo durata M_D pari a 4.0. Infatti questa stima è calibrata sulle stazioni della regione vulcanica campana e sulle caratteristiche delle rocce che compongono la crosta di Ischia in termini di velocità delle onde sismiche e di attenuazione delle stesse. Il nuovo dato di localizzazione magnitudo è stato pubblicato su web.

In generale le diverse stime di magnitudo, M_L , M_D , M_W , non coincidono esattamente tra di loro (Castello et al., 2007); in passato una delle regressioni tra M_L , M_D calcolata per tutta l'area italiana mostrava che la magnitudo durata è generalmente più alta della magnitudo locale (figura 3.1-5).

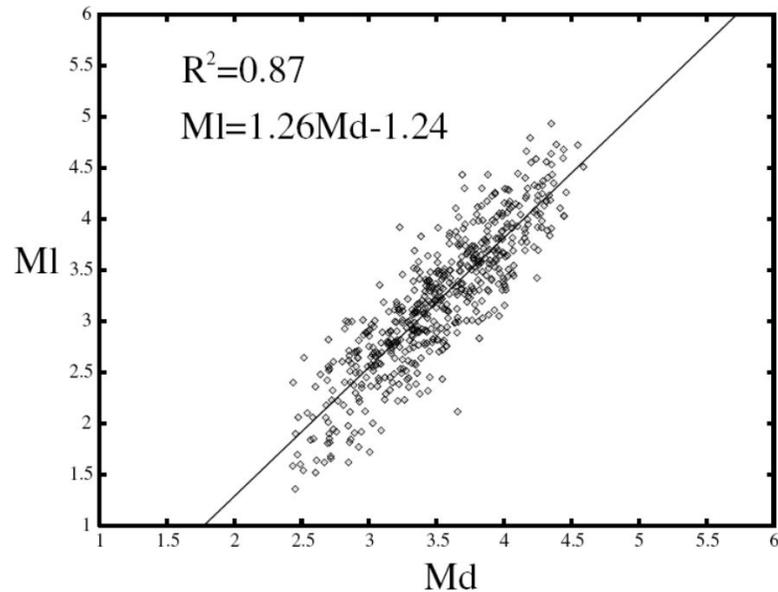


Figura 3.1-5. Regressione lineare tra la magnitudo MI e Md calcolata usando la formula proposta da Console et al. (1989) come riportata in Gasperini (2002): pur essendoci una certa dispersione, la regressione indica che la Md è mediamente circa il 10% più alta rispetto alla MI, come osservato nell'evento del 21 agosto.

Studi in aree vulcaniche (Petrosino et al., 2008) individuano un pattern complesso per gli andamenti di MI, Md ed Mw in funzione della durata del segnale, evidenziando la peculiarità delle relazioni tra le diverse scale di magnitudo per le aree vulcaniche.

A partire dal giorno seguente sono state rianalizzate le tracce del terremoto ed è iniziato un processo di elaborazioni successive per ottenere la localizzazione più affidabile, anche in considerazione delle informazioni relative alla distribuzione degli effetti al suolo e dei danni.

Il picking è stato effettuato su tutti i sismogrammi delle Reti di Ischia, Campi Flegrei e Vesuvio che avevano registrato l'evento. Per le localizzazioni sono stati utilizzati i sismogrammi delle stazioni presenti sull'isola (IOCA/OC9, CAI e FO9; figura 3.1-2ab) e le tracce migliori delle stazioni presenti nei Campi Flegrei. Il mainshock ha saturato i segnali dei velocimetri in registrazione sull'isola, quindi su queste tracce è stato possibile effettuare solo il picking delle onde P. A questi sono stati aggiunti i picking effettuati sulle stazioni CMIS, CBAC, BAC, ARCO, CFMN, CPOZ, CFB2, CSFT, CSOB e VENT.

La scelta di tali stazioni è avvenuta dopo un'attenta analisi delle caratteristiche delle forme d'onda sia nel dominio dei tempi che in quello delle frequenze (analisi di polarizzazione completa, studio degli spettri e degli spettrogrammi, ecc.) per i diversi dati che si avevano a disposizione dalla rete Flegrea. I dati provenienti dalla rete Vesuviana, dopo aver effettuato le analisi di cui sopra e diversi test di localizzazione, sono stati esclusi.

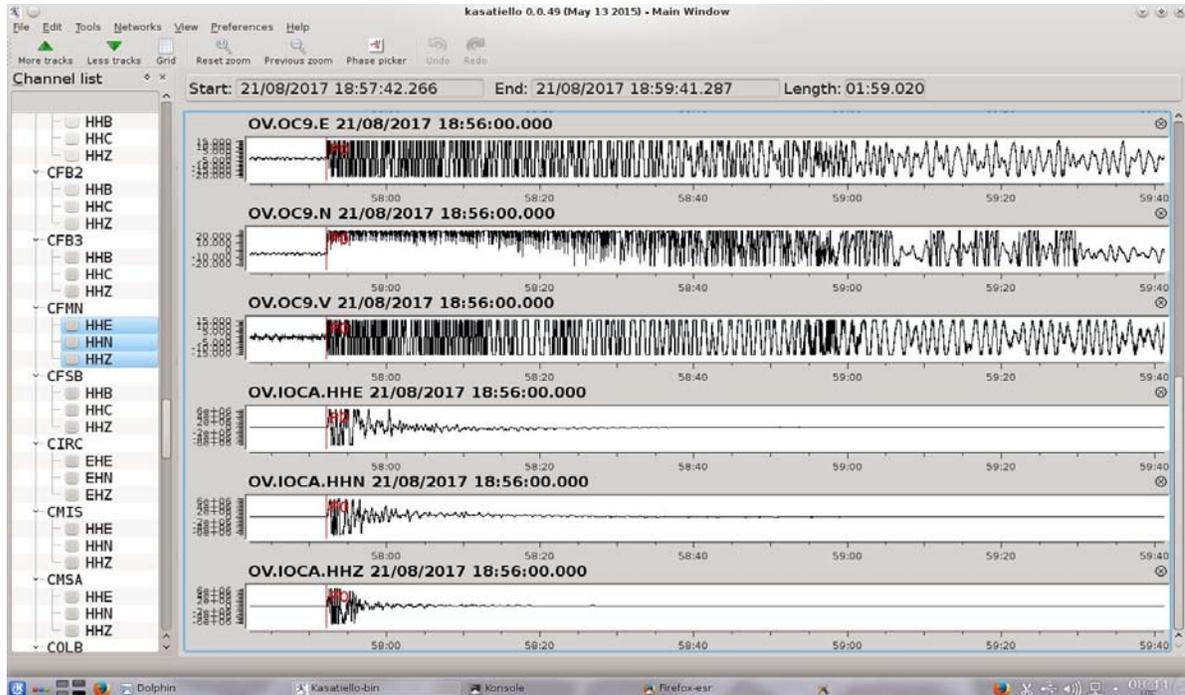


Figura 3.1-2a. Tracce del terremoto del 21/08/2018 18:57 (UTC) registrate alle stazioni presenti sull'isola. L'ampiezza è in count.

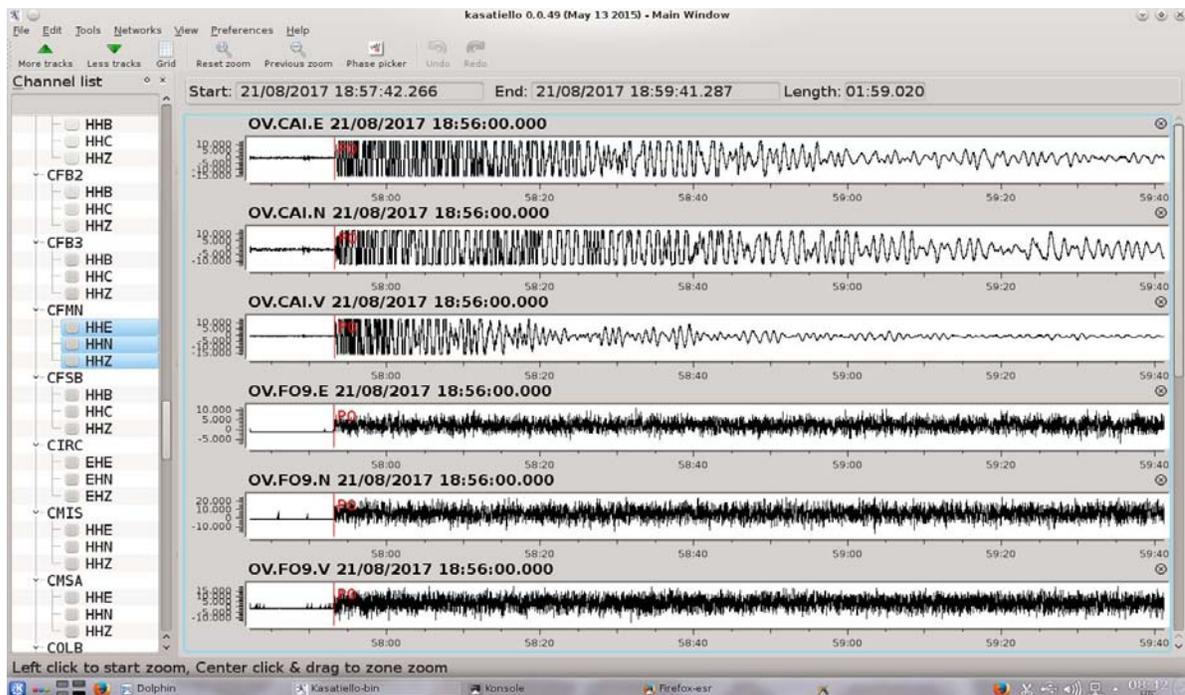


Figura 3.1-2b. Tracce del terremoto del 21/08/2018 18:57 (UTC) registrate alle stazioni presenti sull'isola. L'ampiezza è in count.

Successivamente sono stati elaborati anche i dati dell'accelerometro installato presso il sito di IOCA (figura 3.1-3) ed integrati ai picking dei velocimetri. Questi dati hanno permesso di aggiungere il picking dell'onda S per rilocalizzare l'evento. Il valore della distanza temporale tra l'arrivo dell'onda P e quello dell'onda S registrate su una stazione molto vicina all'evento consente una stima più affidabile della profondità del terremoto.

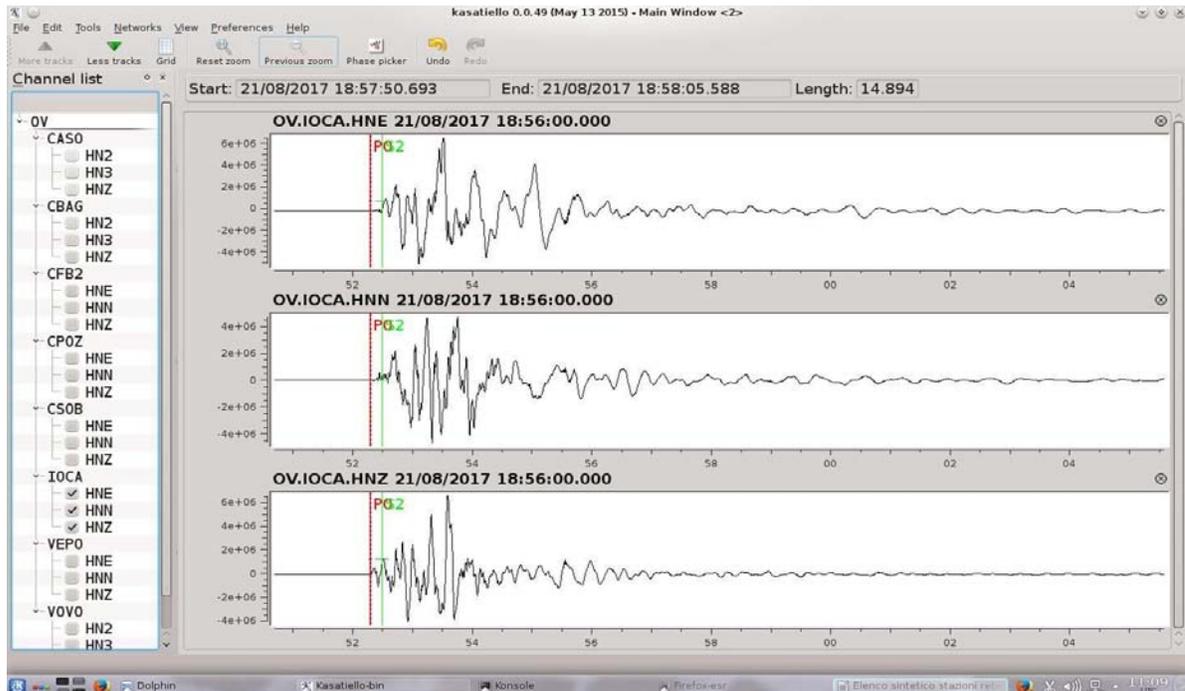


Figura 3.1-3. Traccia del terremoto del 21/08/2018 18:57 (UTC) registrata all'accelerometro IOCA. L'ampiezza è in count.

Sono stati effettuati numerosi test di localizzazione utilizzando di volta in volta diversi gruppi di stazioni, per ottimizzare la copertura azimutale della rete, e diversi modelli di velocità. Le rilocalizzazioni sono state effettuate inizialmente utilizzando il programma NonLinLoc (Lomax et al., 2000) con il modello di velocità 3D per l'area vulcanica napoletana descritto in D'Auria et al. (2008).

Si sono ottenute diverse soluzioni, tutte che indicavano un epicentro sempre a mare ad alcuni chilometri a NW di Lacco Ameno.

C'è da considerare che il modello 3D utilizzato ha un'elevata risoluzione nell'area dei Campi Flegrei e del Vesuvio, perché si basa sui risultati di diverse tomografie sismiche, ma nell'area di Ischia ha una risoluzione minore (1 km) e questo può indurre a soluzioni ipocentrali poco vincolate.

Si è quindi proceduto ad una revisione del modello di velocità 3D per renderlo più rispondente alle strutture cristalline note dell'isola d'Ischia.

Con elaborazioni successive si è ottenuta una serie di nuove localizzazioni. Il risultato più attendibile di questa serie ha indicato una localizzazione ipocentrale tra Lacco Ameno e Casamicciola ($40^{\circ}45.19' 13^{\circ}53.78'$) ad una profondità di 1.97 km (figura 3.1-4).



Figura 3.1-4. Epicentro terremoto del 21 Agosto 2017 ore 18:57 UTC calcolato col programma NonLinLoc ottenuto con elaborazioni successive modificando il modello di D'Auria et al. (2008).

Nonostante i miglioramenti, questo epicentro risultava ancora poco vincolato probabilmente a causa delle forti eterogeneità laterali presenti nel modello 3D. Consci dei limiti del modello 3D per l'area di Ischia, è stato deciso di rilocalizzare nuovamente l'evento utilizzando un modello di velocità a strati piano paralleli con le stesse letture (picking) usate per il programma NonLinLoc.

In questo caso, nella giornata del 24 agosto, sempre dopo un numero rilevante di test sui dati da inserire nella procedura, abbiamo utilizzato il programma HYPO con un modello di velocità 1D adattato al meglio per la struttura crostale dell'isola d'Ischia. Quest'ultima localizzazione è stata ritenuta la più affidabile con i dati a disposizione e quindi l'evento è risultato localizzato nella parte alta del Comune di Casamicciola a circa 1.70 km di profondità (figura 3.1-5).

Con lo stesso algoritmo e modello di velocità è stato rilocalizzato l'evento del 23 agosto 03:04 UTC di Md=1.9 che risulta ubicato nell'area del M. Epomeo a 1.9 km di profondità (figura 3.1-5).

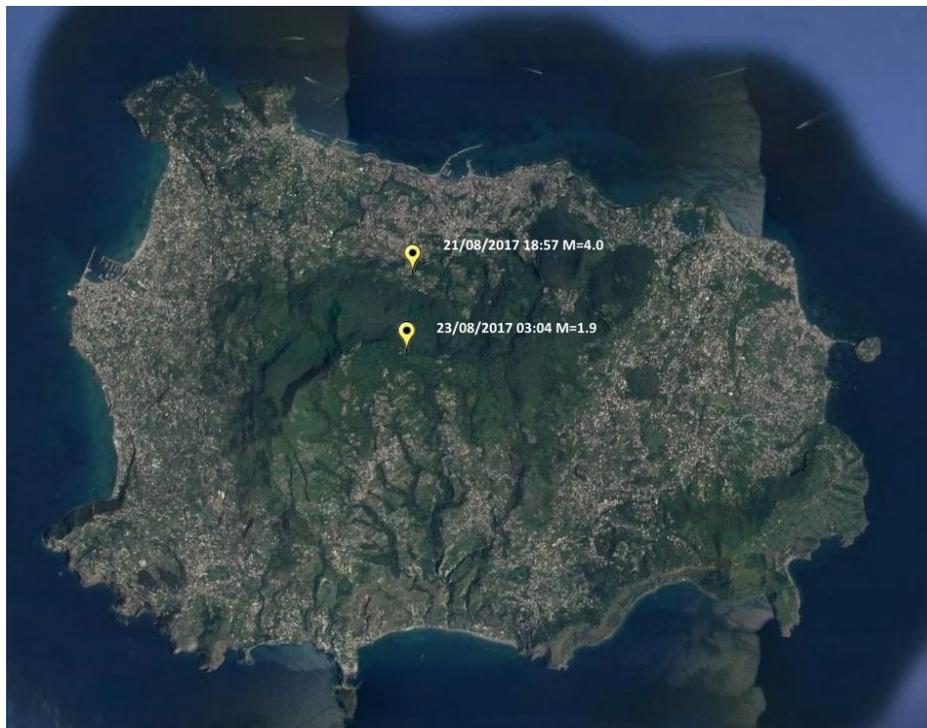


Figura 3.1-5. Rilocalizzazione del mainshock del 21 agosto (Md=4.0) e della replica del 23 agosto (Md=1.9).

L'evento del 21 agosto è stato seguito da 27 repliche (Tabella 3.1-1). Per la maggior parte degli eventi non è stato possibile effettuare la localizzazione in quanto tutti registrati solo a una o due stazioni.

Orario (UTC)	Md	Latitudine (N)	Longitudine (E)	Profondità (km)
21/08				
18.57.52	4.0	40.7388	13.9025	1.73
19.00.42	1.0	--	--	--
19.02.28	1.0	--	--	--
19.38.24	0.6	--	--	--
19.38.38	0.7	--	--	--
19.38.52	0.4	--	--	--
20.48.19	0.8	--	--	--
21.31.24	0.8	--	--	--
22.19.25	0.5	--	--	--
22.19.42	0.2	--	--	--
22.24.04	0.7	--	--	--
22.32.46	0.6	--	--	--
23.09.34	-0.1	--	--	--
23.19.51	0.2	--	--	--
23.20.26	-0.2	--	--	--
22/08				
00.00.17	0.9	--	--	--
03.29.19	0.4	--	--	--

03.57.22	0.7	--	--	--
03.58.00	0.9	--	--	--
04.16.16	0.6	--	--	--
04.17.04	0.6	--	--	--
05.15.10	0.4	--	--	--
07.30.35	0.9	--	--	--
23/08				
03.04.13	1.9	40.7305	13.9025	1.27
04.17.39	1.3	--	--	--
20.30.54	0.8	--	--	--
30/08				
08.49.43	1.5	40.7321	13.9025	2.00
13.30.15	0.9	40.7367	13.8827	1.00

3.1-1. Eventi della sequenza all'isola d'Ischia dal 21 agosto al 30 agosto 2017.

Le analisi effettuate hanno consentito di esprimere una stima affidabile dell'ipocentro del terremoto di Ischia del 21 agosto 2017 considerando tutte le variabili del caso, dai modelli di velocità sempre più attendibili ad un adeguato numero di stazioni che hanno registrato l'evento. La nuova localizzazione è stata comunicata al DPC e pubblicata sul sito INGV il 25 agosto.

3.2 Momento tensore e magnitudo momento

Le inversioni fino ad ora effettuate per ottenere il momento tensore e la Mw del terremoto non forniscono soluzioni stabili, ma confermano preliminarmente una magnitudo momento Mw tra 3.8 e 4.0.

È riportata di seguito la soluzione pubblicata nella pagina CNT, analisi successive per la determinazione del TDMT non hanno dato risultati convincenti. La Mw calcolata risulta 3.8.

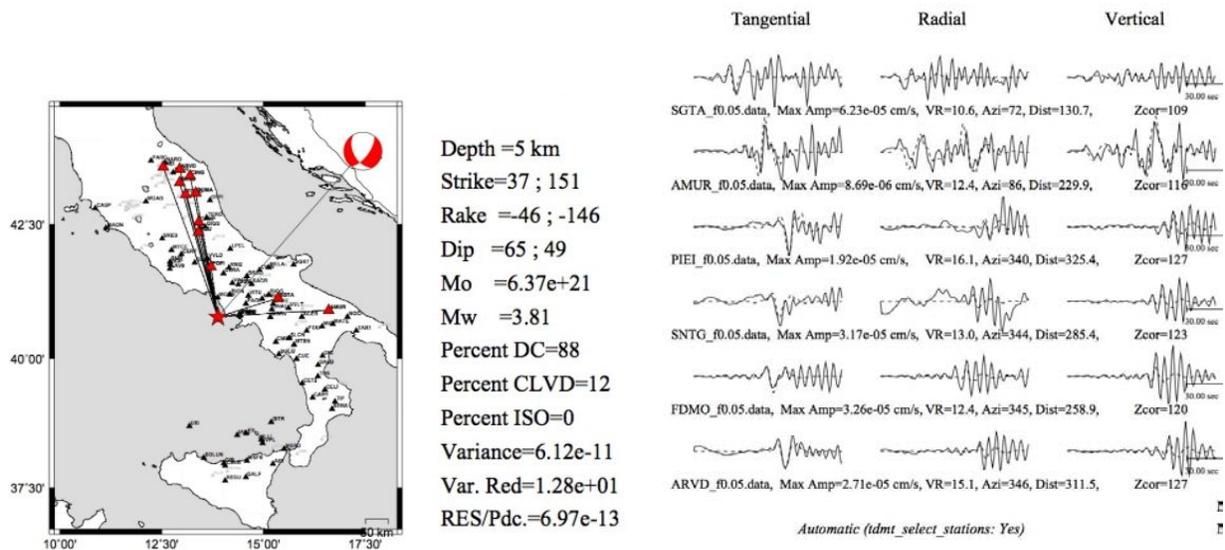


Figura 3.2-1. A sinistra la soluzione automatica del TDMT (<http://cnt.rm.ingv.it/event/16796811>) si mostrano le stazioni utilizzate, e il risultato dell'inversione automatica e a destra i fit tra dato modellato ed osservato.

Una tecnica di inversione del tensore momento molto simile al TDMT (Herrmann, 2013) è stata applicata selezionando solo alcune componenti di stazioni dell'Appennino meridionale e imponendo un meccanismo di doppia coppia puro, i fit delle forme d'onda possono considerarsi accettabili ma i vincoli imposti sono piuttosto restrittivi; in questo caso si ottiene un meccanismo puramente distensivo con piani E-W. La Mw calcolata risulta 4.0 ma la profondità del centroide risulta essere 8 km, incompatibile con la nuova localizzazione superficiale dell'evento.

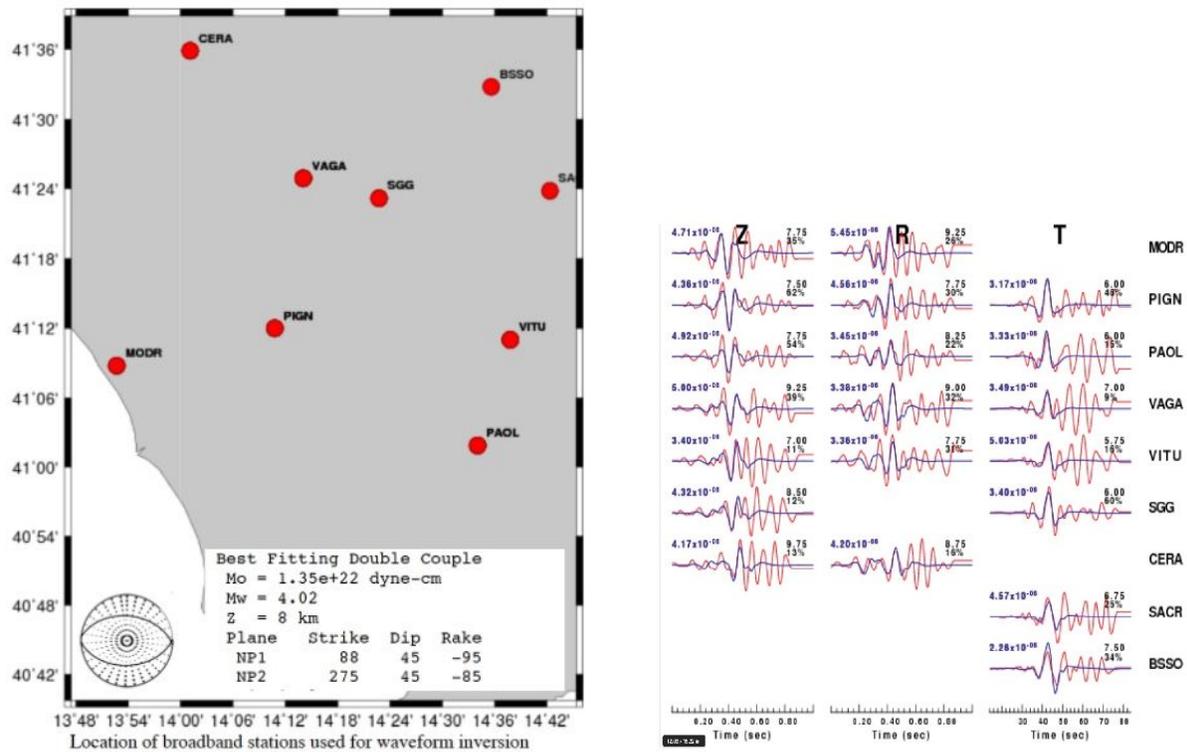
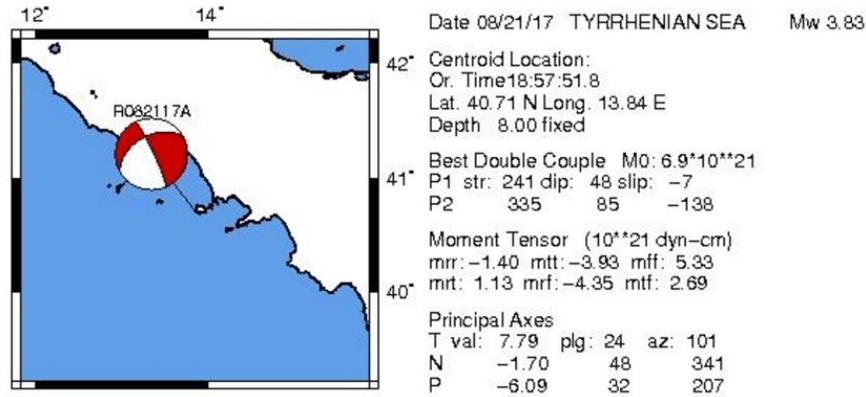
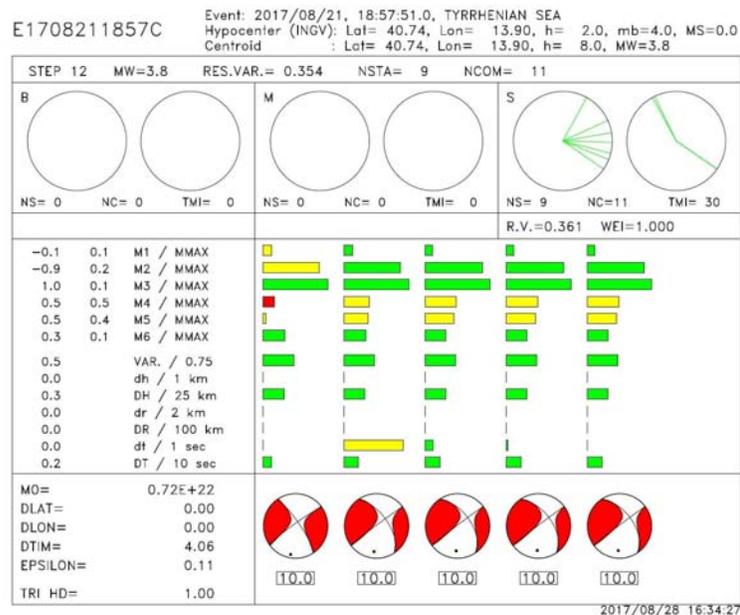


Figura 3.2-2. La figura mostra a sinistra le stazioni utilizzate, e il risultato dell'inversione a stazioni selezionate, e a destra i fit tra dato modellato ed osservato.

Nel calcolo del Regional Centroid Moment Tensor si invertono le forme d'onda filtrate a lungo periodo (più di 35 secondi) e si utilizzano stazioni a distanza regionale. Il risultato ottenuto, considerata la bassa magnitudo dell'evento, è al limite della risoluzione del metodo. Dopo aver determinato la nuova localizzazione si è ricalcolato l'RCMT, che resta comunque un meccanismo con una forte componente trascorrente e una M_w di 3.8.



a



b

Figura 3.2-3. a) RCMT calcolato partendo dalla prima localizzazione dell'evento (<http://autorcmt.bo.ingv.it/quicks.html>). b) Calcolo dell'RCMT a partire dalla nuova localizzazione con profondità ipocentrale ridotta: in alto abbiamo l'ipocentro aggiornato INGV, che per terremoti piccoli coincide con il centroide. La Mw calcolata risulta 3.8. Sono state usate solo onde di superficie e con una distribuzione azimutale un po' scarsa (cerchietto con linee verdi). Le barre verdi indicano le variazioni dei parametri nell'inversione. I 5 momenti tensori in basso sono ciascuno il risultato di un'interazione. L'ultimo a destra è il risultato finale. Che è evidentemente ancora strike-slip. C'è una piccola componente non doppia coppia che potrebbe essere però solo rumore.

3.3 Accelerazioni del suolo

3.3.1 Effetti di sito

Il gruppo INGV Emersito è una task force operativa a livello nazionale finalizzata a svolgere e coordinare le campagne di monitoraggio per gli effetti di sito a seguito di eventi sismici di forte magnitudo, o che comunque hanno dato luogo a un danneggiamento imputabile anche all'amplificazione del moto sismico in superficie.

In occasione della sequenza sismica in corso, iniziata con il terremoto delle ore 20:57 italiane nei pressi dell'isola di Ischia il 21/08/2017, abbiamo effettuato alcune analisi preliminari sulle registrazioni sismiche delle stazioni della Rete Sismica Nazionale INGV installate sull'isola.

Sigla stazione	Località	Latitudine (°)	Longitudine (°)	Altitudine (m)
IFOR	Ischia - Faro Punta Imperatore	40.7115	13.8551	170
IMTC	Ischia - Monte Corvo	40.7209	13.8758	59
IOCA	Ischia - Osservatorio Casamicciola	40.7458	13.9008	123

La stazione IOCA è ubicata nell'area della Grande Sentinella ed è a circa 500 metri da una delle zone dove si sono verificati i crolli più gravi di Casamicciola, come indicato nell'immagine (Figura 3.3.1-1).

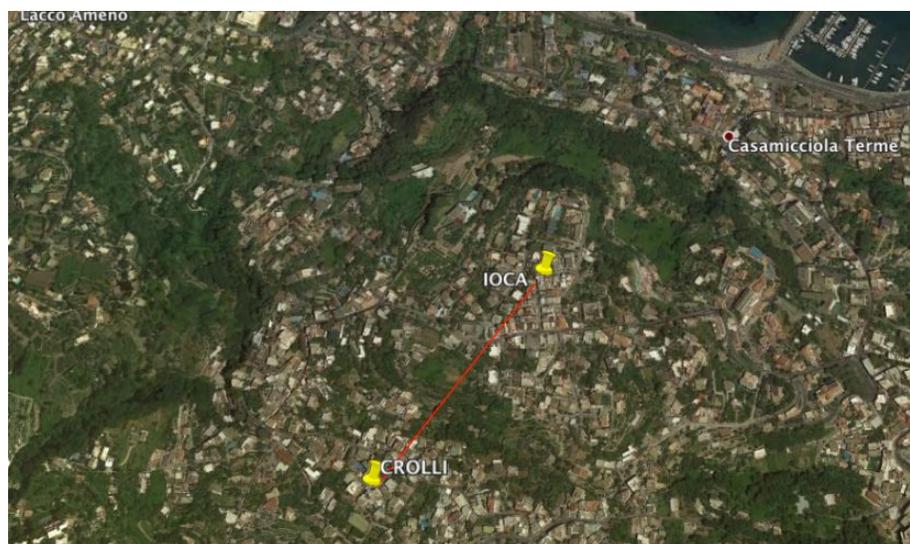


Figura 3.3.1-1. Posizione della stazione sismica IOCA e posizione indicativa dei crolli più gravi di Casamicciola.

La Figura 3.3.1-2 mostra l'accelerogramma dell'evento principale registrato alla stazione IOCA, di cui abbiamo calcolato il rapporto degli spettri di Fourier delle componenti orizzontali rispetto a quella verticale (H/V) (Figura 3.3.1-3). Tale tipo di analisi può dare una chiara indicazione della presenza di effetti di amplificazione legati alle condizioni geologiche, geomorfologiche e geotecniche locali.

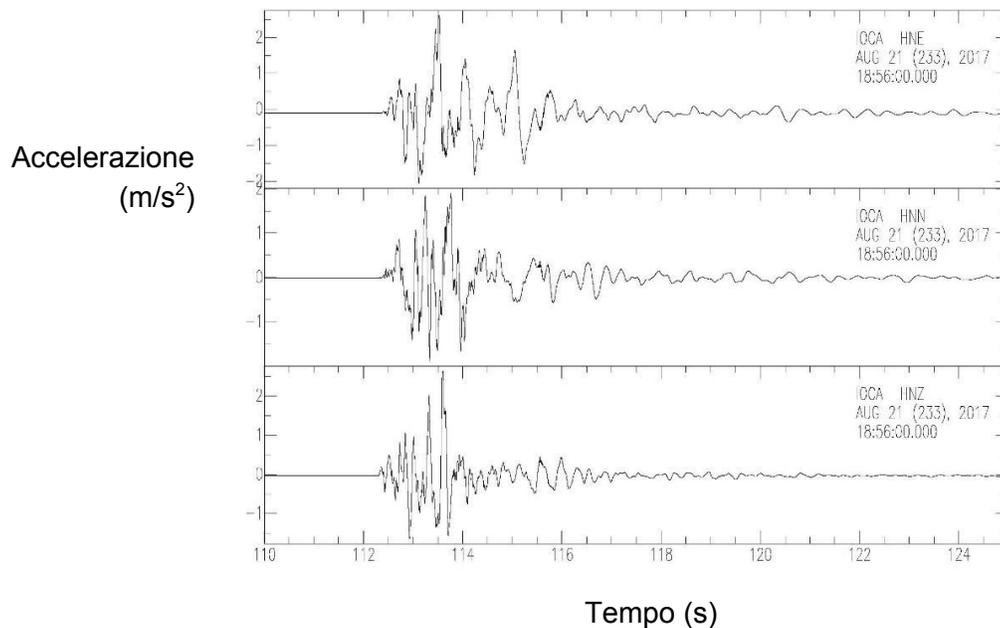


Figura 3.3.1-2. Accelerogramma registrato a IOCA.

Per la stessa stazione abbiamo inoltre selezionato 2 ore di registrazione del velocimetro (dalle 00:00 alle 02:00 del 20 agosto) e calcolato il rapporto H/V del rumore sismico ambientale. La Figura 3.3.1-3 mostra come in entrambi i casi sia evidente una forte amplificazione tra 1.5 e 2 Hz, caratterizzata da un valore medio di 7.5 per il rumore sismico e da valori intorno a 11 per il terremoto.

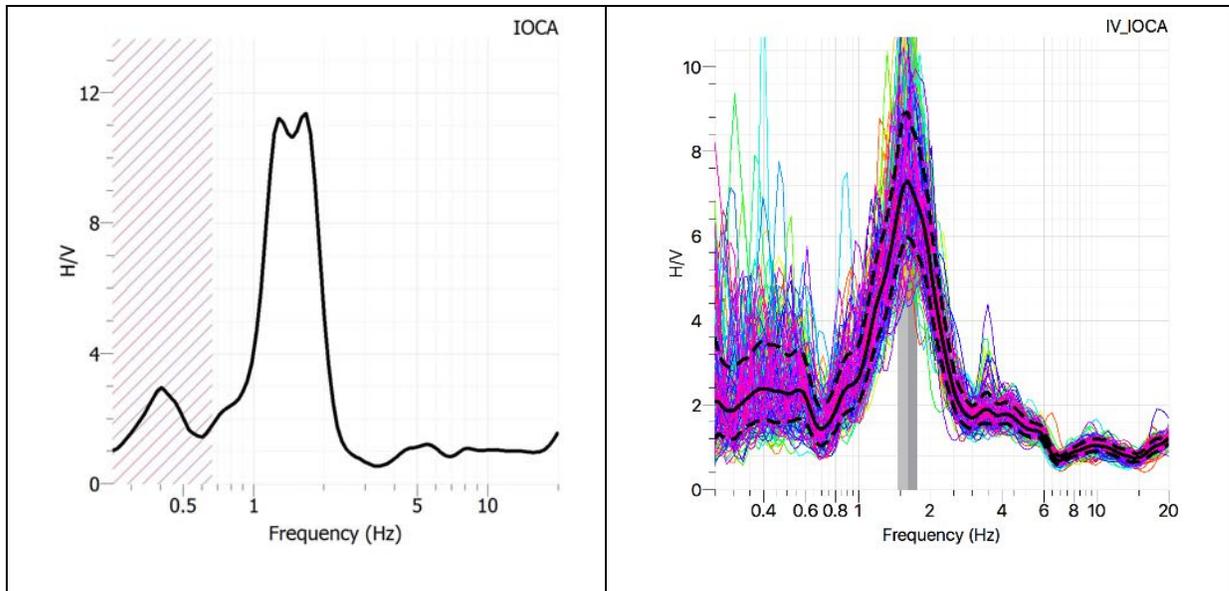


Figura 3.3.1-3. Rapporti spettrali H/V sul terremoto del 21/08/2017 (sinistra) e sul rumore sismico ambientale (destra). Nel caso del terremoto, è stata usata la registrazione accelerometrica di lunghezza pari a 15 s a partire dall'arrivo delle onde P.

Lo stesso tipo di analisi è stata effettuata sulle registrazioni velocimetriche di rumore sismico ambientale alle altre due stazioni della Rete Sismica Nazionale (IFOR e IMTC), mostrando una chiara eterogeneità della risposta sismica locale dovuta alla presenza di depositi vulcanici fortemente eterogenei e/o rimaneggiati.

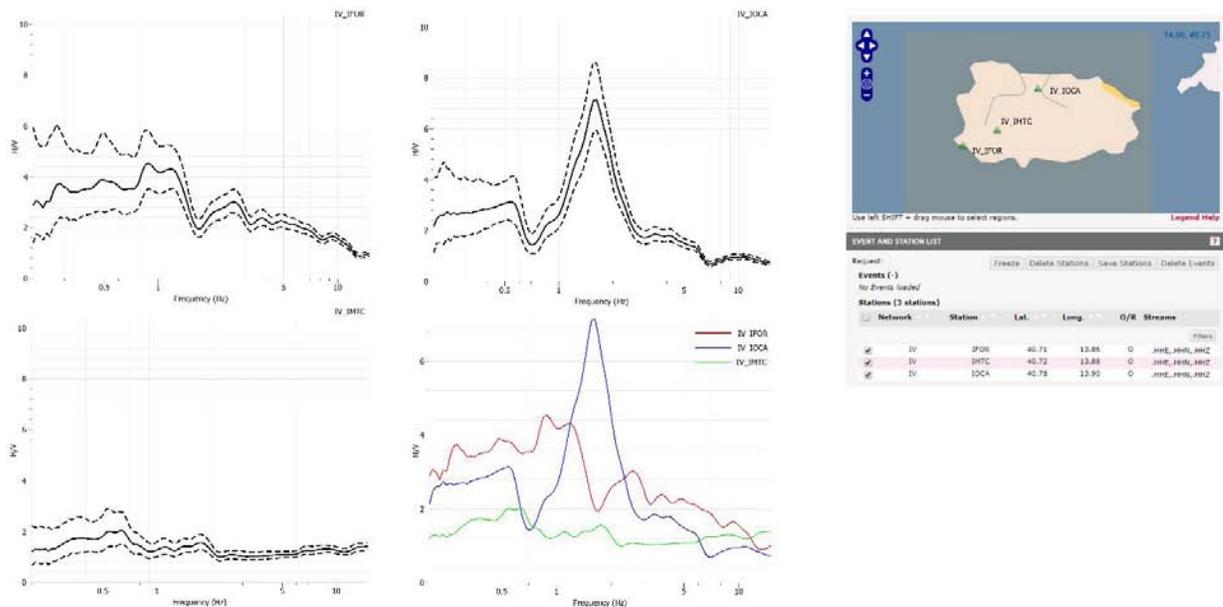


Figura 3.3.1-4. Rapporti spettrali H/V calcolati su 2 ore di registrazione di rumore sismico ambientale precedenti l'evento sismico alle stazioni di IOCA, IMTC e IFOR.

3.3.2 Shakemaps

Le mappe di scuotimento forniscono una immediata visualizzazione del livello di scuotimento (shaking) di una zona colpita o interessata da un terremoto. Le shakemap prodotte dall'INGV riportano i valori di picco registrati da accelerometri e sismometri, principalmente forniti dalla Rete Accelerometrica Nazionale (RAN) del Dipartimento per la Protezione Civile e dalla Rete Sismica Nazionale (RSN) dell'INGV, presenti nella zona del terremoto. Ove non sono presenti valori osservati, il software interpola i dati avvalendosi delle leggi di attenuazione dello scuotimento con la distanza epi/ipocentrale (GMPEs) disponibili per l'area in esame, e delle condizioni di sito utilizzando i valori di VS30 come proxy per definire i livelli di amplificazione.

L'INGV calcola le shakemap per terremoti $M \geq 3.0$ a partire dal 2006 (Michelini et al., 2008), disponibili con i relativi dati e metadati sul sito ufficiale <http://shakemap.rm.ingv.it>. La configurazione a scala nazionale delle leggi di attenuazione e degli effetti di sito è in fase di aggiornamento con quelle che si sono rese disponibili negli anni successivi: più accurate e utilizzate nella nuova mappa di pericolosità sismica a scala nazionale.

Il terremoto di Ischia

La realizzazione di shakemap accurate per il terremoto di Ischia $M_d=4.0$ del 21 agosto 2017 è risultato particolarmente difficile. Nella fattispecie ci sono diversi elementi importanti che devono essere presi in considerazione.

Le stazioni operanti nell'isola sono ubicate in 4 punti (Figura 3.3.2-1): IOCA (Ischia - Osservatorio Casamicciola), IFOR (Ischia - Faro Punta Imperatore), IMTC (Ischia - Monte Corvo), CAI (Castello Aragonese).

IOCA è equipaggiata con un sensore velocimetrico a larga banda e un accelerometro, mentre IFOR e IMTC sono dotate di sensore velocimetrico a larga banda. Alle tre stazioni si affiancano strumenti analogici. CAI è infine dotata di solo sensore analogico.

Durante l'evento lo scuotimento ha superato il valore soglia degli strumenti a larga banda e delle stazioni analogiche (segnale saturato), mentre l'accelerometro ha funzionato correttamente e ha fatto registrare un picco di accelerazione pari al 28%g (PGV 18 cm/s). L'unico dato disponibile è pertanto la registrazione accelerometrica (IOCA), in quanto non sono state pubblicate le registrazioni della Rete Accelerometrica Nazionale, disponibili al sito <http://ran.protezionecivile.it>.

La stazione IOCA è però affetta da fenomeni di amplificazione locale, come mostrato in Figura 3.3.1-3, poiché, nella curva del rapporto tra componente orizzontale e verticale, è presente un evidente picco a 2 Hz.

La presenza di un solo dato accelerometrico registrato, l'assenza di leggi regionali per la stima empirica del moto del suolo e la presenza di rilevanti effetti di amplificazione locale rendono particolarmente complicata la stima dell'andamento dello scuotimento.

In quanto segue vengono presentate le shakemap ottenute dall'INGV sia con la procedura ufficiale, descritta in Michelini et al. (2008), e pubblicate al sito <http://shakemap.rm.ingv.it/>, che con la configurazione sperimentale, in fase di test, che, per l'area in esame, si avvale di

una legge predittiva specifica per le aree vulcaniche (Tusa e Langer, 2016; TL16), derivata per l'area etnea. Per tutte le mappe, viene utilizzata la localizzazione fornita dall'Osservatorio Vesuviano in data 25/08/2017 alla Commissione Grandi Rischi. In modo da evidenziare le problematiche incontrate, si presentano le mappe con fattori di scala geografica differenti.

L'accuratezza delle mappe di scuotimento è stata valutata attraverso il confronto con il rilievo macrosismico effettuato nell'isola, che attribuisce a Casamicciola terme, Fango (Lacco Ameno) e Marina di Casamicciola rispettivamente un'intensità EMS pari a VIII, VII e VI, mentre tutte le altre località dell'isola sono state valutate tra EMS IV e V (QUEST, 2017).



Figura 3.3.2-1. Ubicazione dell'epicentro (localizzazione a cura di INGV-OV) e delle postazioni di registrazione. Alle stazioni IOCA, IMCT e IFOR sono affiancate stazioni velocimetriche a corto periodo analogiche.

Confronto fra i dati e le GMPEs

Al fine di confrontare i parametri di scuotimento osservati con quelli predetti dalla configurazione ufficiale di shakemap e quella che utilizza le relazioni TL16, si presentano in Figura 3.3.2-3 i diagrammi per l'evento di Ischia. Innanzitutto si nota come le relazioni TL16, sebbene calibrate per l'area etnea, siano maggiormente compatibili con i dati osservati rispetto a GMPEs calibrate per zone attive crostali. Ciò è evidenziato dal numero di "outliers" rispetto alla GMPE utilizzata nella configurazione ufficiale (pannelli di sinistra in Figura 3.3.2-3). Inoltre si nota che la correzione per il "bias", operata dal software ShakeMap, è molto più marcata nel caso delle GMPEs adottate dalla configurazione ufficiale che per TL16.

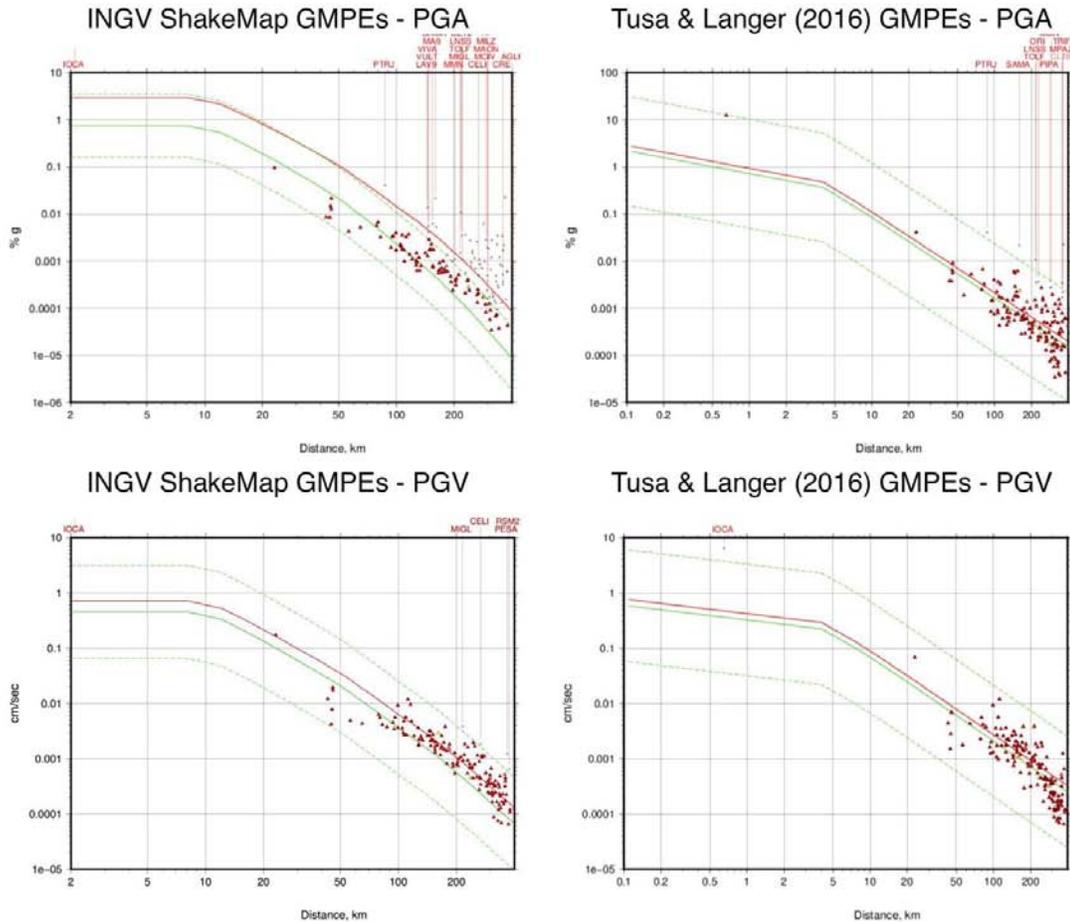


Figura 3.3.2-3. Confronto fra le GMPEs e dati osservati. A sinistra il confronto tra le osservazioni e la GMPE adottata nella configurazione ufficiale di shakemap, descritta in Michelini et al. (2008). A destra, il confronto con le relazioni di Tusa & Langer (2016), TL16. I pannelli in alto si riferiscono alla PGA ed in basso alla PGV. La linea continua rossa indica la GMPE per la magnitudo di riferimento mentre la linea continua verde indica la GMPEs dopo l'applicazione della correzione per il "bias" per la magnitudo. Le linee tratteggiate indicano +/- 2 deviazioni standard delle rispettive GMPEs. Si noti che IOCA ricade fuori scala nei pannelli di sinistra delle shakemap con la configurazione ufficiale. Le scale in ascissa ed ordinate dei pannelli sono diverse per accomodare i diversi intervalli in distanza e valore delle due GMPEs (ufficiali nei pannelli di sinistra e quelle con la relazione di TL16 a destra).

Mappe con configurazione ufficiale pubblicate sul sito shakemap

Le mappe sono pubblicate sul sito ufficiale delle shakemap dell'INGV (<http://shakemap.rm.ingv.it>). In Figura 3.3.2-4 si nota l'estensione dello scuotimento particolarmente limitato nello spazio e non più avvertibile ad una trentina di km dall'epicentro.

Si individuano i seguenti problemi:

- La scala standard utilizzata per le shakemap, utilizzata per il resto della penisola, appare troppo poco dettagliata per individuare i dettagli del ground motion sull'isola di Ischia.
- Utilizzando le GMPEs della configurazione standard, descritta in Michelini et al. (2008), in cui, per eventi di magnitudo minore di 5.5, si utilizzano le leggi regionali sviluppate da Malagnini e collaboratori (Malagnini, et al., 2000; Malagnini, et al., 2002; Morasca, et al., 2006), il dato della stazione IOCA risulta un "outlier" per la procedura di ShakeMap e viene scartata per il calcolo dello scuotimento sull'isola.

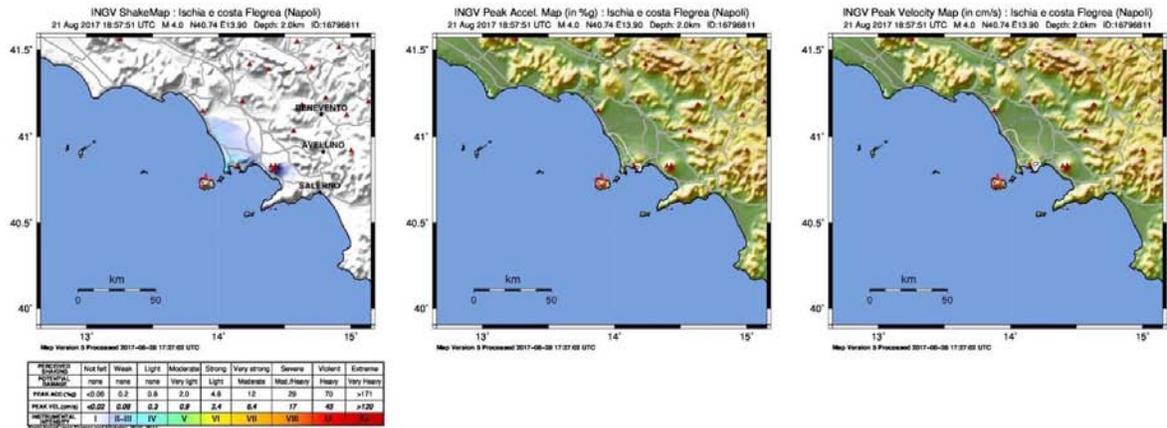


Figura 3.3.2-4. Mappe di scuotimento pubblicate sul sito <http://shakemap.rm.ingv.it>. Mappa in intensità macrosismica MCS (sinistra), mappa in PGA (centro) e mappa in PGV (destra).

Uno dei problemi della configurazione ufficiale è che non consente di visualizzare i dettagli dello scuotimento. A tal fine, l'area in esame è stata ridotta e la mappa è stata ricalcolata. In Figura 3.3.2-5, le mappe di scuotimento evidenziano intensità massime IV-V MCS anche in area epicentrale, in contrasto con il rilievo macrosismico.

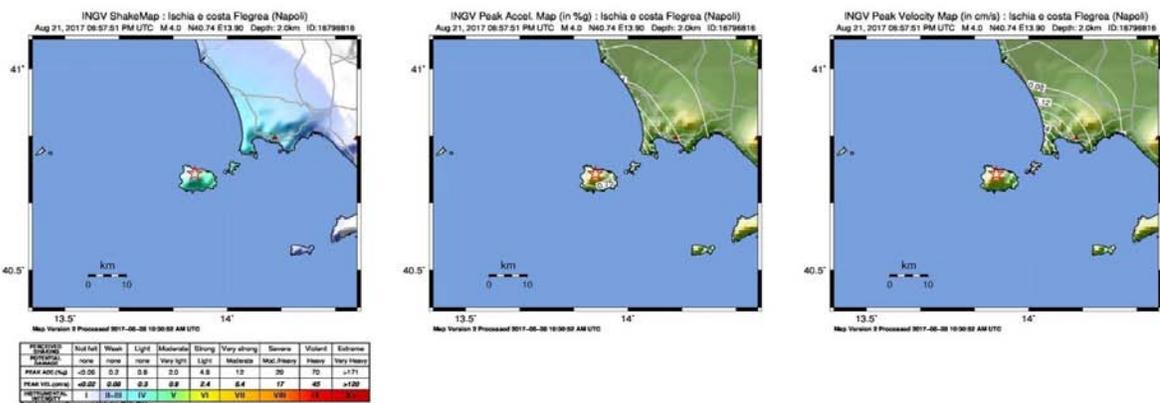


Figura 3.3.2-5. Mappe di scuotimento ingrandite che utilizzano la configurazione ufficiale. Mappa in intensità macrosismica MCS (sinistra), mappa in PGA (centro) e mappa in PGV (destra).

Mappe calcolate utilizzando una GMPEs specifica per aree vulcaniche

Come anticipato, è in fase di aggiornamento la configurazione del software ShakeMap a scala nazionale. In particolare, per le aree vulcaniche sono state selezionate le GMPEs proposte da Tusa & Langer (2016). In Figura 3.3.2-6 sono mostrate le mappe risultanti dall'utilizzo della nuova GMPE e si può notare quanto segue:

- l'estensione dello scuotimento sulla terraferma è maggiore rispetto alla configurazione ufficiale;
- viene utilizzato il dato della stazione IOCA;
- la distribuzione delle intensità sull'isola è compresa tra il VI e VII MCS.

In questo caso si avrebbe una stima più accurata per la zona epicentrale ed una sovrastima per il resto dell'isola.

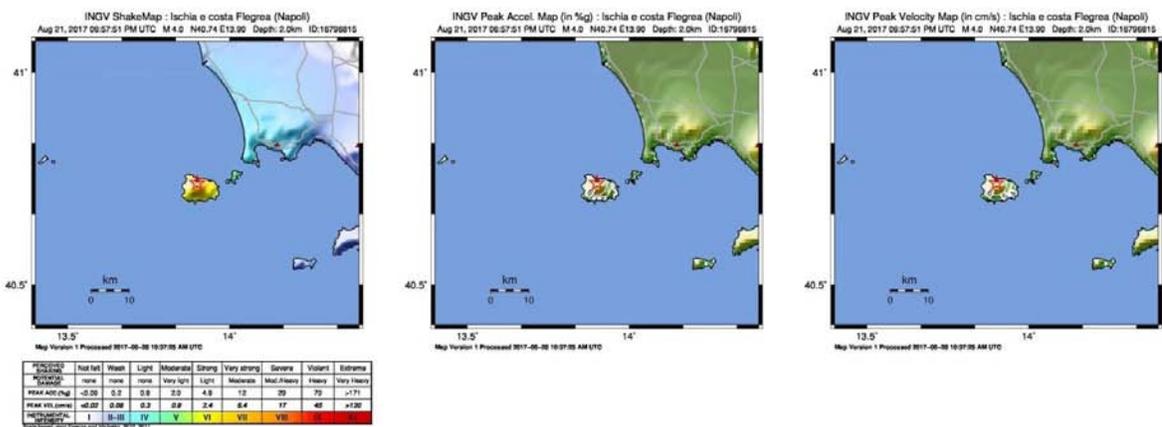


Figura 3.3.2-6. Mappe di scuotimento dettagliate che utilizzano le GMPEs di Tusa & Langer (2016). Mappa in intensità macrosismica MCS (sinistra), mappa in PGA (centro) e mappa in PGV (destra).

L'analisi svolta evidenzia le difficoltà intrinseche nel calcolo di shakemap per il terremoto di Ischia del 21 Agosto. La presenza di un'unica registrazione accelerometrica sull'isola, l'utilizzo di GMPEs inappropriate nella versione attuale di ShakeMap, oltre alla scarsa conoscenza degli effetti di sito, che nell'implementazione di ShakeMap sono approssimati utilizzando fattori di amplificazione basati sui valori di VS30 su un grigliato con spaziatura non particolarmente densa (1' in latitudine e longitudine), condizionano in maniera considerevole i risultati.

Il sito ufficiale delle shakemap (<http://shakemap.rm.ingv.it/shake/16796811/intensity.html>) propone una mappa di scuotimento che risulta dalla pura applicazione della GMPE (e degli effetti di sito), in quanto l'unico dato della stazione IOCA è considerato "outlier" e quindi non utilizzato dalla procedura di interpolazione.

L'utilizzo alternativo della TL16, GMPE implementata per un'area vulcanica (Etna), sarebbe sicuramente più appropriato per l'area epicentrale, ma causerebbe una sovrastima dello scuotimento per il resto dell'isola vista la mancanza di altri dati come vincolo.

In conclusione, le shakemap del terremoto di Ischia del 21 agosto non possono rappresentare con accuratezza lo scuotimento dovuto al sisma, a causa della presenza di un solo dato registrato. Le mappe di scuotimento pubblicate derivano dall'applicazione della sola legge di attenuazione e rappresentano un compromesso, che porta alla sottostima dello scuotimento in area epicentrale (per la quale l'unica registrazione può essere utilizzata come proxy), ma ad una stima più corretta dello scuotimento del resto dell'isola, in accordo con le indagini macrosismiche finora disponibili (QUEST, 2017).

3.4 Geodesia

3.4.1 Dati GPS

Come già accennato nelle precedenti sezioni, la rete GPS in continuo (cGPS) dell'isola d'Ischia è costituita da 6 stazioni (pallini rossi in Figura 3.4.1-1), l'ultima delle quali è stata installata alla fine di marzo 2017 sul Mt. Epomeo. Inoltre sull'isola è operativa una stazione cGPS della rete GNSS della Regione Campania (pallino viola in Figura 3.4.1-1). Alle rete permanente si aggiungono 16 vertici della rete GPS discreta misurata tramite campagne periodiche a partire dal 1998 (pallini blu in Figura 3.4.1-1). L'ultima campagna di misure discrete GPS è stata effettuata nel 2010.

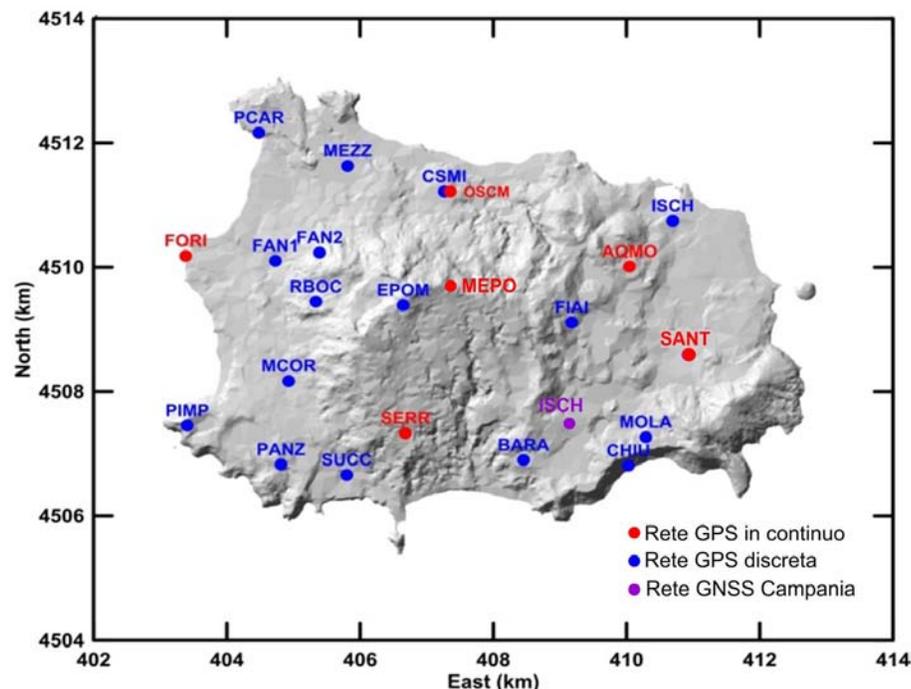


Figura 3.4.1-1. Rete GPS in continuo (pallini rossi, cGPS) e discreta (pallini blu) dell'isola d'Ischia. Con il pallino viola è indicata la stazione della Rete GNSS della Regione Campania.

In Figura 3.4.1-2 sono riportati i campi di velocità cGPS sia planimetrico (vettori blu) che verticale (vettori rossi) calcolati dalle serie temporali dal 2011 ad oggi. Si osserva una generale e costante subsidenza dell'isola con valori più elevati nel settore meridionale (Figure 3.4.1-2 e 3.4.1-3).

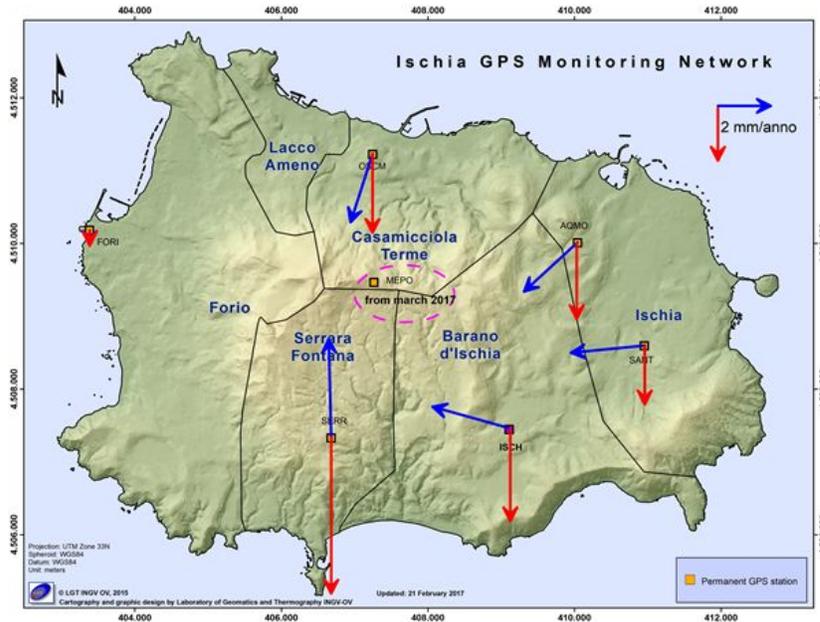


Figura 3.4.1-2. Campo di velocità cGPS plano-altimetrico dal 2011 ad oggi.

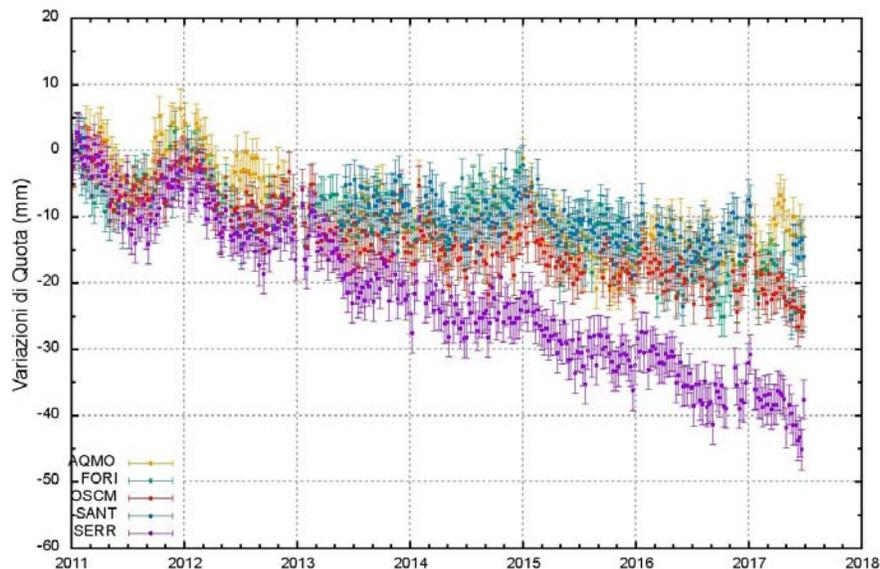


Figura 3.4.1-3. Serie temporali delle variazioni settimanali in quota delle stazioni GPS di Ischia dal 2011 a giugno 2017.

In occasione dell'evento principale del 21 agosto, alla stazione GPS permanente di Casamicciola (OSCM) è stato registrato uno spostamento cosismico orizzontale di circa 1 cm in direzione NNE. Alla stessa stazione non si apprezzano spostamenti verticali significativi (Figura 3.4.1-4).

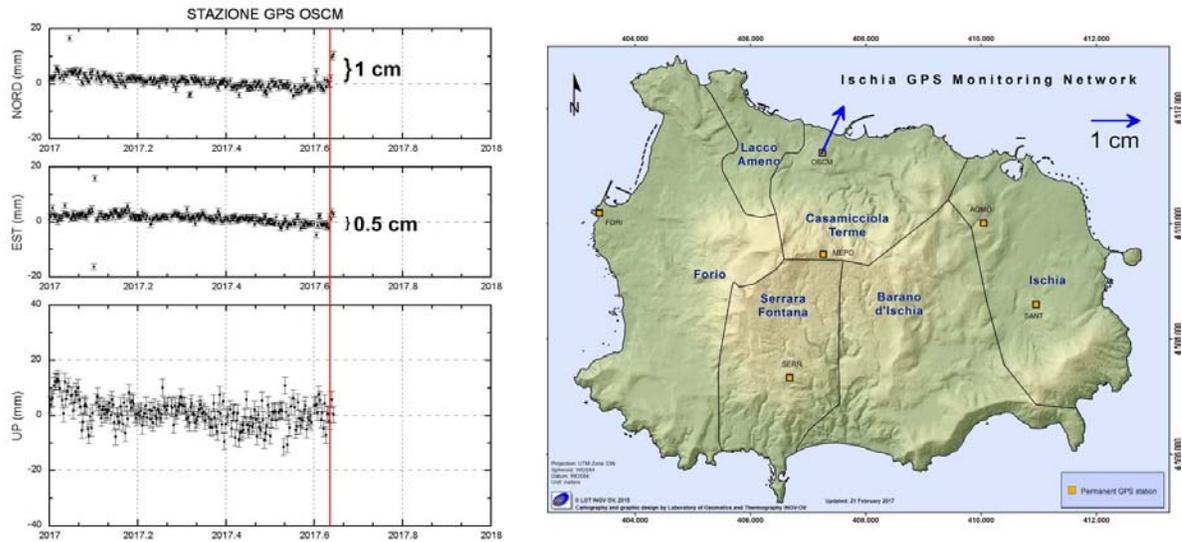


Figura 3.4.1-4. A sinistra: serie temporali delle variazioni settimanali in quota alla stazione GPS OSCM di Ischia dall'inizio del 2017 fino al 24 agosto 2017. È evidente lo spostamento cosismico orizzontale di circa 1 cm in direzione NNE.

Le altre stazioni cGPS della rete non mostrano deformazioni significative, come si vede in Figura 3.4.1-5.

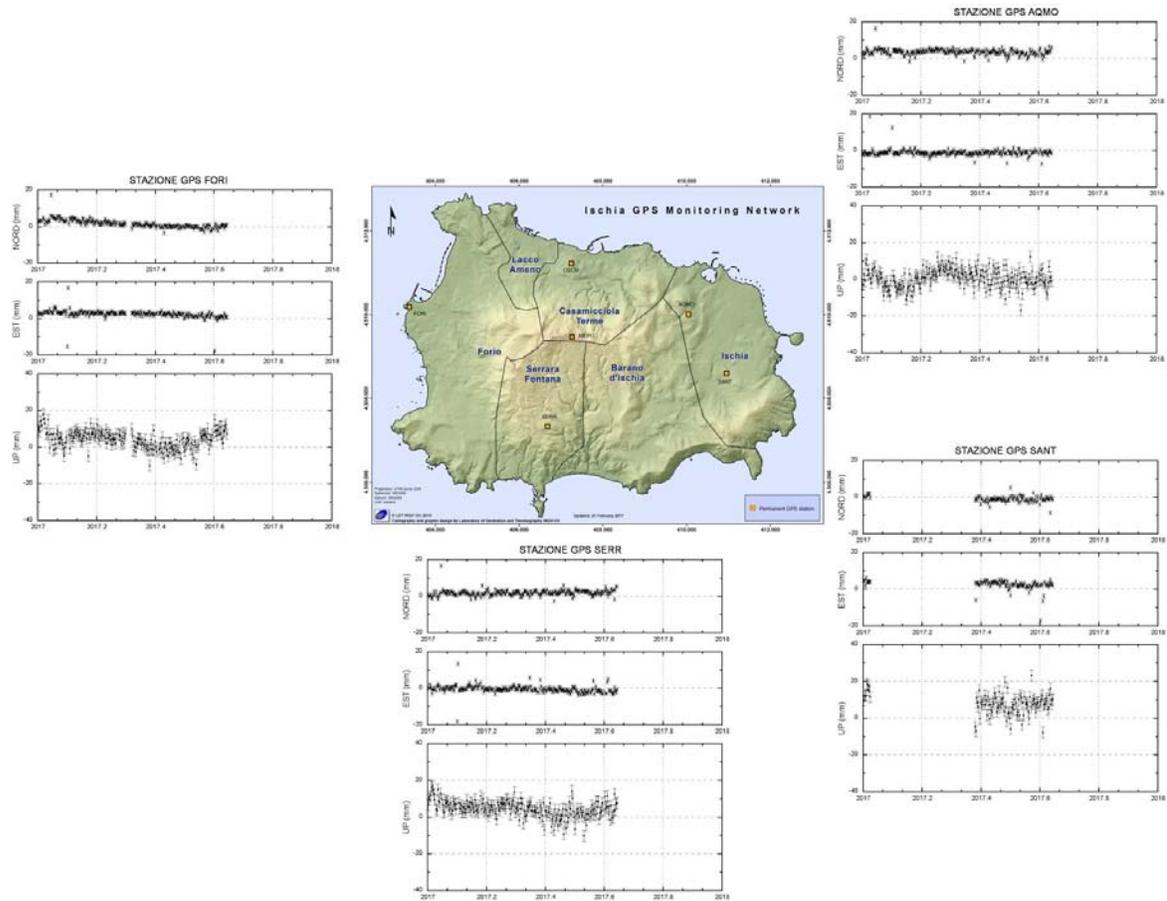


Figura 3.4.1-5. Serie temporali delle variazioni settimanali in quota alle stazioni GPS FORI, AQMO, SANT e SERR di Ischia dall'inizio del 2017 fino al 24 agosto 2017. Nessuna deformazione è evidente nel periodo considerato.

3.4.2 Dati SAR

L'evento sismico che il 21 agosto 2017 ha colpito l'isola di Ischia è stato studiato con i dati satellitari della missione Sentinel-1 (S1) dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA). Sono state elaborate due coppie di immagini, una coppia acquisita in orbita ascendente e una coppia acquisita in orbita discendente. Le date di acquisizione delle immagini pre-evento e post-evento sono 16/8/2017 e 22/8/2017, rispettivamente, per ambedue le orbite.

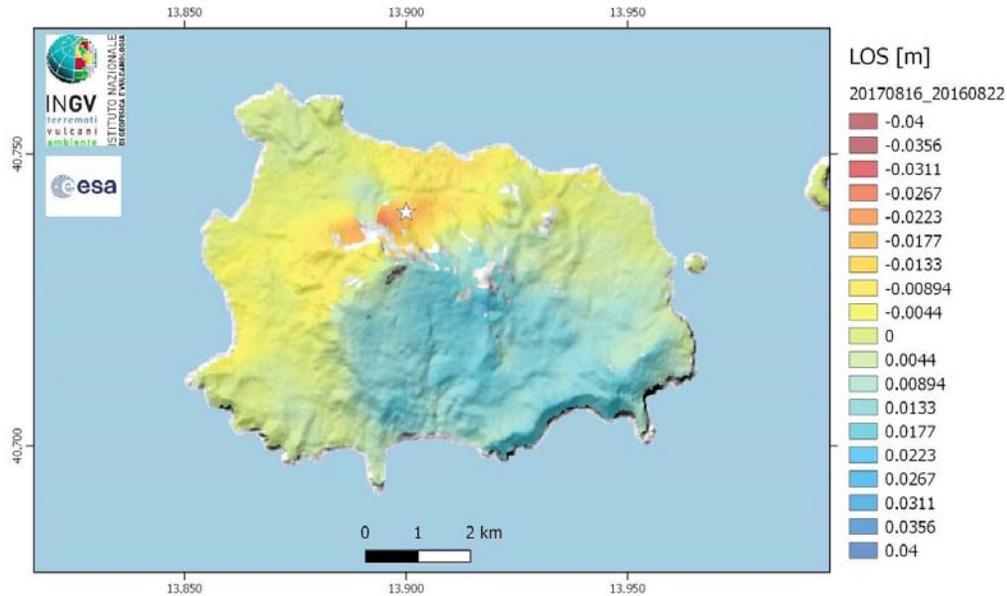


Figura 3.4.2-1. Mappa della deformazione cosismica vista dall'orbita ascendente.

Le mappe di movimento del suolo ottenute dall'applicazione dell'Interferometria Differenziale mostrano un pattern localizzato in prossimità dell'epicentro del sisma (stella bianca nelle fig. 3.4.2-1 e 3.4.2-2). I valori di deformazione lungo la linea di vista (LOS) di S1 raggiungono il valore massimo di circa -2.6 cm (in allontanamento dal satellite) per entrambi i dataset.

Combinando i dati ascendenti e discendenti sono state stimate le componenti verticali e orizzontali (solo la componente Est) del campo di deformazione. Le relative mappe sono riportate in figura 3.4.2-3 e figura 3.4.2-4, per la componente verticale e per quella Est rispettivamente. Le due mappe evidenziano come lo spostamento del suolo dominante sia lungo la componente verticale, la quale raggiunge circa 3.6 cm in abbassamento. Per quanto riguarda la componente Est essa è sostanzialmente trascurabile, pur mostrando una piccola porzione in movimento verso Ovest di -1.5 -1.8 cm, localizzata a circa 500 m a Ovest dell'epicentro.

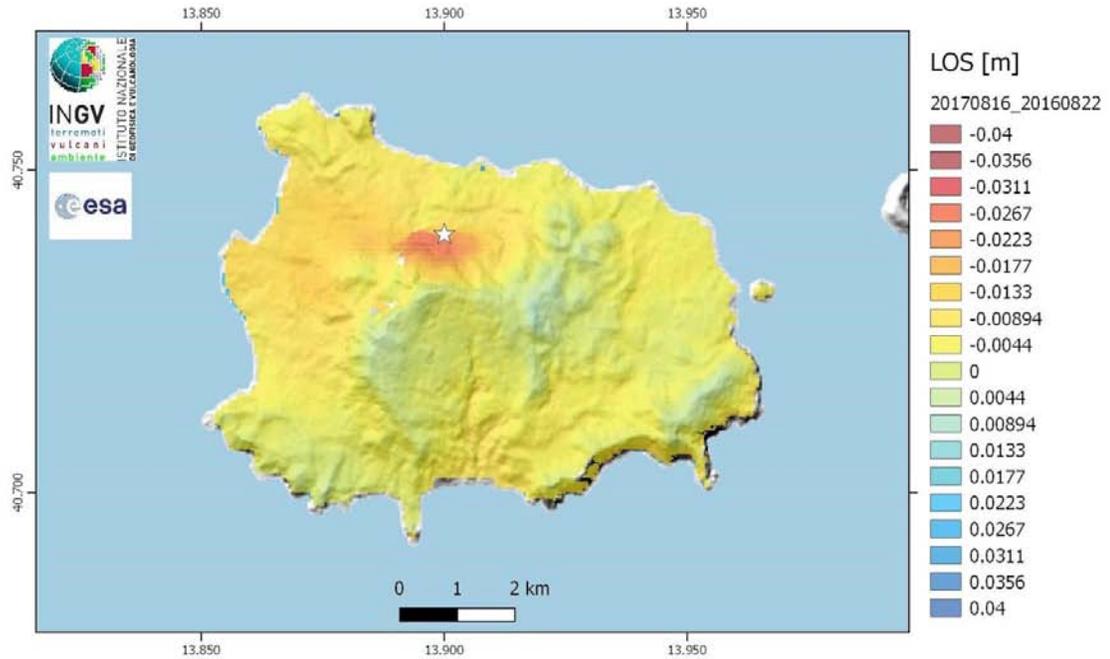


Figura 3.4.2-2. Mappa della deformazione cosismica vista dall'orbita discendente.

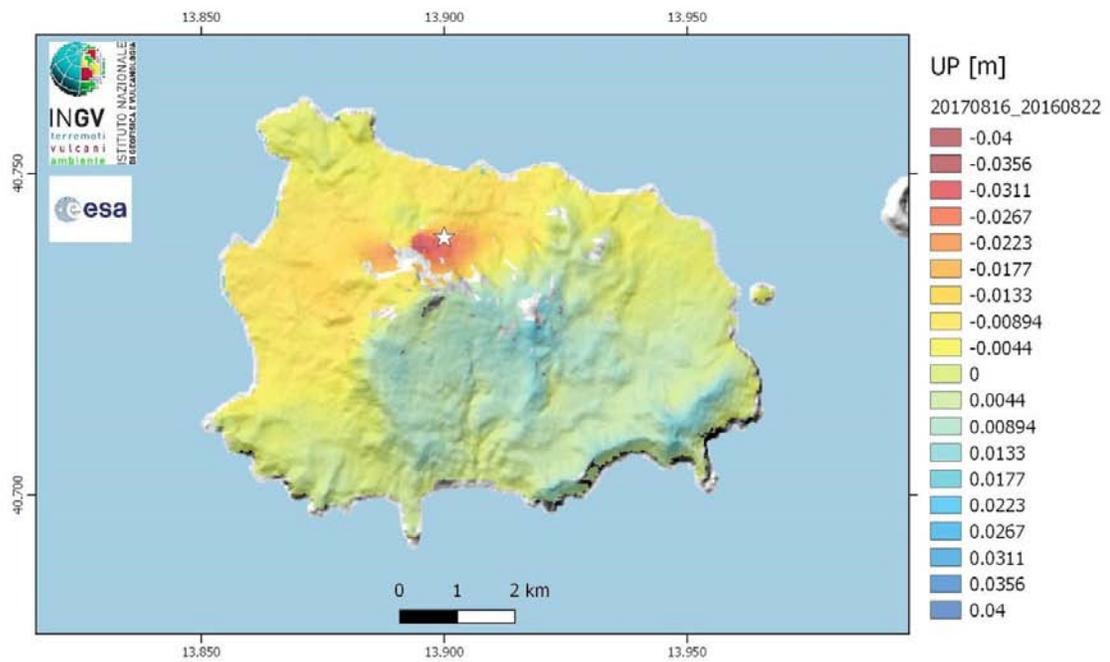


Figura 3.4.2-3. Componente di deformazione cosismica verticale.

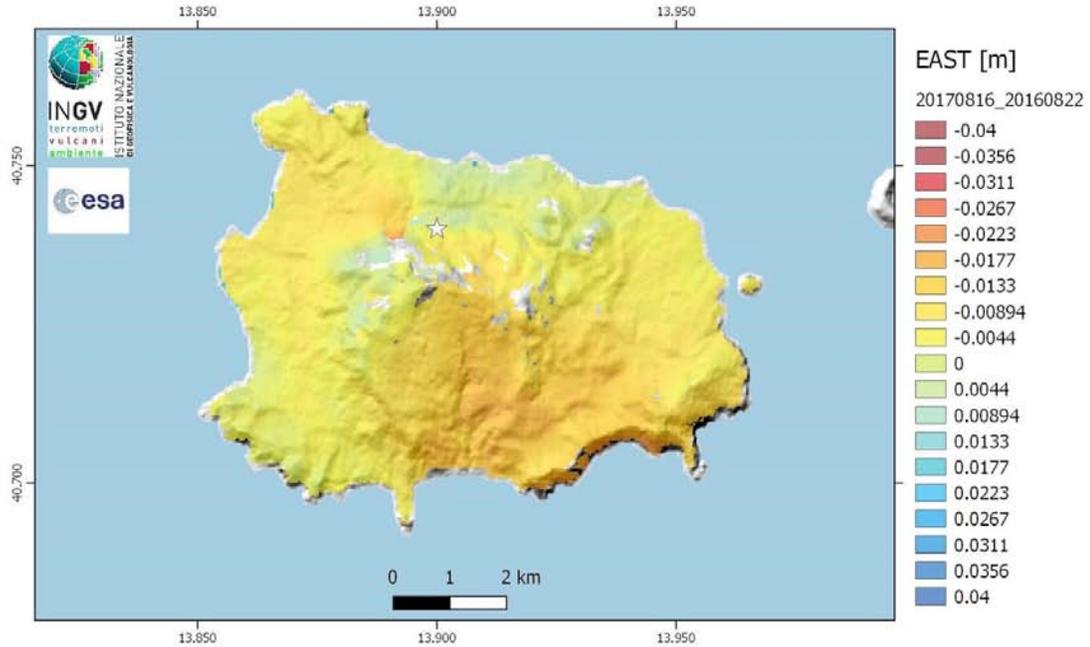


Figura 3.4.2-4. Componente di deformazione cosismica orizzontale.

I risultati sono ancora preliminari. Ulteriori rifiniture delle elaborazioni verranno effettuate per migliorare lo srotolamento della fase interferometrica e le correzioni atmosferiche.

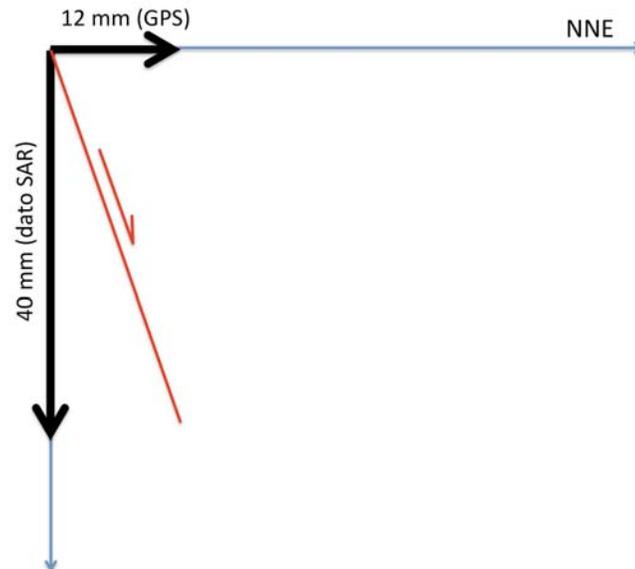


Figura 3.4.2-5. Utilizzando la componente verticale SAR e quella orizzontale GPS, il piano ipotetico di movimento sarebbe inclinato di circa 70°.

Modellazione analitica speditiva dei dati InSAR

In questo rapporto la modellazione è aggiornata con una soluzione di tipo *crack closure*, secondo un meccanismo di depressurizzazione già proposto in Sepe et al. (2007) per la modellazione di dati geodetici di livellazione ad Ischia.

Dati e modellazione

Per questa modellazione sono stati impiegati 4 dataset InSAR, acquisiti da satelliti Sentinel-1 e dalla costellazione COSMO-SkyMed, elaborati presso IREA-CNR e INGV (Tabella 3.4.2-1). Rispetto al dato raster originale, i dati sono stati sottocampionati con una maglia ad alta risoluzione (20 metri) nella zona di maggior spostamento e meno densa (200 metri) nel resto dell'isola.

Sensore	Data pre-	Data post-	Orbita
COSMO-SkyMed	19 agosto	23 agosto	Discendente
Sentinel-1	16 agosto	22 agosto	Ascendente
Sentinel-1	16 agosto	22 agosto	Discendente
Sentinel-1	17 agosto	23 agosto	Ascendente

Tabella 3.4.2-1. Dati InSAR usati nella modellazione, con date di acquisizione e tipo di orbita.

I modelli speditivi sono stati creati con le soluzioni elastiche di Okada (1992), valide per dislocazione in un semispazio elastico, isotropo e omogeneo. **Il modello non è in grado di descrivere le complessità reologico-strutturali della zona in analisi.** Alle equazioni di Okada **sono state apportate delle correzioni topografiche** (Williams and Wadge, 1998), che contribuiscono a rendere la soluzione più realistica.

L'assenza di vincoli esterni e la disponibilità di due dataset ascendenti e due discendenti ha portato alla scelta di una modellazione con tutti i parametri di modello non vincolati. Si tratta pertanto di una **soluzione di best-fit puramente matematico**, senza vincoli geologici, che rappresenta esclusivamente il miglior risultato attuale con modelli analitici elastici e i dati InSAR disponibili.

I due modelli alternativi ipotizzano l'esistenza di una sorgente depressurizzata e/o di una sorgente di dislocazione elastica/scivolamento su piano.

Modello 1 - Sorgente *crack closure*

In questa inversione si ipotizza l'esistenza di una sorgente di volume, orizzontale (dip 0°) con sola componente tensile negativa, ovvero di tipo *crack closure*. L'inversione non lineare colloca la sorgente ad una **profondità di circa 520 metri** sotto il livello del mare. Il fit del dato osservato è uguale a quello della soluzione con sorgente di dislocazione elastica (vedi Modello 2 - Shear su piano).

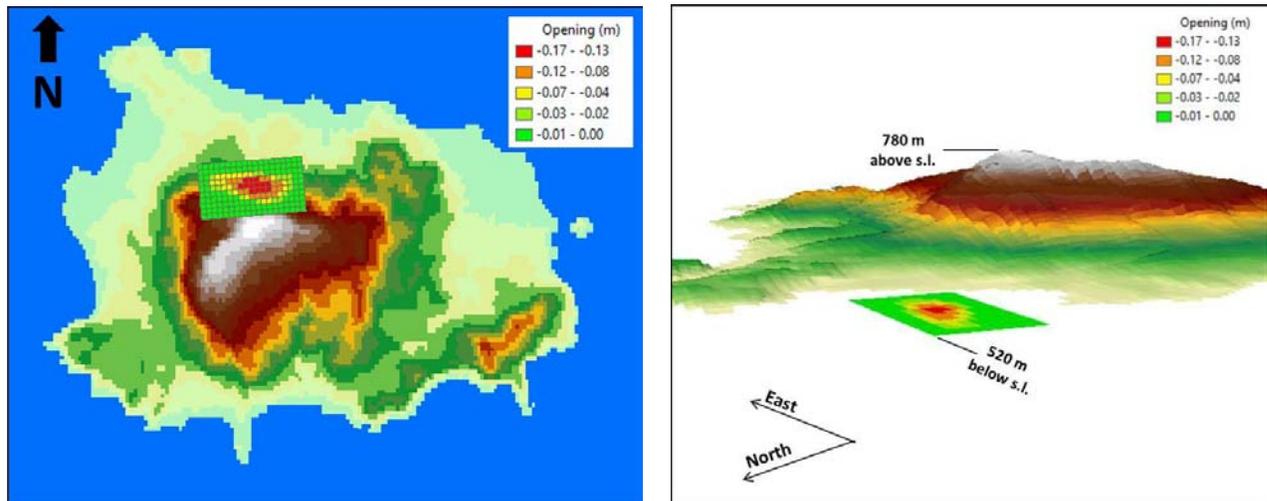


Figura 3.4.2-6. Visione planimetrica e 3D della sorgente di tipo *crack closure*.

Analisi

Questo modello simula la chiusura per depressurizzazione di un *crack* sub-orizzontale. La profondità corrisponde al top dell'acquifero idrotermale più profondo di Ischia, la cui temperatura è di circa 300° C (Figura 3.4.2-7). In superficie l'acquifero rilascia fluidi (prevalentemente CO₂) da fumarole localizzate lungo faglie a direzione N80° E (dip tra 45° e 70°) che bordano il versante nord dell'Epomeo e lungo faglie a direzione N170° E che delimitano il versante occidentale dell'Epomeo (Chiodini et al., 2004, Di Napoli et al., 2009).

Il modello indica una chiusura media di 13 cm su una lunghezza di 1 km, corrispondente a una **depressurizzazione di circa 1 MPa**. Quest'ultimo va inteso come valore **limite massimo**, valido sotto l'ipotesi di attribuire tutta la deformazione superficiale alla sorgente di tipo *crack closure*.

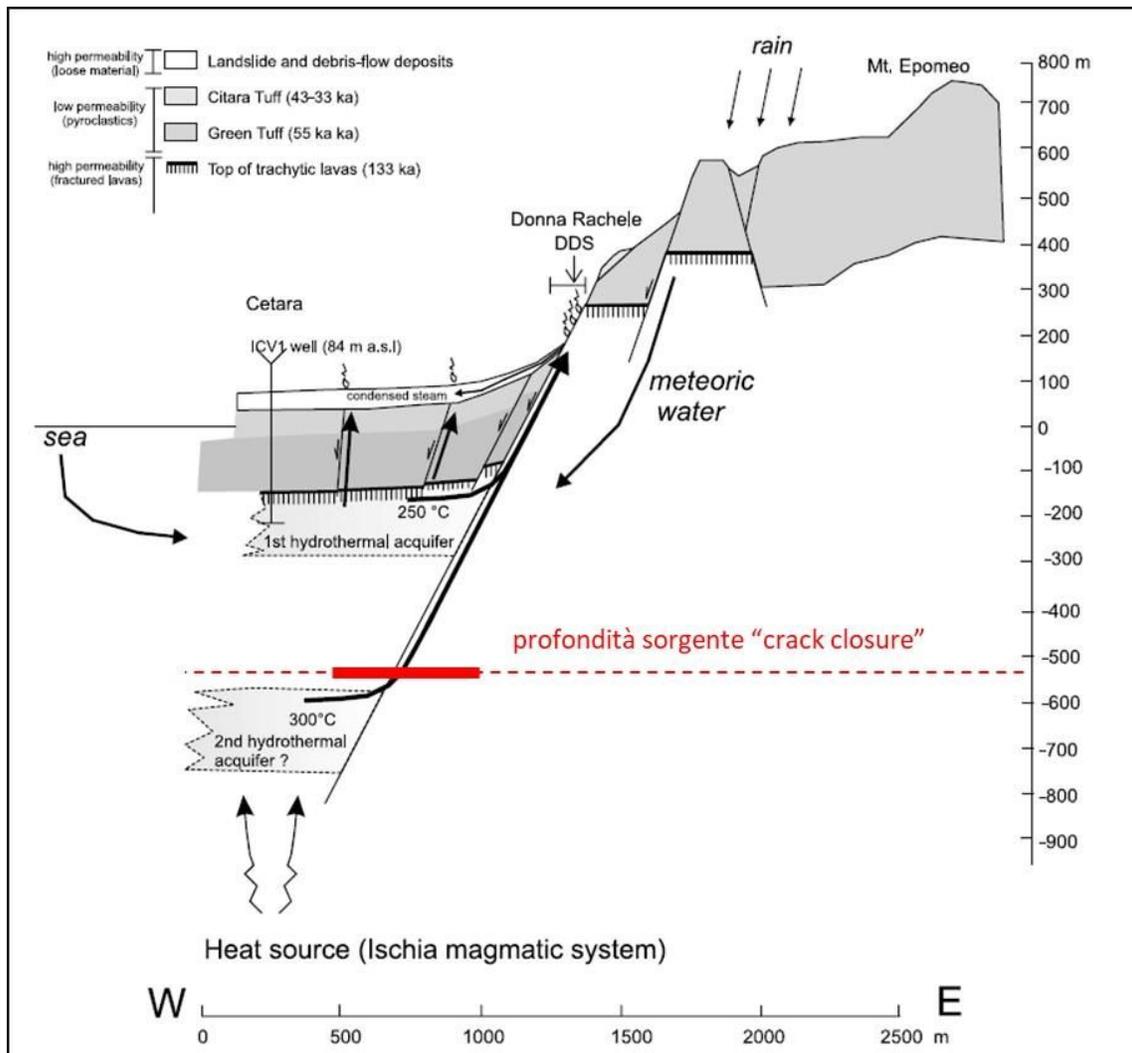


Figura 3.4.2-7. Modello geochimico concettuale, da Chiodini et al. (2004), modificato.

Poiché la depressurizzazione di un acquifero con giacitura sub-orizzontale potrebbe implicare la riattivazione di piani di scorrimento normali, a direzione N80°E, che lo confinano a sud, è **possibile che lo spostamento superficiale sia dovuto anche a una combinazione dei due fenomeni**, i cui modelli (elaborati indipendentemente) **hanno geometrie e profondità molto compatibili** (Figura 3.4.2-8).

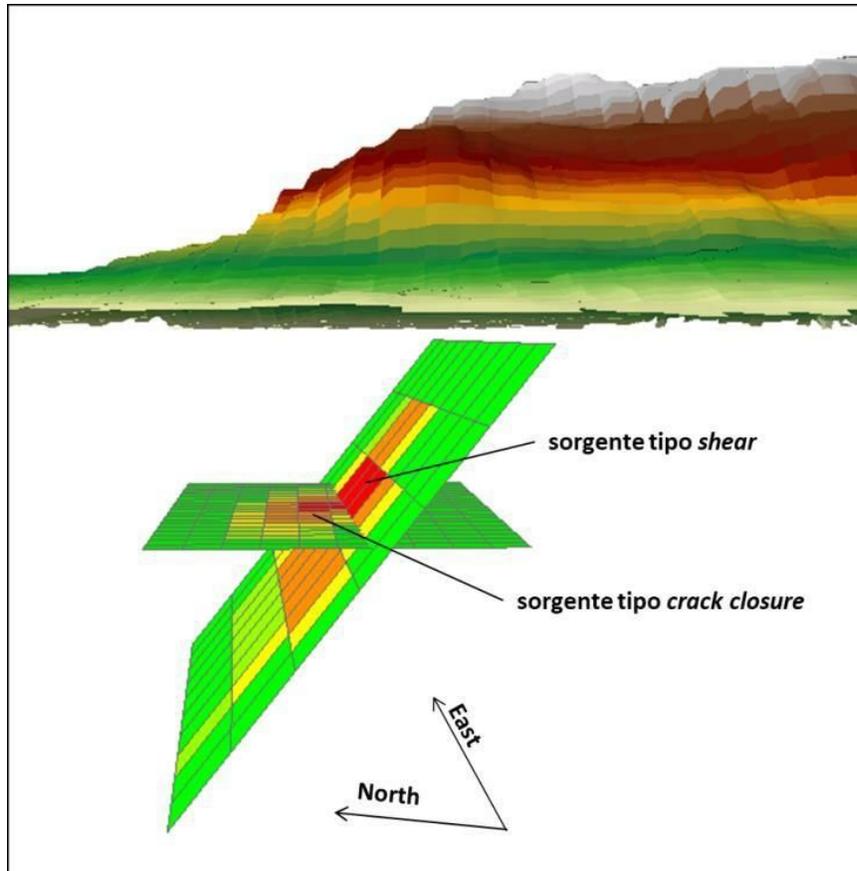


Figura 3.4.2-8. Visione 3D dei due modelli proposti.

Il fit del dato geodetico ottenuto tramite il modello *crack closure* è uguale a quello ottenibile con sorgente di tipo *shear* (paragrafo successivo), pertanto la modellazione non permette la discriminazione di questi due fenomeni.

Modello 2 - Sorgente di *shear* su piano

L'inversione non lineare ha individuato una superficie di scorrimento con orientamento sostanzialmente Est-Ovest, immergente verso nord e con meccanismo quasi normale puro (vedi tabella 3.4.2-2), con uno scorrimento medio di 13 cm (Figura 3.4.2-9). Riguardo quest'ultimo parametro, così come per lunghezza e larghezza dell'area interessata, si rimanda alla soluzione dell'inversione lineare, ovvero al calcolo della distribuzione di scorrimento lungo il piano individuato con l'inversione non-lineare (Figura 3.4.2-10).

Parametro	Valore	Sigma
Strike	263°	9°
Dip	51°	11°
Rake	-92°	33°

Tabella 3.4.2-2. Parametri di best-fit.

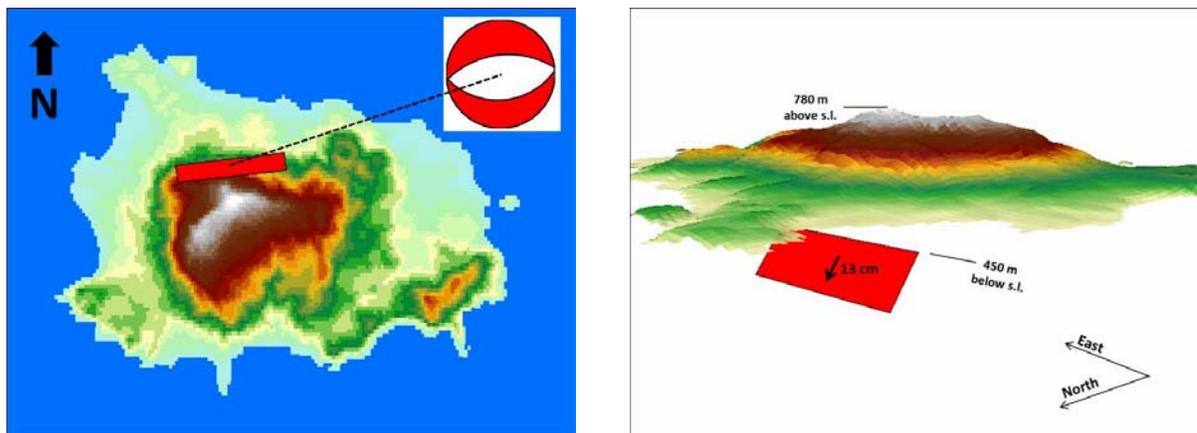


Figura 3.4.2-9. Visione planimetrica e 3D della soluzione ottenuta tramite inversione non-lineare del dato InSAR.

La distribuzione di scorrimento sul piano (Figura 3.4.2-10) viene calcolata estendendo la superficie individuata con l'inversione non-lineare; viene adottata anche in questo caso la compensazione per la quota topografia. Nelle soluzioni di Figura 3.4.2-10 **la dimensione delle patch è di 250 m x 250 m**.

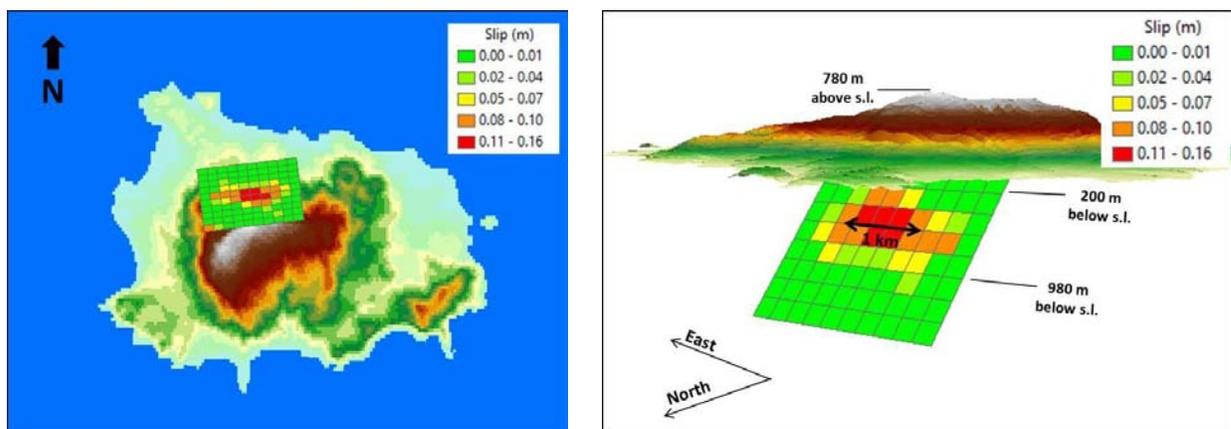


Figura 3.4.2-10. Distribuzione dello scorrimento lungo il piano individuato tramite inversione non-lineare.

Analisi

È evidente come la soluzione basata sui soli dati InSAR e modelli analitici non permetta di discriminare se lo spostamento misurato in superficie sia indotto da rilascio di stress tettonico o da fenomeni gravitativi, con possibili cause di natura vulcanica (ipotesi di sorgente di tipo *crack closure*).

Se si assume l'ipotesi di uno slip lungo un piano di faglia, la principale inconsistenza del modello riguarda la magnitudo corrispondente al momento geodetico della distribuzione di slip (in Figura 3.4.2-10), che ha un valore **M 4.4, significativamente superiore alla M_L 3.6 e M_D 4.0** calcolati per l'evento. Questa differenza, tuttavia, può essere giustificata con le approssimazioni del modello, con la probabilità che parte della deformazione non sia cosismica e con la presenza di disturbi atmosferici nel dato InSAR.

L'analisi delle incertezze, inoltre, ben rappresenta l'**instabilità della soluzione**. Essa viene condotta con ripetute inversioni non lineari del dato osservato "sporcato" con un rumore tipico del dato InSAR. In Figura 3.4.2-11 viene riportata la "nuvola di soluzioni" intorno alla sorgente di *best-fit* (rossa, in trasparenza). Si vede chiaramente la grande dispersione delle soluzioni, come peraltro atteso da **basso SNR dei dati**. La dispersione di queste soluzioni è sintetizzata nei valori di sigma riportati in Tabella 3.4.2-2.

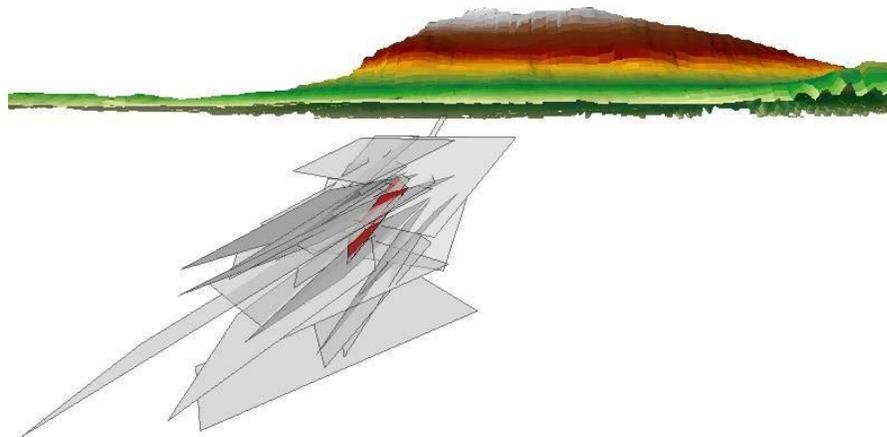


Figura 3.4.2-11. Rappresentazione 3D delle incertezze.

Si tratta, in sintesi, di una **modellazione ai limiti delle possibilità degli strumenti impiegati**, tenuto conto della bassa magnitudo dell'evento, e possibile solo per la presenza di un segnale apprezzabile dovuto probabilmente alla superficialità dell'evento. Per quanto questi modelli non siano sufficientemente vincolati da fornire certezze in merito alla natura della sorgente, **sembirebbe escludere ragionevolmente l'ipotesi che la deformazione misurata sia interamente dovuta a una frana lungo un piano di scorrimento nel fianco del Monte Epomeo, lasciando aperta la possibilità che si**

tratti di slip sismico, di fenomeno gravitativo profondo o di depressurizzazione localizzata (o una combinazione dei vari fattori). A margine, si evidenzia che la struttura individuata tramite inversione è in buon accordo con la struttura ITIS068 riportata nel catalogo DISS (Basili et al., 2009).

Per completezza, viene riportato il confronto fra dato osservato e dato modellato. Nella Figura 3.4.2-12 lo **“stretching” del dato (osservato e modellato) rappresenta la deformazione misurata nella linea di vista del satellite e non quella verticale.**

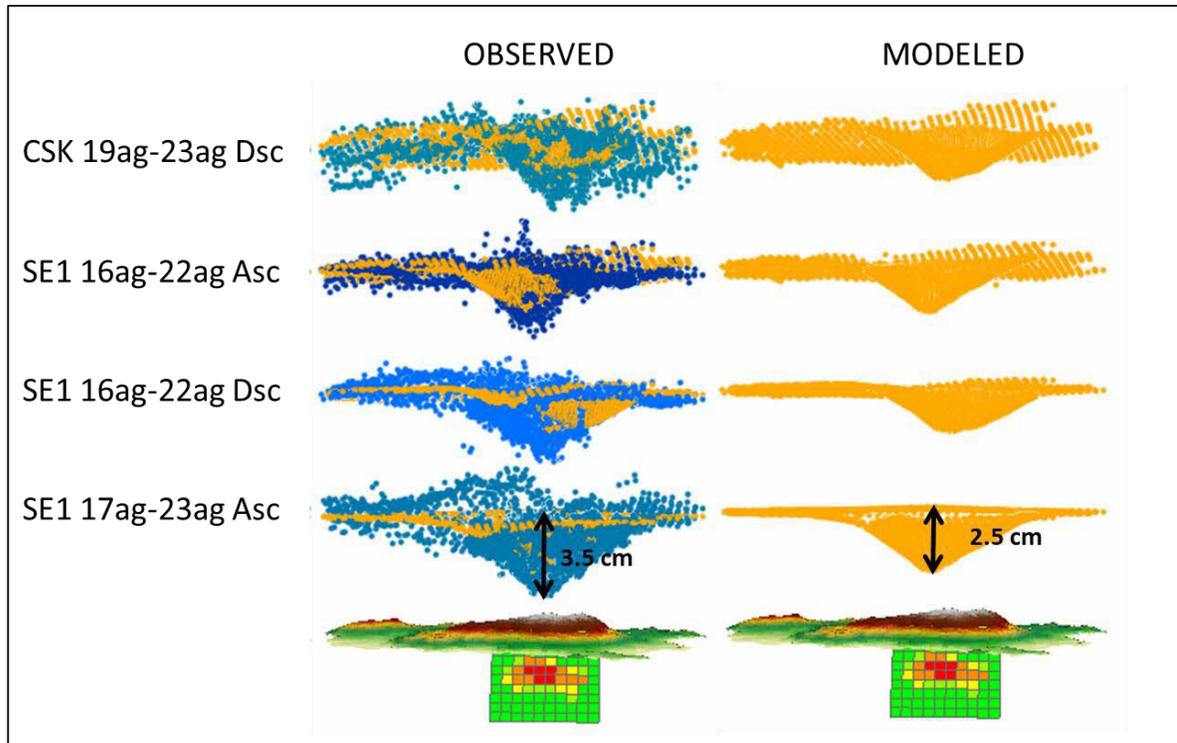


Figura 3.4.2-12. Rappresentazione 3D del campo di deformazione osservato e modellato.

Modellazione dinamico numerico preliminare

Le deformazioni cosismiche ottenute come già visto precedentemente mostrano un evidente pattern di deformazione del suolo (in allontanamento dal satellite) localizzato a circa 1 km a sud di Casamicciola e Lacco Ameno, con ampiezza massima non superiore ai 4 cm (± 1 cm). Tale deformazione risulta localizzata in aree caratterizzate da elevata pendenza e da un'elevata suscettibilità a franamento sismoindotto (Figura 3.4.2-13).

Come descritto precedentemente, le tre mappe di deformazione cosismica, seppur affette da artefatti atmosferici, mostrano tutte un pattern ben localizzato nella zona epicentrale, per

cui si può confermare che la dislocazione misurata dal SAR è associabile ad una reale deformazione superficiale indotta dal terremoto e non correlabile a fenomeni atmosferici locali. Ulteriori indagini sono attualmente in corso per meglio delineare e stimare l'entità della deformazione osservata.

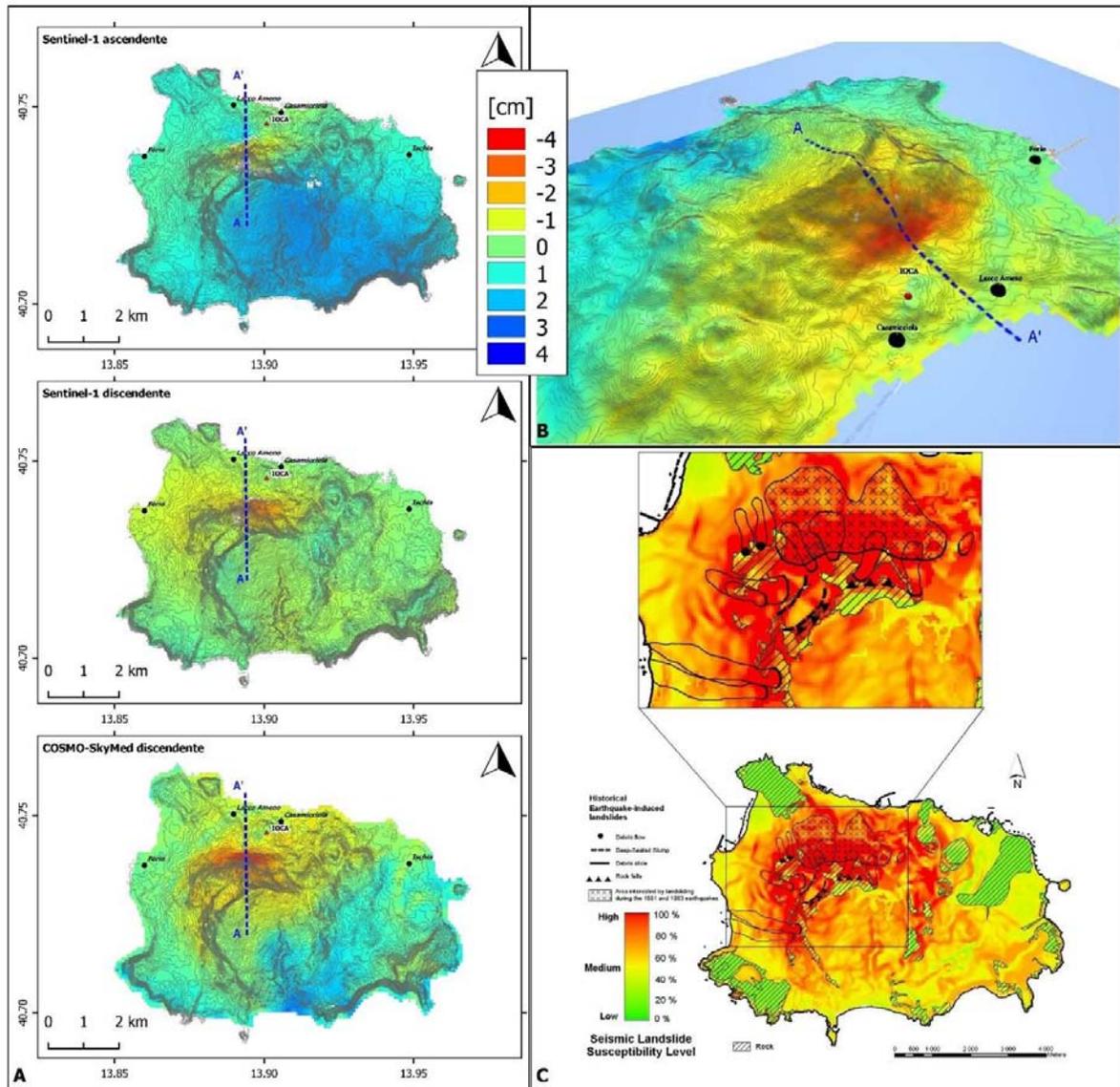


Figura 3.4.2-13. A) Deformazione cosismica misurata tramite dati InSAR provenienti dalle costellazioni Sentinel-1 e COSMO-SkyMed; B) Rappresentazione 3D della deformazione cosismica (dato COSMO-SkyMed); C) Mappa di suscettibilità per frane sismoindotte (Rapolla et al., 2010).

Si è quindi proceduto ad una modellazione dinamica diretta preliminare al fine di analizzare la forma e l'ampiezza delle eventuali deformazioni del pendio indotte dall'onda sismica prodotta dal terremoto del 21 agosto. Il modello numerico preliminare (Figura 3.4.1-14) comprende il profilo topografico della sezione A-A' in Figura 3.4.1-13, si estende per 3500

metri in lunghezza e per 200 metri al di sotto del livello del mare. Il comportamento del materiale di cui è costituito il modello è di tipo elastico-perfettamente plastico ed isotropo, le cui proprietà elastiche (modulo di Young (E) e coefficiente di Poisson (ν)) ed a rottura (coesione efficace (c') ed angolo di attrito (ϕ)) sono state selezionate, in via preliminare, da dati di letteratura relativi alle litologie dell'area in esame (Rapolla et al., 2010). La sollecitazione sismica, applicata alla base del modello come accelerazione nel tempo (Figura 3.4.2-14), corrisponde alla componente orizzontale Nord-Sud degli accelerogrammi registrati presso la stazione accelerometrica IOCA e liberamente disponibili all'indirizzo <https://t.co/it4l2tZj68> (Engineering Strong Motion Database – ESM). La componente verticale di accelerazione non è stata considerata in via preliminare.

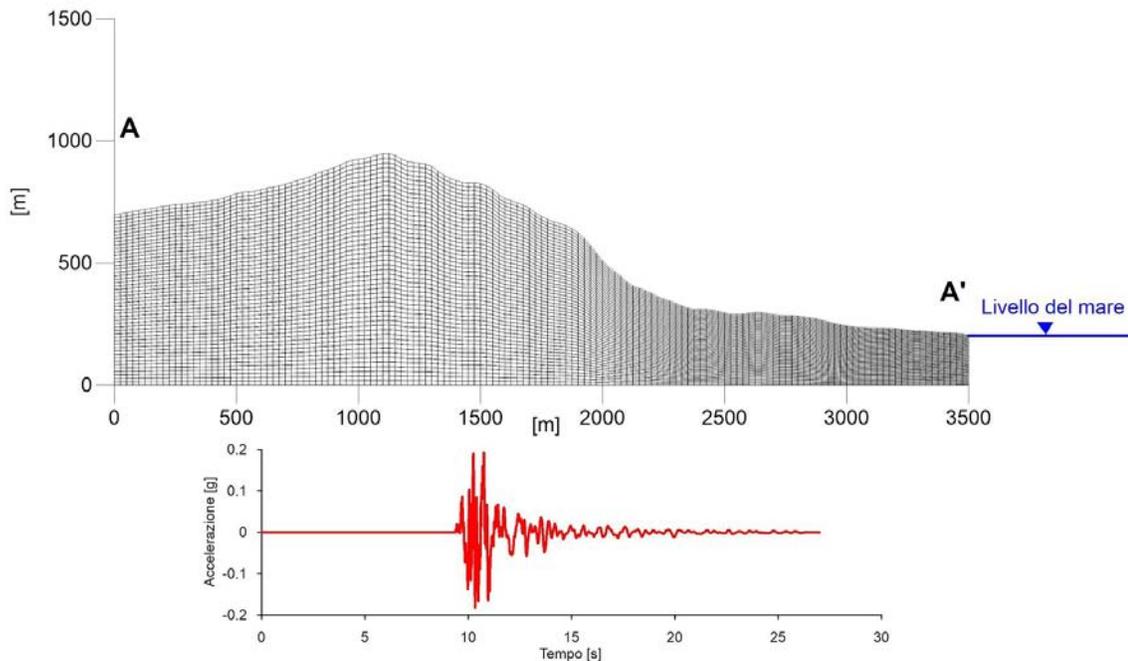


Figura 3.4.2-14. Schema numerico 2D semplificato della sezione topografica A-A' in Figura 3.4.2-13. L'input sismico applicato (grafico in rosso) corrisponde alla registrazione accelerometrica Nord-Sud registrata presso la stazione accelerometrica IOCA (Figura 3.4.2-13).

I risultati preliminari della modellazione dinamica diretta sono presentati in termini di spostamenti orizzontali e verticali lungo il profilo topografico della sezione A-A' modellata, al termine dell'applicazione della sollecitazione dinamica.

Al fine di confrontare tali spostamenti con le osservazioni satellitari, le componenti orizzontali e verticali stimate dal modello sono state proiettate lungo la linea di vista (LOS) dei satelliti, e quindi sovrapposti alle deformazioni del suolo osservate lungo la sezione A-A' (Figura 3.4.2-15). Il profilo di deformazione modellato (linea nera tratteggiata) presenta un andamento simile ai profili di deformazione misurati tramite tecniche satellitari (simboli), evidenziando quindi la compatibilità della deformazione osservata con la eventuale mobilitazione superficiale di una massa, indotta da sollecitazioni dinamiche. L'ampiezza

delle deformazioni misurate e modellate risulta invece poco correlata. Tale discrepanza è associabile ad errori nel dato satellitare indotti da disturbi atmosferici ed errori del modello numerico indotti dalla tipologia di modellazione adottata, necessariamente molto semplificata. Tale modellazione, per quanto speditiva, evidenzia comunque la compatibilità delle deformazioni osservate con la eventuale mobilitazione superficiale di massa indotta dalla sollecitazione dinamica. Si ritiene quindi di fondamentale importanza verificare in-situ le condizioni di stabilità del pendio.

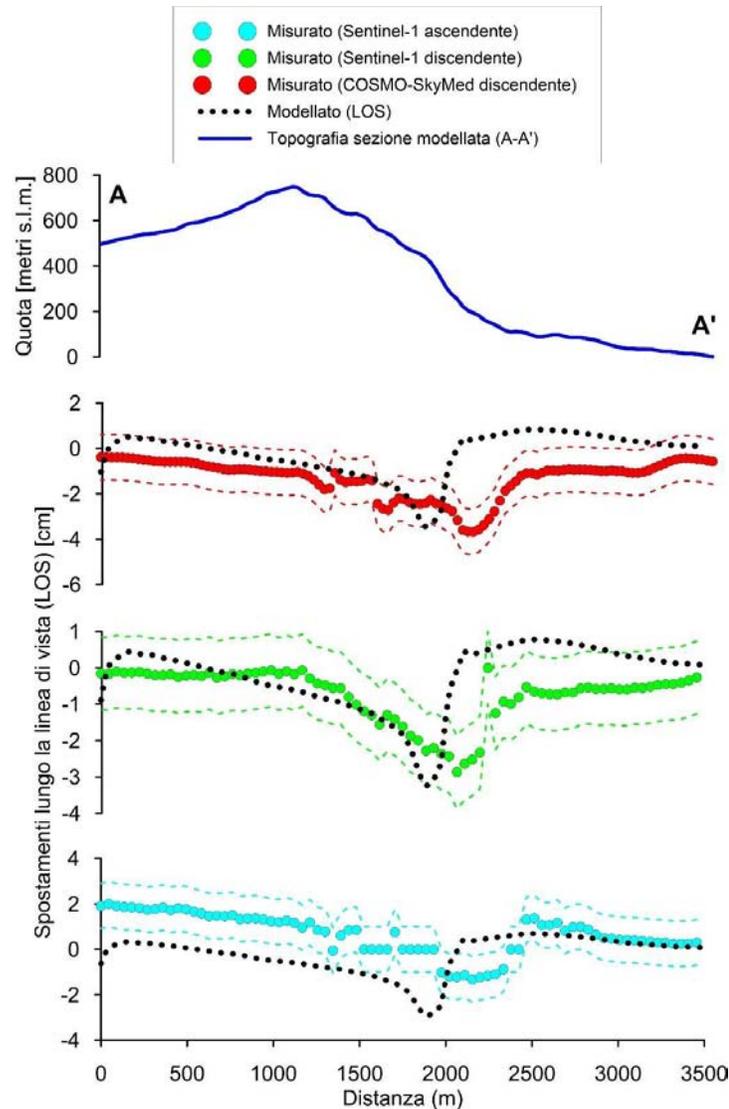


Figura 3.4.2-15. Confronto tra le deformazioni del suolo misurate tramite dati satellitari e le deformazioni modellate al termine dell'analisi dinamica, proiettate lungo la linea di vista del satellite. Le linee tratteggiate rappresentano l'incertezza associata alle deformazioni osservate tramite misure satellitari.

3.5 Rilievi geologici

Le attività di rilievo geologico, effettuate nei giorni 22 e 23 agosto, sono proseguite con ulteriori rilievi sul campo il giorno 30. La ricognizione degli effetti geologici in superficie si è concentrata nell'area compresa tra Fango e Piazza Maio (Casamicciola), area epicentrale dove si sono concentrati i maggiori danneggiamenti macrosismici e i principali effetti geologici al suolo (Fig. 3.5-1).

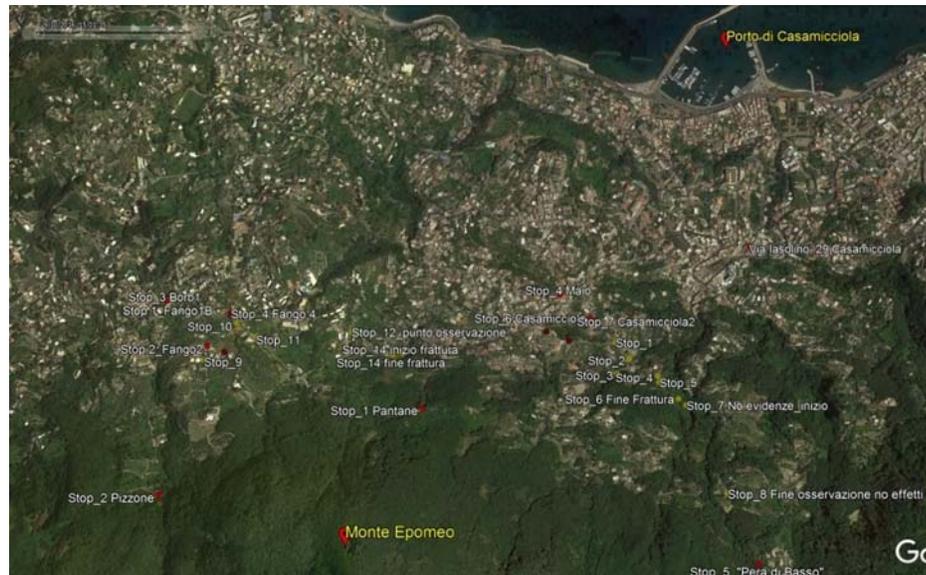


Fig. 3.5-1. Area rilevata: in rosso i rilievi del 22, 23 agosto, in giallo i rilievi del 30 agosto.

Stop 1 (40.741195°, 13.903732°) Crollo del muretto a secco con direzione del ribaltamento verso Nord (Foto 1).



Foto 1. Crollo del muretto a secco lungo una traversa di via S. Barbara, Casamicciola.

Stop 2 (40.740670°, 13.904313°) fine crolli dei muretti a secco (Foto 2).



Foto 2. Fine evidenze crolli dei muretti a secco lungo una traversa di via S. Barbara, Casamicciola.

Stop 3 (40.740217°, 13.903782°) Frane di crollo di blocchi tufacei dal versante Nord del M.te Epomeo lungo una traversa di via S. Barbara, Casamicciola (Foto 3).

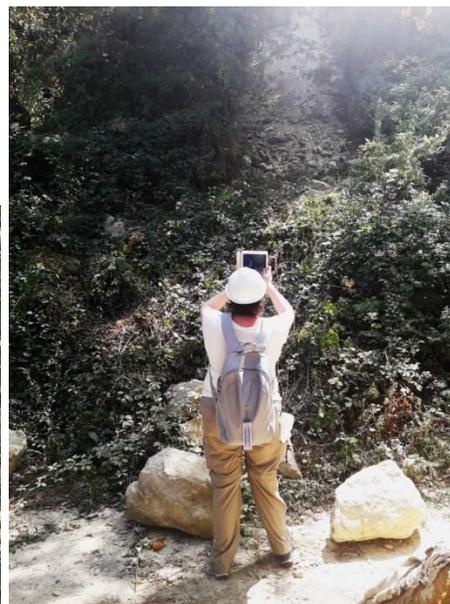


Foto 3. Frane di crollo di blocchi tufacei dal versante Nord del M.te Epomeo, lungo una traversa di via S. Barbara, Casamicciola.

Stop 4 (40.740133°, 13.905439°) Continuando lungo la traversa di via S. Barbara si evidenziano frane dalla parete (con direzione NW-SE), nei depositi vulcanoclastici (Foto 4).



Foto 4. Frane nei depositi vulcanoclastici tufacei.

Stop 5 (40.739936°, 13.905507°) Fine delle evidenze delle frane nei depositi vulcanoclastici lungo il tratto stradale percorso. La foto 5 mostra la rottura del tubo di irrigazione.



Foto 5. Particolare del danno al tubo di irrigazione.

Stop 6 (40.739414°, 13.906295° inizio frattura) Continuando lungo la strada si evidenzia una frattura nell'asfalto della lunghezza di 20 m (40.739416°, 13.906295° fine frattura) con strike N110E (Foto 6).



Foto 6. Frattura nell'asfalto della lunghezza di 20 m (a sinistra); dettaglio della frattura (a destra).

Stop 7 (40.739227°, 13.906593°) Da questo punto del percorso non si hanno più evidenze di fenomeni cosismici fino allo stop 8 (40.736643°, 13.908009°).

Stop 9 (40.740785°, 13.886896°) Il sopralluogo è proseguito in località Fango (Lacco Ameno), lungo via Crateca, dove si è evidenziato il crollo di un muretto a secco (Foto 7).



Foto 7. Crollo di un muretto a secco.

Stop 10 (40.741907°, 13.888118°) Il sopralluogo è proseguito lungo Via dei Carri (Casamicciola) dove si sono osservati diversi crolli di muretti a secco (Foto 8).



Foto 8. Crollo di un muretto a secco.

Stop 11 (40.741484°, 13.888913°) Continuando lungo Via dei Carri (Casamicciola) si è osservata una frattura di 2 m, con strike N60E, nell'asfalto del piazzale di una abitazione che presenta danni gravi. La frattura si perde nel tratto di strada sterrata (Foto 9).



Foto 9. Frattura nell'asfalto.

Stop 12 (40.741598°, 13.892796°) Punto di osservazione dell'area fumarolica vista da Via Montecito (Casamicciola) (Foto 10).



Foto 10. Area fumarolica osservata da Via Montecito.

Stop 13 (40.740828°, 13.894669°) proseguendo su Via Montecito (Casamicciola), lungo una strada privata si evidenzia una frattura nell'asfalto di 10 m con strike medio N70E (Foto 11).



Foto 11. Frattura nell'asfalto, Via Montecito (Casamicciola).

Stop 14 (40.740897°, 13.894869°) Proseguendo lungo questa strada privata, si è osservata una frattura nel terreno coltivato che prosegue nell'asfalto e nei manufatti per una lunghezza di 35 m con strike N80E (Foto 12 e Foto 13).



Foto 12. Frattura continua dal terreno coltivato fino ai manufatti (a sinistra). Dettaglio della frattura nel terreno coltivato (a destra).



Foto 13. Frattura nel solaio di copertura e danni ai manufatti (a sinistra) con evidente rotazione di parte della colonna in mattoni di tufo (a destra).

Sono presenti anche altre fratture parallele a quella appena descritta e notevoli danni nei manufatti (Foto 14).



Foto 14. Danni al muro di contenimento e al manufatto.

3.6. Rilievo macrosismico

A seguito del terremoto che ha colpito l'isola di Ischia il 21 agosto 2017, alle ore 20:57 italiane, squadre del gruppo di emergenza QUEST-INGV, in collaborazione con personale ENEA, hanno avviato il rilievo macrosismico sul terreno nel pomeriggio del 23 agosto. Il rilievo è stato condotto secondo le procedure del gruppo QUEST: la valutazione del danneggiamento si basa sul danno visibile all'esterno degli edifici; la stima dell'intensità è riferita alla scala macrosismica europea EMS-98.

L'area maggiormente danneggiata dal terremoto è la parte alta dell'abitato di Casamicciola, sul versante settentrionale di Monte Epomeo. Il dettaglio dell'indagine macrosismica ha consentito di distinguere chiaramente zone con diverso danneggiamento all'interno del territorio comunale di Casamicciola Terme.

La più colpita, che chiameremo "Casamicciola Zona Rossa", include i quartieri di Piazza Maio, La Rita e Gran Sentinella, ha subito danni complessivamente gravi: la maggioranza delle abitazioni è in muratura, costruite con blocchetti di tufo tenero, solo occasionalmente con elementi lapidei più competenti o mattoni; assenti elementi vincolanti di rinforzo quali tiranti e catene. Questa tipologia di edifici è classificabile nella classe di vulnerabilità B della scala EMS; percentualmente più bassa la presenza di edifici in muratura con caratteristiche più scadenti, in stato anche fatiscente (classe A), e limitata quella di costruzioni in cemento armato più o meno recenti (classe C). Va tuttavia evidenziata la complessità dell'edificato, con edifici che presentano profonde modifiche strutturali e superfetazioni.

Negli edifici di classe B sono stati osservati tre crolli totali e qualche crollo parziale (Fig. 3.6-1). Molti i danni di tipo 3, quali lesioni passanti a croce di S. Andrea, perdita di verticalità e ribaltamento di pareti, espulsione di spigoli, ecc., che determinano situazioni a rischio di crollo (Fig. 3.6-2). Negli edifici in CA sono presenti solo in rari casi danni di grado 1 o 2.

Il quadro dei danni osservati nell'area definita "Casamicciola Zona Rossa", porta all'assegnazione del grado di intensità 8 EMS (Tab. 3.6-1).



Figura 3.6-1. Casamicciola "Zona Rossa": crollo totale e parziale.



Figura 3.6-2. Casamicciola "Zona Rossa": espulsione di muratura e rottura dell'angolata muraria in edifici di classe B.

Danni diffusi e significativi hanno interessato la frazione di Fango (comune di Lacco Ameno), caratterizzata da una tipologia edilizia simile; qui i due crolli totali sono avvenuti in edifici fatiscenti (Fig. 3.6-3).

Anche il quartiere "Bagni" di Casamicciola ha subito danni diffusi di una certa entità, sebbene meno appariscenti per la miglior qualità costruttiva dell'edificato.

Ad entrambi è stata attribuita una intensità 7 EMS.



Figura 3.6-3. Fango (Lacco Ameno): crollo parziale e lesioni passanti alle murature.

La zona costiera prospiciente il porto, denominata Marina di Casamicciola, non è stata particolarmente colpita, avendo avuto danni lievi ma diffusi (Fig. 3.6-4) tipici di uno scenario di danno riferibile ad un'intensità 6 EMS.



Figura 3.6-4. Marina di Casamicciola: distacco del cornicione dalla Chiesa di S. Maria della Pietà e lesioni leggere in un edificio in muratura.

Danni sporadici molto lievi (piccole crepe agli intonaci, caduta di calcinacci) sono stati infine rilevati a Fontana (frazione di Serrara Fontana), sul versante meridionale di Monte Epomeo, Cretaio (frazione di Forio, circa 3 km a sud-est dell'area di massimo danneggiamento) e Lacco Ameno.

Per quanto riguarda l'avvertibilità nel resto dell'isola, definita tramite visite dirette e interviste alla popolazione, si nota una rapida attenuazione dell'intensità macrosismica sino a valori 3 EMS lungo la fascia costiera meridionale dell'isola di Ischia (Fig. 3.6-5).

In Tabella 3.6-1 è riportata la lista delle località investigate e le intensità assegnate, passibili di eventuali modifiche in caso di ulteriori dati.

Località	Comune	Int. EMS
Casamicciola Terme "Zona Rossa"	Casamicciola Terme	8
Bagni	Casamicciola Terme	7
Fango	Lacco Ameno	7
Marina di Casamicciola	Casamicciola Terme	6
Fontana	Serrara Fontana	5-6
Cretaio	Forio	5
Lacco Ameno	Lacco Ameno	5
Ciglio	Serrara Fontana	5
Fiaiano	Barano d'Ischia	5
Monterone	Forio	5
Serrara	Serrara Fontana	5
Barano	Barano d'Ischia	4-5
Forio	Forio	4-5
Perrone	Casamicciola Terme	4-5
Piedimonte	Barano d'Ischia	4-5
Buonopane	Barano d'Ischia	4
Ischia	Ischia	4
Panza	Forio	4
Sant'Antuono	Ischia	4
Campagnano	Ischia	3-4
Cuotto	Forio	3-4
San Domenico	Ischia	3
Sant'Angelo	Serrara Fontana	3
Succhivo	Serrara Fontana	3

Tabella 3.6-1.

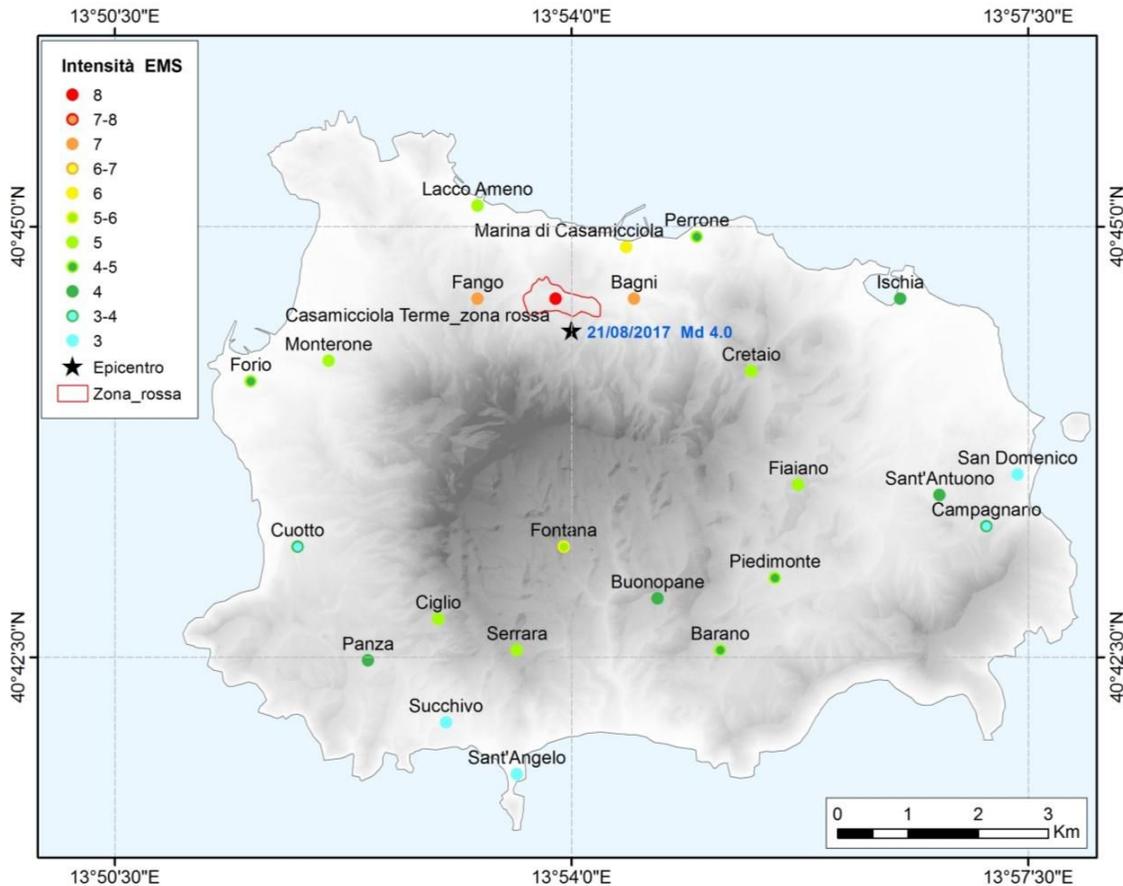


Figura 3.6-5. Mappa dell'intensità macrosismica del terremoto del 21 agosto 2017 (ore loc. 20:57).

In conclusione, le caratteristiche macrosismiche del terremoto del 21 agosto 2017 (20:57 loc.) – concentrazione dei danni e loro gravità, fortissima attenuazione dell'intensità a distanze anche molto ridotte – sono quelle tipiche dei terremoti superficiali in aree vulcaniche generalmente associati a modesti valori di magnitudo.

Inoltre la distribuzione puntuale del danneggiamento all'interno della cosiddetta "Zona Rossa" configura, a nostro avviso, un chiaro effetto di sito nella zona collinare di Casamicciola Terme, che ricalca perfettamente quanto osservato in occasione del terremoto distruttivo del 1883.

3.7 Rilievi geochimici

La rete di sorveglianza geochimica dell'isola d'Ischia della Sezione INGV di Palermo consiste in 14 siti di campionamento di acque termali e 2 di gas liberi (Figura 3.7-1) campionati due volte l'anno. L'ultima campagna è stata effettuata nel mese di giugno 2017. Lo studio delle variazioni chimico-fisiche dei gas e delle acque fornisce importanti indicazioni sulla circolazione dei fluidi e sulle dinamiche del sistema geotermico.

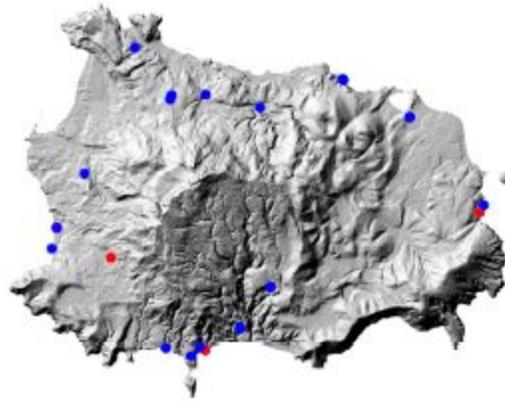


Figura 3.7-1. Ubicazione dei punti di campionamento della rete di sorveglianza geochimica.
 ● = acque; ● = gas liberi

Nell'isola di Ischia sono stati riconosciuti, sulla base delle caratteristiche chimiche ed isotopiche delle acque, tre reservoir idrotermali in corrispondenza dei centri di Lacco Ameno, Casamicciola e Panza-Serrara, considerato il più attivo.

Gli acquiferi sono di origine meteorica e marina sovrapposti e interagenti con fluidi geotermali e con le rocce serbatoio.

L'interazione fra fluidi magmatici, geotermici e i sistemi idrici superficiali è testimoniata dalla composizione isotopica di C della CO₂ (tra 0 d‰ e -3.0 d‰) e dell'He (~ 3.5 R/Ra) nei gas disciolti.

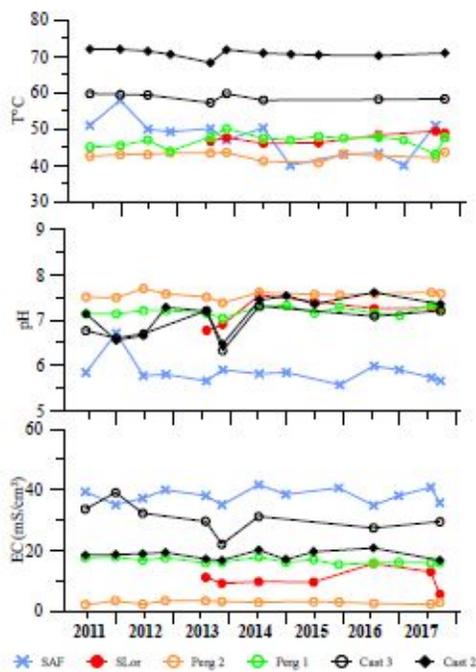


Figura 3.7-2. Variazioni temporali di temperatura (°C), Conducibilità (mS/cm²) e pH delle acque campionate.

Negli ultimi decenni, non sono state rilevate variazioni importanti nella composizione chimica ed isotopica delle acque e dei gas campionati, connesse alla riattivazione della attività vulcanica (Fig. 3.7-2). Le variazioni nei parametri infatti ricadono nei range delle oscillazioni stagionali e/o sono riconducibili a fenomeni di interazione con le rocce, gas, acqua di mare. La stabilità nella composizione chimica dei fluidi campionati si riflette sulla stabilità delle condizioni del reservoir geotermale profondo, nel quale risultano costanti le temperature stimate. Dati bibliografici indicano che prima del terremoto di Casamicciola del 1993 alcune evidenti variazioni sono state riscontrate come ad esempio l'intorbidamento delle acque di alcuni pozzi, l'aumento di attività e comparse di nuove fumarole nel settore settentrionale dell'isola e mentre, nel settore meridionale, il raffreddamento di alcune sorgenti termali e una minore attività o in alcuni casi la scomparsa per alcuni giorni di fumarole (De Rossi, 1884; Mercalli, 1884, Molin et al 2003).

A seguito del terremoto del 21 agosto è stato effettuato il campionamento di acque termali e gas fumarolici ubicati nel settore settentrionale dell'isola (22-25 agosto) al fine di determinare eventuali variazioni nei parametri chimici legate al sisma. In particolare sono stati prelevati 7 campioni di acque termali e 2 di gas fumarolici, appartenenti alla rete geochemica di monitoraggio (Fig. 3.7-3), per la determinazione della composizione chimica (elementi maggiori e minori) e isotopica (dD e $d^{18}O$ dell'acqua e dC_{CO_2} e He R/Ra nel gas). Sul campo sono stati misurati i parametri chimico-fisici delle acque (pH, EC, T, Eh) e le Temperature dei gas fumarolici (Tab. 3.7-1). Oltre ai campioni che fanno parte della rete di sorveglianza, sono stati prelevati i gas di 6 fumarole sottomarine da campi fumarolici preesistenti segnalateci dalla dr.ssa Maria Cristina Gambi della Stazione Zoologica 'Anton Dohrn' di Ischia (Figura 3.7-3). In Tabella 3.7-1 sono elencati i punti di campionamento ed in Tabella 3.7-2 sono riportate le analisi dei campioni gassosi.

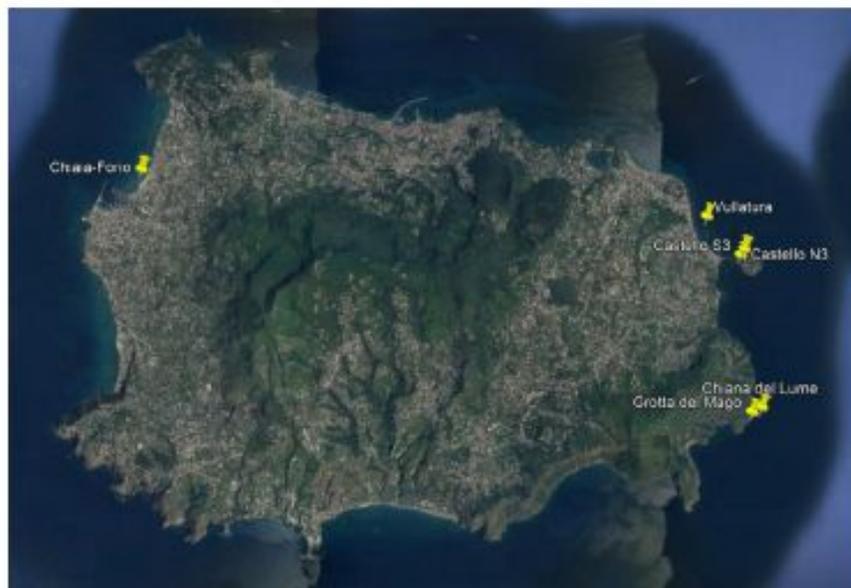


Figura 3.7-3. Ubicazione dei punti di campionamento delle emissioni sottomarine.

I parametri chimico-fisici delle acque (Figura 3.7-2) non mostrano variazioni significative rispetto al campionamento effettuato a giugno 2017 e rientrano nei range degli ultimi anni nonostante sia stato notato, durante il campionamento, un aumento della torbidità delle acque, evidente soprattutto nei campioni La Pergola e Villa Flavio, ubicati in prossimità della zona più colpita dal sisma.

Sito	Località	Tipologia
Castiglione 2	Casamicciola	pozzo
Castiglione 3	Casamicciola	pozzo
La Pergola 1*	Casamicciola	pozzo
La Pergola 2	Casamicciola	pozzo
Villa Flavio	Casamicciola	pozzo
San Lorenzo	Lacco Ameno	pozzo
Safen Citara	Forio	sorgente
Safen Citara	Forio	gas gorgogliante
Maronti	Maronti	fumarola
Castello S3	Ischia Ponte	emissioni sottomarine
Castello N3	Ischia Ponte	emissioni sottomarine
Vullatura	Ischia Ponte	emissioni sottomarine
Chiane del Lume	Carta Romana	emissioni sottomarine
Grotta del Mago	Carta Romana	emissioni sottomarine
Chiaia	Forio	emissioni sottomarine

Tabella 3.7-1. Elenco dei siti campionati.

Sulla base della composizione chimica dei campioni che hanno raggiunto la parziale o totale maturità geochimica (ossia il totale o parziale equilibrio con le rocce secondo la definizione di Giggenbach, 1988) è stato possibile stimare la temperatura del reservoir geotermale.

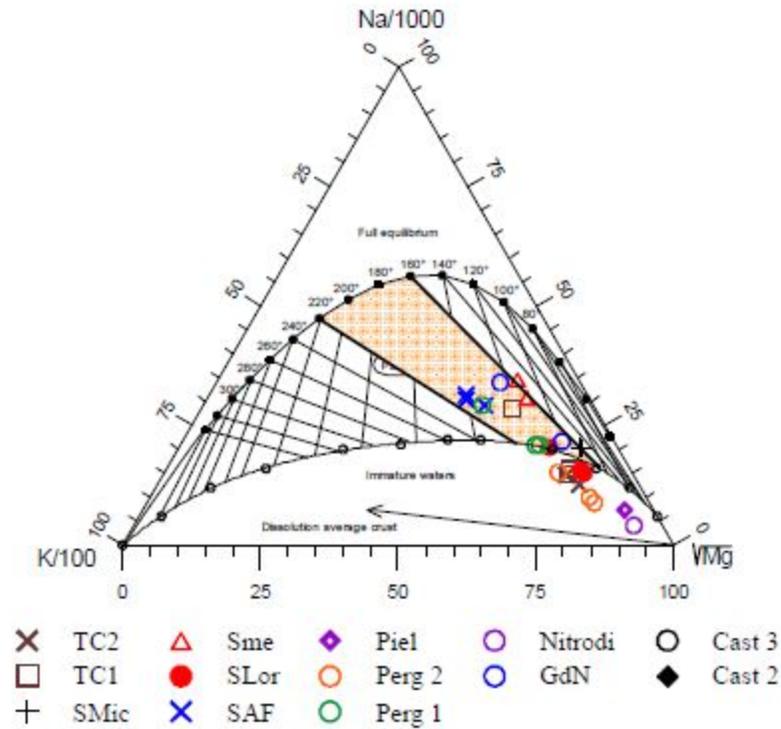


Figura 3.7-4. Geotermometro di Giggenbach (1988).

I valori stimati di temperatura variano tra 160° e 220°C in accordo con quelli stimati da altri autori (Di Napoli et al. 2009, 2011), in buon accordo con le temperature misurate nei pozzi perforati dalla SAFEN negli anni '50 (Penta e Conforto, 1951; Penta, 1954). Da rilevare che i valori stimati non si discostano significativamente da quelli precedenti.

Per quanto riguarda i gas campionati, questi mostrano una composizione a CO₂ prevalente, con contaminazioni atmosferiche trascurabili.

In quasi tutti i campioni, le concentrazioni di He sono più alte di quelle dell'aria e raggiungono valori molto alti (~46 ppm) nel campione SAFEN.

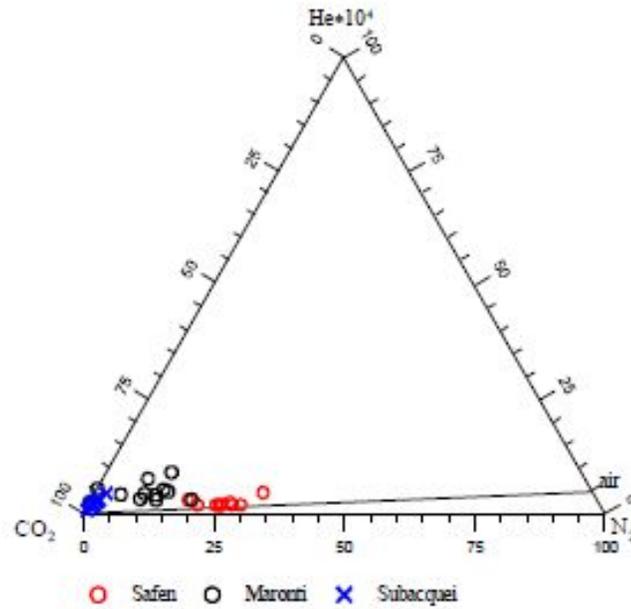
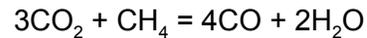


Figura 3.7-5. Diagramma ternario CO₂, N₂, He.

I campioni presentano una composizione isotopica dell'He (Fig. 3.7-6), intorno a 3.5 Ra, il valore dell'He dal mantello locale (Di Napoli et al., 2009, 2011), e non mostrano variazioni di rilievo rispetto ai dati precedenti. I campioni delle fumarole sottomarine mostrano valori leggermente inferiori, probabilmente a causa di una maggiore interazione con le rocce.

È stata fatta una valutazione della T del reservoir per mezzo della geotermometria gassosa utilizzando la reazione (Beltrami et al., 1985):



Assumendo una P_{H₂O} fissata dalla presenza di acqua liquida in un sistema bifase, la T di equilibrio è stata calcolata con l'equazione

$$T(\text{K}) = 13605.63 / (8.0651 + 4\log\text{CO} - 3\log\text{CO}_2 - \log\text{CH}_4).$$

Le temperature stimate variano tra 260° e 370°C e non sono distanti da quelle stimate da dati precedenti di emissioni gassose.

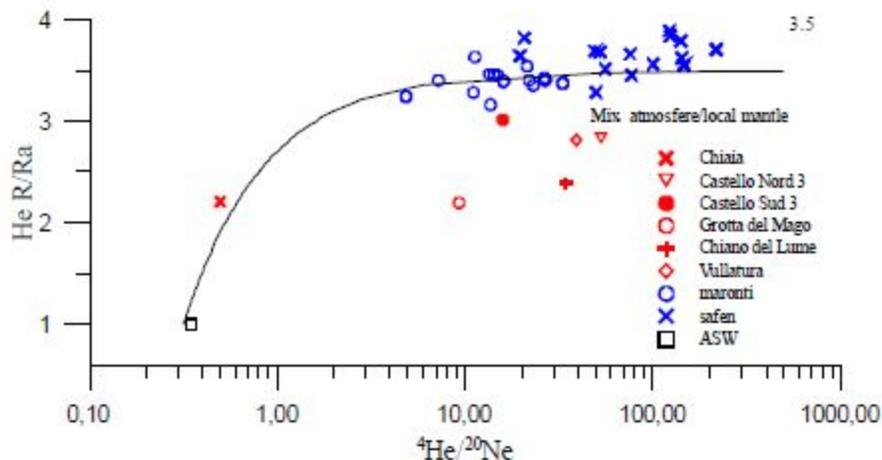


Figura 3.7-6. Rapporto isotopico dell'elio ($^3\text{He}/^4\text{He}$) espresso come R/R_a (dove R è il rapporto isotopico nel campione, R_a il rapporto in aria), rispetto al rapporto He/Ne . La linea indica un possibile mixing tra il gas magmatico con $3.5 R/R_a$ e l'aria.

È stato segnalato dalla Dr.ssa Gambi, un aumento dell'attività dell'output esalativa di alcune fumarole sottomarine. Inoltre, abitanti dell'isola hanno rilevato la comparsa di nuove esalazioni sulla battigia della spiaggia dei Maronti in corrispondenza dell'hotel Vincenzo.

Ulteriori analisi sui campioni prelevati sono in corso ed una più definita elaborazione dei dati verrà fornita nel successivo aggiornamento.

samples	date	He	H ₂	O ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂
		ppm	ppm	%	%	ppm	ppm	%
Vullatura	25/8/17	4,10		0,19	1,39		3204	95,90
Chiano del Lume	25/8/17			0,08	2,59		4814	94,82
Grotta Mago	25/8/17			0,24	1,91		42	94,78
Chiaia Forio	24/8/17		11,00	0,05	0,26		58840	40,54
Castello sud 3	24/8/17	6,00		0,53	2,50		4342	93,14
Castello nord 3	24/8/17	9,00		0,35	3,22		2893	94,73
Polla Safen	23/8/17	32	1385	0,11	2,38	0,30	36	96,05
Fumarla Maronti	25/8/17	10	5550	1,91	4,53	1,60	59	90,10

Tabella 3.7-2. Composizione chimica dei gas prelevati. I primi sei campioni sono stati prelevati dalle emissioni gassose sottomarine come descritto in tabella 3.7-1.

4. Sintesi preliminare

Lo stato dell'isola d'Ischia precedente all'evento del 21 agosto 2017 era quello di una struttura vulcanica caratterizzata da una dinamica assai modesta, ovvero:

- una frequenza di accadimento della sismicità estremamente rara e di bassa energia (4 eventi di $M < 2.5$ registrati negli ultimi 2 anni e solo 3 eventi che hanno raggiunto una $M = 2.4$ dalla seconda metà degli anni '90);
- movimenti deformativi contenuti che interessano prevalentemente il settore meridionale dell'isola, non riconducibili a movimenti di magma ma piuttosto a fenomeni di carico gravitativo;
- assenza di componenti anomale (ad esempio magmatiche) nella composizione chimica dei fluidi emessi dal sistema nonché di anomalie di temperatura e di flusso.

Studi sulla sismicità storica evidenziano tuttavia la presenza di un numero contenuto di eventi con $M \geq 4$, il più antico dei quali avvenuto nel 1275, nonché un cluster temporale di sismicità nel XIX secolo che interessò la zona di Lacco Ameno e Casamicciola e che culminò con il terremoto del 1883. L'evento avvenuto il 21 agosto è pertanto compatibile con il quadro delle conoscenze sulla sismicità dell'area. A tale evento, a tutt'oggi, sono seguiti 27 eventi con $M \leq 1.9$. L'evoluzione del fenomeno permetterà tuttavia di meglio comprenderne la natura.

Le numerose analisi effettuate fino ad ora hanno consentito di esprimere una stima verosimilmente affidabile dell'ipocentro del terremoto del 21 agosto 2017; tale stima ha preso in considerazione tutte le principali variabili del sistema, dai modelli di velocità crostale, resi sempre più attendibili, ad un adeguato numero di stazioni che hanno registrato l'evento.

Le inversioni effettuate per ottenere il momento tensore e la M_w del terremoto ad oggi non forniscono soluzioni stabili, ma confermano preliminarmente una magnitudo momento M_w compresa tra 3.8 e 4.0. Per quanto riguarda il meccanismo focale sarà sicuramente necessario esplorare ulteriormente come variano le soluzioni che sono state già proposte in questi primi giorni.

Le mappe di scuotimento, la cui realizzazione ha risentito della presenza di un solo dato accelerometrico in prossimità dell'evento, sono ugualmente in fase di analisi e miglioramento anche alla luce delle indagini macrosismiche in corso di realizzazione (QUEST, 2017). Le forti accelerazioni osservate (0.27 g alla stazione IOCA) ed il danneggiamento sono imputabili anche a effetti di amplificazione locale causati dalla presenza di depositi superficiali incoerenti; alla stazione accelerometrica di Casamicciola è stata evidenziata una forte amplificazione tra 1.5 e 2 Hz.

Le risultanze delle analisi deformative dai dati GPS al momento a disposizione, ancora molto preliminari, sembrano suggerire un modesto effetto cosismico, con deformazioni orizzontali nell'area di Casamicciola dell'ordine del cm in direzione NNE.

Le misure SAR evidenziano uno spostamento del suolo lungo la componente verticale che raggiunge valori massimi di circa 3.6 cm in abbassamento. Per quanto riguarda la componente orizzontale essa è sostanzialmente trascurabile, pur mostrando una piccola porzione, localizzata a circa 500 m a ovest dell'epicentro, in movimento verso ovest di circa 1.5 cm. Varie modellazioni preliminari forniscono interessanti spunti per le analisi successive

Oltre alle attività di analisi dei dataset disponibili, l'INGV ha tuttora in corso sull'isola numerose attività sul campo (rilievi geologici, macrosismici, geochimici) ed altre saranno intraprese nei prossimi giorni. Tutte queste attività certamente concorreranno ad un ulteriore approfondimento delle conoscenze sul fenomeno avvenuto di cui l'Istituto darà prontamente informazione non appena disponibili.

Bibliografia citata e altre pubblicazioni pertinenti

- Acocella, V., e R. Funiciello, 1999. The interaction between regional and local tectonics during resurgent doming: the case of the island of Ischia, Italy. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 88, 109-123.
- AGIP S.P.A., 1984. Aeromagnetic map of Italy and surrounding seas. *Boll. Geofis. Teor. Appl.* 26, 101-102.
- Aiello, G., Marsella, E., Passaro, S., 2012. Stratigraphic and structural setting of the Ischia volcanic complex (Naples Bay, Southern Italy) revealed by submarine seismic reflection data. *Rend. Fis. Acc. Lincei* (2012) 23:387–408
- Alberico, I., Lirer, L., Petrosino, P., Scandone, R., 2008. Volcanic hazard and risk assessment from pyroclastic flows at Ischia island (southern Italy). *Journal of volcanology and geothermal research*, 171(1), 118-136.
- Alessio, G., E. Esposito, L. Ferranti, G. Mastrolorenzo, S. Porfido, 1996. Correlazione tra sismicità ed elementi strutturali nell'isola d'Ischia. *Il Quaternario*, 9, 303-308.
- Azzaro, R., D'Amico S., Tuvè T., 2011. Estimating the magnitude of historical earthquakes from macroseismic intensity data: new relationships for the volcanic region of Mount Etna (Italy). *Seism. Res. Lett.*, 82, 4, 533-544.
- Baratta M., 1901. I terremoti d'Italia. Saggio di storia, geografia e bibliografia sismica italiana (ristampa anastatica, Sala Bolognese 1979). Torino 1901.
- Barra, D., Cinque, A., Italiano, A., Scorziello, R., 1992a. Il Pleistocene superiore marino di Ischia: paleoecologia e rapporti con l'evoluzione tettonica recente. *Studi Geologici Camerti. Vol. Speciale*: 231-243.
- Barra, D., Italiano, A., Allegri, L., Belluomini, G., Manfra L., 1992b. La serie marina olocenica di Cafieri (isola d'Ischia): implicazioni vulcano-tettoniche e geomorfologiche. *Il Quatern.* 5 (1), 17-26.
- Bartole, R., 1984. Tectonic structures of the Latium-Campanian shelf (Tyrrhenian Sea). *Boll. Ocean. Teor. Appl.* 2, 197-230.
- Basili, R., Kastelic, V., Valensise, G., and DISS Working Group, 2009. DISS3 tutorial series: Guidelines for compiling records of the Database of Individual Seismogenic Sources, version 3, *Rapporti Tecnici INGV*, no. 108, 20 p.
- Battelli, P., Arcoraci, L., Berardi, M., Castellano, C., Marchetti, A., Mele, F., Nardi, A., e A. Rossi, (2013). *Bollettino Sismico Italiano 2010. Quaderni di Geofisica*, 115, INGV, Roma, 52 pp.
- Berardi, M., Arcoraci, L., Battelli, P., Castellano, C., Marchetti, A., Mele, F., Nardi, A., e A. Rossi, (2016). *Bollettino Sismico Italiano 2011. Quaderni di Geofisica*, 134, INGV, Roma, 51 pp.
- Bonito, M., 1691. *Terra tremante o vero continuatione de' terremoti dalla creatione del mondo fino al tempo presente*, Napoli.
- Boschi, E., G. Ferrari, P. Gasperini, E. Guidoboni, G. Smriglio e G. Valensise, 1995. *Catalogo dei Forti Terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1980*, I.N.G. e S.G.A. editori, Bologna, 973 pp., con CD-ROM.
- Bramerini, F., S. Castenetto, E. Cubellis, M. G. Martini, M. Rebuffat e P. Soddu, 1995. Earthquake, GIS and multimedia. The 1883 Casamicciola earthquake. *Ann. Geofis.*, 38, 867-877.
- Brown, R.J., Orsi, G., de Vita, S., 2008. New insights into Late Pleistocene explosive volcanic activity and caldera formation on Ischia (southern Italy). *Bull. Volc.*, 70(5): 583-603. doi: 10.1007/s00445-007-0155-0.
- Bruno, P.P.G., de Alteriis, G., Florio, G., 2002. The western undersea section of the Ischia volcanic complex (Italy, Tyrrhenian Sea) inferred by marine geophysical data. *Geophysical Research Letters*, 29 (9), doi:10.1029/2001GL019304.
- Buchner, G., A. Italiano and C. Vita-Finzi, 1996. Recent uplift of Ischia, Southern Italy. In: *Volcano instability on the Earth and other Planets*, Mc Guire, W. J. Jones, A. P. Neuberg, *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 110, 249-252.
- Caratori Tontini, F., Stefanelli, P., Giori, I., Faggioni, O., and Carmisciano, C., 2004. The revised aeromagnetic anomaly map of Italy. *Ann Geophys* 47: 1547–1555.

- Carlino, S. 2012. The process of resurgence for Ischia Island (southern Italy) since 55 ka: the laccolith model and implications for eruption forecasting. *Bulletin of volcanology*, 74(5), 947-961.
- Carlino, S., E. Cubellis, A. Marturano, 2011. The catastrophic 1883 earthquake at the island of Ischia (southern Italy): macroseismic data and the role of geological conditions. *Nat. Hazards*, 52, 1, 231-247, 10.1007/s11069-009-9367-2.
- Carlino, S., E. Cubellis, G. Luongo, F. Obrizzo, 2006. On the mechanics of caldera resurgence of Ischia Island (southern Italy). In: C. Troise, G. De Natale, C. R. J. Kilburn (eds.), *Mechanism of activity and unrest of large calderas*. Geological Society Special Publications, 269, London, 181-193.
- Carlino, S., Somma, R., Troiano, A., Di Giuseppe, M. G., Troise, C., De Natale, G. 2014. The geothermal system of Ischia Island (southern Italy): Critical review and sustainability analysis of geothermal resource for electricity generation. *Renewable Energy*, 62, 177-196.
- Carlino, S., Somma, R., Troiano, A., Di Giuseppe, M.G., Troise, C., De Natale, G., 2015. Assessment of geothermal potential of Campanian volcanoes (Southern Italy): from drilling exploration to numerical simulation. *Advances in Environmental and Agricultural Science, Conference paper*, ISBN: 978-1-61804-270-5 Available from: https://www.researchgate.net/publication/272794456_Assessment_of_geothermal_potential_of_Campanian_volcanoes_Southern_Italy_from_drilling_exploration_to_numerical_simulation.
- Carrara, E., Iacobucci, F., Pinna, E., Rapolla, A., 1973. Gravity and magnetic survey of the Campanian volcanic area, S. Italy. *Boll. Geof. Teor. Appl.* 15 (57), 39-51.
- Carrara, E., Iacobucci, F., Pinna, E., Rampolla, A., 1974. Interpretation of gravity and magnetic anomalies near Naples, Italy, using computer techniques *Bull. Volcanol.* 38 (2), 458-467.
- Castellano, C., Arcoraci, L., Battelli, P., Berardi, M., Marchetti, A., Margheriti L., Mele, F., Nardi, A., e A. Rossi, (2013). *Bollettino Sismico Italiano 2012*. Quaderni di Geofisica, 139, INGV, Roma.
- Castello, B., Olivieri, M., and Selvaggi, G., 2007. Local and duration magnitude determination for the Italian Earthquake Catalog, 1981-2002. *B. Seismol. Soc. Am.*, 97, 128-139.
- Chiesa, S., Civetta, L., De Lucia, M., Orsi, G., Poli, S., 1987. Volcanological evolution of the island of Ischia. In: Di Girolamo, P. (Ed.), *The volcanoclastic rocks of Campania (Southern Italy): Geochemical, Geophysical, Geological, Mineralogical, Paleomagnetic, Petrographical and Volcanological aspects*. *Rend. Acc. Sci. Fis. Mat. Napoli (Special Paper)*, 69-83.
- Chiocci, F.L., & De Alteriis, G. 2006. The Ischia debris avalanche: first clear submarine evidence in the Mediterranean of a volcanic island prehistorical collapse. *Terra Nova*, 18(3), 202-209.
- Chiodini, G., Avino, R., Brombach, T., Caliro, S., Cardellini, C., de Vita, S., Frondini, F., Marotta, E., Ventura, G., 2004. Fumarolic and diffuse soil degassing west of Mount Epomeo, Ischia (Italy). *J. Volcanol. Geoth Res.* 133:291-309.
- Civetta, L., S. De Vita, M. A. Di Vito and G. Orsi, 1998. Ischia. *Acta Vulcanologica*, 10, 85-196.
- Civetta, L., Gallo, G., Orsi, G., 1991. Sr- and Nd- isotope and trace-element constraints on the chemical evolution of the magmatic system of Ischia (Italy) in the last 55 ka. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 46, 213-230.
- Conti, A., Bigi, S., Cuffaro, M., Doglioni, C., Scrocca, D., Muccini, F., Cocchi, L., Ligi, M., and Bortoluzzi, G. 2017. Transfer zones in an oblique back-arc basin setting: Insights from the Latium-Campania segmented margin (Tyrrhenian Sea). 36, 1, 78-107.
- Corrado, G., De Lorenzo, S., Mongelli, F., Tramacere, A., and Zito, G. 1998. Surface heat flow density at the Phlegrean Fields caldera "Southern Italy". *Geothermics*, 27, 4, 469-484.
- CPV - TdL Ischia, 2016. "Definizione dello scenario di riferimento e dei livelli di allerta (intesi come l'individuazione degli elementi utili al DPC per la definizione dei livelli di allerta) per il piano d'emergenza per l'isola di Ischia", (TdL: Acocella V., Bisson M., Costa A., De Martino P., Della Seta M., de Vita S., Federico C., Giordano G., Caliro S., Martino S., Cardaci C., Selva J.), in fase di ultimazione.
- Cubellis, E., 1985. Il terremoto di Casamicciola del 28 luglio 1883: analisi degli effetti, modellizzazione della sorgente ed implicazioni sulla dinamica in atto. *Boll. Soc. Nat. Napoli*, 94, 157-186.

- Cubellis, E., and G. Luongo, 1998. Analisi sismotettonica. In: "Il terremoto del 28 luglio 1883 a Casamicciola nell'isola d'Ischia". Servizio Sismico Nazionale, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, 111-123.
- Cubellis, E., and G. Luongo, 1998. Il terremoto del 28 luglio 1883. Campo macrosismico e studio della sorgente. In: "Il terremoto del 28 luglio 1883 a Casamicciola nell'isola d'Ischia". Servizio Sismico Nazionale, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, 101-110.
- Cubellis, E., and G. Luongo, 1998. Sismicità storica dell'isola d'Ischia. In: "Il terremoto del 28 luglio 1883 a Casamicciola nell'isola d'Ischia". Servizio Sismico Nazionale, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, 49-57.
- Cubellis, E., S. Carlino, R. Iannuzzi, G. Luongo and F. Obrizzo, 2004. Management of Historical Seismic Data Using GIS: The Island of Ischia (Southern Italy). *Nat. Hazards*, 33, 379-393.
- Cuffaro, M., Martorelli, E., Bosman, A., Conti, A., Bigi, S., Muccini, F., Cocchi, L., Ligi, M., Bortoluzzi, G., Scrocca, D., Canese, S.P., Chiocci, F.L., Conte, A.M., Doglioni, C., and Perinelli, C., 2016. The Ventotene Volcanic Ridge: a newly explored complex in the central Tyrrhenian Sea (Italy). *Bulletin of Volcanology*, 78, 86, 10.1007/s00445-016-1081-9
- D'Argenio, B., Pescatore, T., Scandone, P., 1973. Schema geologico dell'Appennino meridionale (Campania e Lucania). *Atti Conv. Moderne vedute sulla geologia dell'Appennino*. Roma. Acc. Naz. Lincei, q. 183.
- D'Auria, L., Martini, M., Esposito, A., Ricciolino, P. and Giudicepietro, F., 2008. A unified 3D velocity model for the Neapolitan volcanic areas. In: Warner Marzocchi and Aldo Zollo (Editors), *Conception, verification and application of innovative techniques to study active volcanoes*, INGV e Dipartimento Protezione Civile, ISBN 978-88-89972-09-0, 375-390.
- De Alteriis, G., Insinga, D.D., Morabito, S., Morra, V., Chiocci, F. L., Terrasi, F., ... & Pazzanese, M., 2010. Age of submarine debris avalanches and tephrostratigraphy offshore Ischia Island, Tyrrhenian Sea, Italy. *Marine Geology*, 278(1), 1-18.
- Della Seta M., Esposito C., Marmoni G.M., Martino S., Paciello A., Perinelli C., Sottili G. (2015). Geological constraints for a conceptual evolutionary model of the slope deformations affecting Mt. Nuovo at Ischia (Italy). *Italian Journal of Engineering geology and Environment*, 2, 15-28. DOI:10.4408/IJEGE.2015-02.O-04.
- De Rossi, M.S., 1884. Catalogo ragionato e topografico delle notizie di fatto sul terremoto del 28 luglio 1883 ed illustrazione della annessa carta geognostico-sismica dell'isola d'Ischia. *Bull. Vulcanismo Italiano*, 11, 131-172.
- De Rossi, M.S., 1884. Raccolta di fatti, relazioni, bibliografie sul terremoto di Casamicciola del 28 luglio 1883 con brevi osservazioni. *Bull. Vulcanismo Italiano*, 11, 65-131.
- de Vita, S., Marotta, E., 2007. *Terra di vulcani*. Ed. L'Arca e l'Arco, Nola, 144 pp.
- de Vita, S., Sansivero, F., Orsi, G., Marotta, E., 2006. Cyclical slope instability and volcanism related to volcano-tectonism in resurgent calderas: the Ischia island (Italy) case study. *Eng. Geol.*, 86, 148-165.
- de Vita, S., Sansivero, F., Orsi, G., Marotta, E., Piochi, M., 2010. Volcanological and structural evolution of the Ischia resurgent caldera (Italy) over the past 10 ka. *Geological Society of America, Special Paper*, 464: 193-239.
- Di Bona, M., 2016. A Local Magnitude Scale for Crustal Earthquakes in Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, doi: 10.1785/0120150155
- Di Napoli, R., Aiuppa, A., Bellomo, S., Brusca, L., D'Alessandro, W., Candela, E.G., Longo, M., Pecoraino, G., Valenza, M., 2009. A model for Ischia hydrothermal system: Evidences from the chemistry of thermal groundwaters. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 186; p. 133-159, ISSN: 0377-0273, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2009.06.005
- Di Napoli, R., Martorana, R., Orsi, G., Aiuppa, A., Camarda, M., De Gregorio, S., Gagliano Candela, E., Luzio, D., Messina, N., Pecoraino, G. et al., 2011. The structure of a hydrothermal system from an integrated geochemical, geophysical, and geological approach: The Ischia Island case study. *Geochem. Geophys. Geosy.*, 12, 7, Q07017, 10.1029/2010GC003476.

- Dreger, D.S., and Helmberger, D.V., 1993. Determination of Source Parameters at Regional Distances With Three-Component Sparse Network Data, *J. Geophys. Res.*, 98, 8107-8125.
- Faccenna, C., Funicello, R., Bruni, A., Mattei, M., Sagnotti, L., 1994. Evolution of transfer-related basin: the Ardea basin (Latium, central Italy). *Basin Researches*, 6, 35-46.
- Finetti, I., Morelli, C., 1974. Esplorazione sismica a riflessione dei Golfi di Napoli e Pozzuoli. *Boll. Geof. Teor. Appl.* 16, 175-222.
- Funicello, R., Locardi, E., Parotto, M., 1976. Lineamenti geologici dell'area Sabatina orientale. *Boll. Soc. Geol. It.* 95, 831-849.
- Fusi, N., Tibaldi, A. and Vezzoli, L., 1990. Vulcanismo, risorgenza intracalderica e relazioni con la tettonica regionale nell'Isola d'Ischia. *Mem. Soc. Geol. It.*, 45, 971-980.
- Gasperini, P., 2002. Local magnitude revaluation for recent Italian earthquakes (1981–1996). *Journal of Seismology* 6: 503–524.
- Giggenbach, W.F., 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52, 2749-2765.
- Gillot, P.Y., Chiesa, S., Pasquare, G., Vezzoli, L., 1982. <33,000 yr K-Ar dating of the volcano-tectonic horst of the Isle of Ischia, Gulf of Naples. *Nature*. 229, 242-245.
- Guidoboni, E., G. Ferrari, D. Mariotti, A. Comastri, G. Tarabusi, G. Valensise, G., 2007. CFTI4Med, Catalogue of strong Earthquakes in Italy (461 B.C.-1997) and Mediterranean Area (760 B.C.-1500), INGV-SGA, <http://storing.ingv.it/cfti4med/>.
- Guidoboni, E., e Valensise, G., 2011. Il peso economico e sociale dei disastri sismici in Italia negli ultimi 150 anni. Bononia University Press, ISBN: 978-88-7395-683-9, 552 pagine.
- Guiscardi, G., 1888. Studi sul terremoto d'Ischia del 28 luglio 1883. *Atti Reale Acc. Scienze Fis. Mat. Napoli*, 2, 3, 1-8.
- Herrmann, R.B., 2013. Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research. *Seism. Res. Lettr.* 84, 1081-1088, doi:10.1785/0220110096.
- Iacono, A., 1996. La "Guerra d'Ischia" nel De Bello Neapolitano di G. Pontano. *Quaderni dell'Accademia Pontaniana*. 19, 1-90.
- Inguaggiato, S., Pecoraino, G., D'Amore, F., 2000. Chemical and isotopic characterisation of fluid manifestations of Ischia Island (Italy). *Journal of volcanology and geothermal research*, 99(1), 151-178.
- Ippolito, F., Ortolani, F., Russo, M., 1973. Struttura marginale tirrenica dell'Appennino Campano: reinterpretazione di dati di antiche ricerche di idrocarburi. *Mem. Soc. Geol. It.* 12, 227-250.
- Johnston-Lavis, H. J., 1885. Monograph of the earthquakes of Ischia. London-Naples, 122 pp.
- Judenherc, S., and A. Zollo, 2004. The Bay of Naples (southern Italy): Constraints on the volcanic structures inferred from a dense seismic survey. *J. Geophys. Res.*, 109, B10312, 10.1029/2003JB002876.
- Lenti L., Martino S., Paciello A., Prestininzi A., Rivellino S. (2015). Recorded displacements in a landslide slope due to regional and teleseismic earthquakes. *Geophysical Journal International*, vol. 201, p. 1335-1345, ISSN: 0956-540X, doi: 10.1093/gji/ggv063
- Locati, M., Camassi, R., Rovida, A., Ercolani, E., Bernardini, F., Castelli, V., Caracciolo, C.H., Tertulliani, A., Rossi, A., Azzaro, R., D'Amico, S., Conte, S., Rocchetti, E., 2016. DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15>
- Lomax, A., Virieux, J., Volant, P. and Berge, C., 2000. Probabilistic earthquake location in 3D and layered models: Introduction of a Metropolis-Gibbs method and comparison with linear locations. In: *Advances in Seismic Event Location* Thurber, C.H., and N. Rabinowitz (eds.), Kluwer, Amsterdam, 101-134.
- Luongo, G., S. Carlino, E. Cubellis, I. Delizia, F. Obrizzo, 2011. Casamicciola milleottocentottantatre. Il sisma tra interpretazione scientifica e scelte politiche. Bibliopolis, Napoli, 282 pp.
- Luongo, G., S. Carlino, E. Cubellis, I. Delizia, R. Iannuzzi, F. Obrizzo, 2006. Il terremoto di Casamicciola del 1883: una ricostruzione mancata. Alfa Tipografia, Napoli, 64 pp.
- Malagnini, L., Herrmann, R.B., Di Bona, M., 2000. Ground motion scaling in the Apennines (Italy). *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, 1062-1081.

- Malagnini, L., Akinci, A., Herrmann, R.B., Pino, N.A., Scognamiglio, L., 2002. Characteristics of the ground motion in northeastern Italy. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, 6, 2186-2204.
- Manzo, M., Ricciardi, G. P., Casu, F., Ventura, G., Zeni, G., Borgström, S., Berardino, P., Del Gaudio, C., and Lanari, R. 2006. Surface deformation analysis in the Ischia Island (Italy) based on spaceborne radar interferometry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 151(4), 399-416.
- Mariani, M., Prato, R., 1988. I bacini neogenici costieri del margine tirrenico: approccio sismico-stratigrafico. *Mem. Soc. Geol. It.*, 41, 519-531.
- Mercalli, G., 1884. I terremoti e le eruzioni dell'Isola d'Ischia. *La Rassegna Nazionale*, 17, 40-52.
- Mercalli, G., 1884. L'isola d'Ischia ed il terremoto del 28 luglio 1883. *Mem. Reg. Ist. Lombardo Scienze e Lettere*, 3, 6, 99-154.
- Michellini, A., Faenza, L., Lauciani, V., Malagnini, L., 2008. ShakeMap implementation in Italy. *Seismological Research Letters*, 79(5), 689–698, doi:10.1785/gssrl.79.5.689.
- Milia, A., and M. M. Torrente, 2015. Tectono-stratigraphic signature of a rapid multistage subsiding rift basin in the Tyrrhenian-Adriatic hinge zone (Italy): A possible interaction of upper plate with subducting slab. *J. Geodyn.*, 86, 0, 42-60, 10.1016/j.jog.2015.02.005.
- Milia, A., M. Torrente, 2000. Fold uplift and synkinematic stratal architectures in a region of active transtensional tectonics and volcanism, eastern Tyrrhenian Sea. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 112, 1531-1542.
- Molin, P., Acocella, V., Funiciello, R., 2003. Structural, seismic and hydrothermal features at the border of an active intermittent resurgent block: Ischia Island (Italy). *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 121, 195-217.
- Molin, P., Acocella, V., Funiciello, R., 2003. Structural, seismic and hydrothermal features at the border of an active intermittent resurgent block: Ischia Island (Italy). *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 121, 65-81.
- Morasca, P., Malagnini, L., Akinci, A., Spallarossa, D., Herrmann, R.B., 2006. Ground-Motion Scaling in the Western Alps. *Journal of Seismology*, Vol. 10, pp. 315-333.
- Nunziata, C., and Rapolla, A. 1987. A gravity and magnetic study of the volcanic island of Ischia, Naples (Italy). *Journal of volcanology and geothermal research*, 31(3-4), 333-344.
- Okada, Y., 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 82(2), 1018–1040.
- Orsi, G., de Vita, S., Di Vito, M., 1996a. The restless, resurgent Campi Flegrei nested caldera (Italy): constraints on its evolution and configuration. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 74: 179-214.
- Orsi, G., de Vita, S., Di Vito, M., Isaia, R., Nave, R., Heiken, G., 2003. Facing volcanic and related hazards in the Neapolitan area. In: Heiken, G., Fakundiny, R., Sutter, J. (Eds) *Earth Sciences in Cities*, American Geophysical Union (Special Publication), Washington, 121-170.
- Orsi, G., Gallo, G., Zanchi, A., 1991. Simple-shearing block resurgence in caldera depression. A model from Pantelleria and Ischia. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 47, 1-11.
- Pacca, N.A., XVI sec. Discorso del terremoto, Società Napoletana di Storia Patria di Napoli, Fondo sismico, ms. 7/A3.
- Palmieri, L., Ogliaro, A. 1884. Sul terremoto dell'isola d'Ischia della sera del 28 luglio 1883. *Atti Reale Acc. Scienze Fis. Mat. Napoli*, 2, 1.
- Panichi C., Bolognesi L., Ghiara M. R., Noto P., & Stanzione D. (1992). Geothermal assessment of the island of Ischia (southern Italy) from isotopic and chemical composition of the delivered fluids. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 49(3-4), 329-348.
- Paparo, M.A., Tinti, S. (2017). Analysis of Seismic-Driven Instability of Mt. Nuovo in the Ischia Island, Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, doi: 10.1785/0120160139.
- Paoletti, V., D'Antonio, M., Rapolla, A., 2013. The structural setting of the Ischia Island (Phlegrean Volcanic District, Southern Italy): inferences from geophysics and geochemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 249, 155-173.
- Pecoraino, G., Brusca, L., D'alessandro, W., Giammanco, S., Inguaggiato, S., Longo, M., 2005. Total CO₂ output from Ischia Island volcano (Italy). *Geochemical Journal*, 39(5), 451-458.

- Petrosino, S., De Siena, L., Del Pezzo, E., 2008. Recalibration of the Magnitude Scales at Campi Flegrei, Italy on the basis of measured path and site and transfer functions. *Bull. of Seism. Soc. of Am.*, 96, doi: 10.1785/0120070131
- Piochi, M., 1994. Il sistema magmatico dell'isola d'Ischia negli ultimi 10 ka: evidenze geochimiche e geofisiche. PhD Thesis, University of Naples, Italy, 230 pp.
- Piochi, M., Bruno, P.P., De Astis, G., 2005. Relative roles of rifting tectonics and magma ascent processes: inferences from geophysical, structural, volcanological and geochemical data for Neapolitan volcanic region (southern Italy). *Geochem. Geophys. Geosyst.* 6(7), <http://dx.doi.org/10.1029/2004GC000885>.
- Poli, S., Chiesa, S., Gillot, P.Y., Guichard, F., Vezzoli, L., 1989. Time dimension in the geochemical approach and hazard estimation of a volcanic area: the Isle of Ischia case (Italy). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 36, 327-335.
- Pondrelli, S., Salimbeni, S., Ekström, G., Morelli, A., Gasperini, P., Vannucci, G., 2006. The Italian CMT dataset from 1977 to the present. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 159(3-4), 286–303, doi:10.1016/j.pepi.2006.07.008.
- QUEST, 2017. Rilievo macrosismico per il terremoto isola di Ischia del 21 agosto 2017 - Aggiornamento al 25 agosto 2017 (ore 20), coordinamento del rilievo A. Tertulliani e R. Azzaro.
- Rapolla, A., M. Fedi, G. Fiume, 1989. Crustal structure of the Ischia-Phlegraean geothermal fields, near Naples, Italy, from gravity and aeromagnetic data. *Geophysical Journal International*, 97, 409-419.
- Rapolla, A., Paoletti, V., Secomandi, M., 2010. Seismically-induced landslide susceptibility evaluation: Application of a new procedure to the island of Ischia, Campania Region, Southern Italy. *Engineering Geology*, Volume 114, Issue 1, Pages 10-25, ISSN 0013-7952, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.03.006>.
- Rittmann, A., 1930. *Geologie der Insel Ischia*. *Zeitr Fur Vulkanol*, 6:1–265.
- Rittmann, A., V. Gottini, 1980. L'isola d'Ischia. *Geologia. Boll. Serv. Geol. It.*, 101, 131-274.
- Rovida, A., Locati, M., Camassi, R., Lolli, B., Gasperini, P., 2016. CPTI15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes. doi:10.6092/INGV.IT-CPTI15.
- Sansivero, F., 1999. Assetto stratigrafico ed evoluzione vulcanologica del settore orientale dell'isola d'Ischia negli ultimi 10 Ka. PhD Thesis, University of Naples, Italy, 203 pp.
- Sepe, V., Atzori, S., & Ventura, G., 2007. Subsidence due to crack closure and depressurization of hydrothermal systems: a case study from Mt Epomeo (Ischia Island, Italy). *Terra Nova*, 19(2), 127-132.
- Scognamiglio, L., Tinti, E., and Michelini, A., 2009. Real-Time Determination of Seismic Moment Tensor for the Italian Region. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99(4), 2223–2242.
- Sepe, E., Atzori, S., Ventura, G., 2007. Subsidence due to crack closure and depressurization of hydrothermal systems: a case study from Mt. Epomeo (Ischia Island, Italy), *Terra Nova*, 19(2), 127-132, doi: 10.1111/j.1365-3121.2006.00727.x.
- Serpieri, A., 1883. Sul terremoto dell'Isola d'Ischia il 28 luglio 1883. *Rend. Regio Ist. Lombardo*, 2, 16, 969-981.
- Tibaldi, A., and L. Vezzoli, 1998. The space problem of a caldera resurgence: An example from Ischia Island, Italy. *Geol. Rundsch.*, 87, 53-66.
- Tibaldi, A., and Vezzoli, L., 2004. A new type of volcano flank failure: the resurgent caldera sector collapse, Ischia, Italy. *Geophysical Research Letters*, 31(14).
- Tinti, S., Chiocci, F. L., Zaniboni, F., Pagnoni, G., De Alteriis, G., 2011. Numerical simulation of the tsunami generated by a past catastrophic landslide on the volcanic island of Ischia, Italy. *Marine Geophysical Research*, 32(1-2), 287-297.
- Tusa, G., Langer, H., 2016. Prediction of ground motion parameters for the volcanic area of Mount Etna. *Journal of Seismology*, <http://doi.org/10.1007/s10950-015-9508-x>.
- Vezzoli, L., 1988. Island of Ischia. *CNR Quaderni de "La ricerca scientifica"* 114 (10), 122 pp.
- Wells, D.L., K.J. Coppersmith, 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 84, 974-1002.

- Williams, C.A., and Wadge, G., 1998. The effects of topography on magma chamber deformation models: Application to Mt. Etna and radar interferometry. *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1549–1552, doi:10.1029/98GL01136.
- Zaniboni, F., Pagnoni, G., Tinti, S., Della Seta, M., Fredi, P., Marotta, E., Orsi, G., 2013. The potential failure of Monte Nuovo at Ischia Island (Southern Italy): numerical assessment of a likely induced tsunamis and its effects on a densely inhabited area (2013). *Bulletin of Volcanology*, 75 (11), DOI: 10.1007/s00445-013-0763-9.
- Zuppetta, A., A. Sava, C. Zuppetta, 1993. Evoluzione vulcano-tettonica dell'isola d'Ischia: Un modello per gli ultimi 35 ka di attività. *Boll. Serv. Geol. It.*, 112, 353-369.

Esclusione di responsabilità e limiti di uso delle informazioni

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 all'organizzazione della rete sismica nazionale integrata e al coordinamento delle reti sismiche regionali e locali in regime di convenzione con il Dipartimento della Protezione Civile.

L'INGV concorre, nei limiti delle proprie competenze inerenti la valutazione della Pericolosità sismica e vulcanica nel territorio nazionale e secondo le modalità concordate dall'Accordo di programma decennale stipulato tra lo stesso INGV e il DPC in data 2 febbraio 2012 (Prot. INGV 2052 del 27/2/2012), alle attività previste nell'ambito del Sistema Nazionale di Protezione Civile.

In particolare, questo documento¹ ha finalità informative circa le osservazioni e i dati acquisiti dalle Reti di monitoraggio e osservative gestite dall'INGV.

L'INGV fornisce informazioni scientifiche utilizzando le migliori conoscenze scientifiche disponibili al momento della stesura dei documenti prodotti; 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.

L'INGV non è responsabile dell'utilizzo, anche parziale, dei contenuti di questo documento da parte di terzi e di eventuali danni arrecati a terzi derivanti dal suo utilizzo.

La proprietà dei dati contenuti in questo documento è dell'INGV.



*Quest'opera è distribuita con Licenza
Creative Commons Attribuzione - Non opere derivate 4.0 Internazionale.*

¹ 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)".