

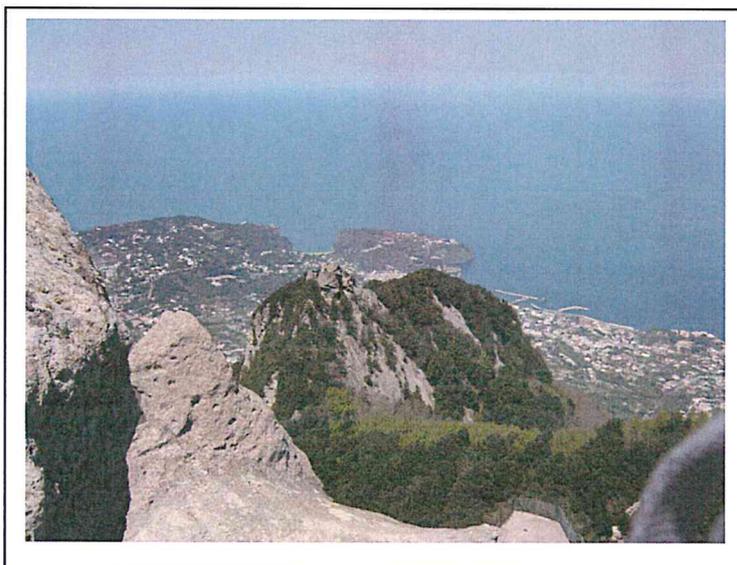


**ISTITUTO NAZIONALE di GEOFISICA e VULCANOLOGIA**  
**Sezione di Napoli "OSSERVATORIO VESUVIANO"**  
**Via Diocleziano 328, 80124 Napoli**

## **ALLEGATO 4**

**Permesso di Ricerca per Risorse Geotermiche Finalizzato alla  
Sperimentazione di Impianti Pilota Denominato "FORIO"**

# **Analisi sismica e Monitoraggio Microsismico**



Il Relatore

## 1. Sismicità storica

L'attività sismica storica di Ischia, di cui si hanno notizie attendibili a partire dal 1228 (Tab 1.1, Fig. 1.1), mostra la persistenza dell'area epicentrale nel territorio di Casamicciola. Tale sismicità, per la bassa energia dei terremoti, l'elevata intensità ed il rapido decadimento degli effetti con la distanza dall'area epicentrale è peculiare delle aree vulcaniche.

ANNO	LOCALITÀ	IMAX (MCS)
1228	Casamicciola	IX-X
1302	Settore orientale dell'isola	VIII
1557	Campagnano	VII-VIII
1762	Casamicciola	VII
1767	Settore orientale dell'isola	VII-VIII
1796	Casamicciola	VIII
1828	Casamicciola	VIII-IX
1841	Casamicciola	VII
1863	Casamicciola	VII
1867	Casamicciola	VI-VII
1881	Casamicciola	IX
1883	Casamicciola	XI

Tab. 1.1 Principali terremoti storici dell'isola d'Ischia, a partire dal 1228 (da Luongo et al., 2006; Carlino et al., 2009)

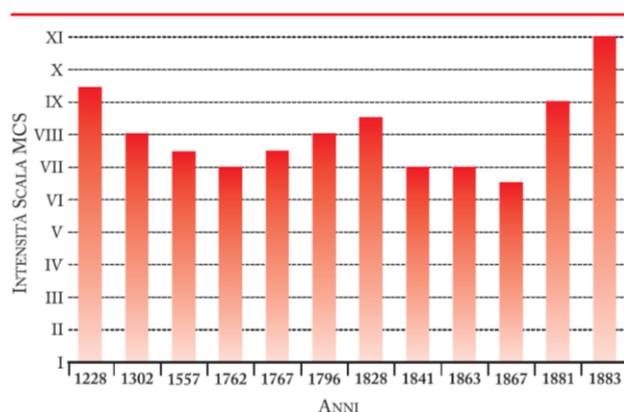


Fig. 1.1. Valori di intensità (MCS) dei terremoti storici ad Ischia (da Luongo et al., 2006)

Le informazioni più complete sulla sismicità si hanno a partire dal 1700; dalla fine di questo secolo e per tutto il secolo successivo, l'attività sismica produce gravi danni e numerose vittime. Particolarmente rilevanti sono il terremoto del 1796 e del 1828, mentre gli eventi sismici di maggiore gravità sono quelli del 1881 (Imax = IX grado MCS) e del 1883 (Imax = XI grado MCS).

Quest'ultimo rappresenta l'apice dell'energia sismica liberata ad Ischia in tempi storici, e dopo di esso inizia nell'isola un periodo di silenzio sismico che dura tutt'oggi se si escludono alcuni eventi isolati avvertiti all'inizio del 1900 ed i pochissimi micro-terremoti registrati negli ultimi 30 anni, localizzati nel settore settentrionale. Gli effetti del terremoto

del 28 luglio 1883 furono particolarmente intensi a Casamicciola ed in parte a Lacco Ameno, danni gravi, se pur in aree limitate, si registrarono a Forio, molto più lievi a Serrara Fontana e Barano, mentre ad Ischia gli effetti furono poco significativi.

Le fonti bibliografiche e la documentazione storica su questo terremoto sono particolarmente ricche ed hanno consentito di ricostruire fedelmente il danneggiamento a Casamicciola ed in tutta l'isola. In particolare per il comune di Casamicciola è stata effettuata un'analisi molto dettagliata dei danni, individuando le diverse località colpite attraverso l'analisi della cartografia storica. L'elaborazione puntuale del danneggiamento, integrata con i dati geologici e della tettonica dell'isola, hanno reso possibile da un lato la stima dei parametri della sorgente sismica, della propagazione dell'energia e degli effetti di sito e, dall'altro, la valutazione degli effetti di possibili futuri terremoti locali.

Tali studi sono strumenti indispensabili per la programmazione della prevenzione finalizzata alla riduzione del rischio sismico. Ad Ischia, nonostante il lungo silenzio sismico, non si può escludere una possibile riattivazione delle strutture sismogenetiche, anche se è molto difficile poter valutare il periodo di ritorno dei terremoti senza una conoscenza profonda delle caratteristiche reologiche del basamento e dei campi di sforzo agenti nell'area. Infatti è molto arduo dedurre il campo di sforzi regionale nelle aree vulcaniche attive a causa dei complessi fenomeni di deformazione che accompagnano le grandi eruzioni esplosive. Tuttavia il ridotto spessore dello strato fragile, dovuto alle elevate temperature degli strati più profondi, impedisce l'accumulo di energia elastica e, conseguentemente, l'occorrenza di terremoti di elevata energia. L'isola d'Ischia è localizzata nel campo di sforzi regionale generato dall'apertura del Tirreno.

Questo campo produce faglie normali ad alto angolo che potrebbero generare terremoti prevalentemente nella parte settentrionale dell'isola dove lo strato fragile è più spesso che nella parte sud-occidentale e meridionale (Fig. 1.2)

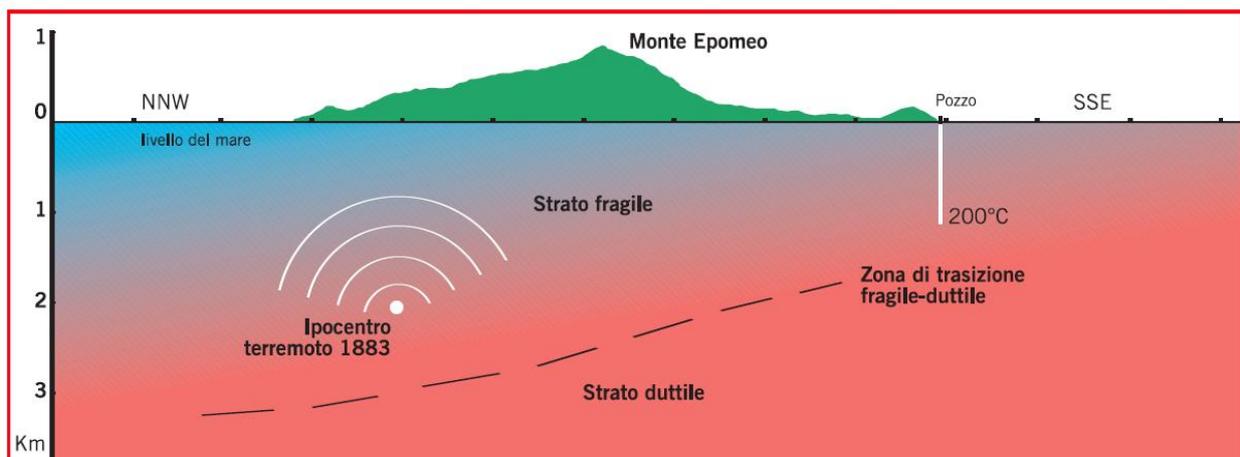


Fig. 1.2. Schema della struttura reologica sub-superficiale dell'isola (sezione NNW-SSE), ricavata dai dati geofisici e di pozzo. Viene indicata la zona di transizione fragile-duttile, da cui si evince che gli spessori potenzialmente sismogenetici sono più elevati nel settore meridionale. (da Luongo et al., 2006)

Infine dalla storia sismica plurisecolare dell'isola si rileva che la zona sismicamente attiva interessa solo un volume ridotto, senza svilupparsi lungo una struttura regionale. Così, per una corretta interpretazione della sorgente degli sforzi capace di generare terremoti, è necessario ipotizzare altri processi come il carico del vulcano e la spinta del magma che contribuiscono al campo di sforzo locale. La complessità della struttura sismogenetica e una sequenza degli eventi sismici non ben definita nella sua evoluzione temporale, non consente una valutazione attendibile del periodo di ritorno dei terremoti locali (Luongo et al., 2006).

## 2. Sismicità recente

La rete sismica stabile dell'isola d'Ischia, gestita dell'Osservatorio Vesuviano, è in funzione dal 1999. Per la caratterizzazione della rete sismica attuale vedi il paragrafo "*Analisi della sensibilità della rete sismica di Ischia*". Come si evince dal catalogo dei terremoti registrati sull'isola a partire dal 1999 (Tab. 1.2), la sismicità locale è molto bassa, e localizzata entro i primi 2km di crosta. L'energia estremamente contenuta dei terremoti e la bassissima frequenza di accadimento non consente sempre di ottenere valutazioni statistiche per una migliore localizzazione degli eventi, che tuttavia si distribuiscono sempre in una area compresa alla base nord dell'Epomeo, tra Casamicciola e Lacco Ameno.

Tale dato conferma che la crosta fragile in grado di generare terremoti è localizzata a nord dell'isola, mentre il settore meridionale è sostanzialmente asismico. In diverse occasioni nell'isola d'Ischia sono stati registrati boati associati ai terremoti o semplicemente fenomeni acustici non associati ad eventi sismici. Un'esplosione piuttosto energetica fu registrata nel 1995 all'interno di un pozzo localizzato nel settore meridionale dell'isola. Tali fenomenologie sono da associarsi alla dinamica più superficiale del sistema idrotermale, come ad esempio ad aumenti di pressione in fratture o nei pozzi, per fenomeni di separazione della frazione di vapore da quella liquida, durante la risalita dei fluidi.

Id.	Date	Time (UT)	Lat. (°N)	Lon. (°E)	Depth (km)	Mag.
1	1999-01-20	12:40:42	N.D.	N.D.	N.D.	0.9
2	1999-09-05	02:11:32	N.D.	N.D.	N.D.	0.4
3	1999-09-05	02:16:45	N.D.	N.D.	N.D.	0.4
4	1999-11-06	23:54:27	N.D.	N.D.	N.D.	1.5
5	2000-01-09	23:36:55	N.D.	N.D.	N.D.	0.9
6	2000-08-26	12:48:41	N.D.	N.D.	N.D.	0.4
7	2000-08-26	12:49:14	N.D.	N.D.	N.D.	-0.1
8	2000-08-26	21:47:26	N.D.	N.D.	N.D.	-0.1
9	2000-11-13	08:07:06	N.D.	N.D.	N.D.	0.9
10	2001-07-03	21:40:01	40.7669	13.8724	1.06	1.5
11	2001-07-04	07:24:36	N.D.	N.D.	N.D.	0.9
12	2001-07-27	20:11:41	40.7411	13.9158	0.55	2.3
13	2001-11-29	21:03:01	N.D.	N.D.	N.D.	0.8
14	2001-12-06	09:23:08	N.D.	N.D.	N.D.	0.4
15	2002-03-31	01:20:33	N.D.	N.D.	N.D.	1.1
16	2002-06-07	08:22:46	N.D.	N.D.	N.D.	0.6
17	2002-06-07	13:47:51	N.D.	N.D.	N.D.	0.4
18	2003-07-21	15:35:54	N.D.	N.D.	N.D.	0.6
19	2003-12-14	17:51:28	40.7589	13.8971	0.01	1.3
20	2004-09-03	01:49:44	40.7385	13.9001	0.74	1.5
21	2005-03-25	12:49:18	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
22	2005-05-04	15:27:27	40.7343	13.9034	1.13	0.5
23	2005-05-04	15:28:02	N.D.	N.D.	N.D.	0.5
24	2006-03-19	21:21:04	N.D.	N.D.	N.D.	0.9

25	2006-11-14	04:41:03	N.D.	N.D.	N.D.	-0.8
26	2007-06-06	07:25:55	40.7410	13.9138	0.55	1.3
27	2008-04-05	11:16:01	40.7390	13.9203	0.52	2.3
28	2009-07-17	03:26:29	N.D.	N.D.	N.D.	0.9
29	2011-06-04	23:13:40	40.7470	13.8728	1.45	1.4
30	2011-06-05	12:37:56	40.7410	13.9156	0.51	1.9
31	2011-06-05	14:10:03	40.7527	13.9154	1.88	2.2
32	2011-06-05	15:55:07	40.7390	13.9195	0.54	1.2
33	2011-06-05	16:20:26	N.D.	N.D.	N.D.	0.7
34	2011-06-05	20:26:47	N.D.	N.D.	N.D.	0.7
35	2011-06-22	00:55:05	N.D.	N.D.	N.D.	-0.8
36	2011-06-22	01:51:36	N.D.	N.D.	N.D.	-0.8
37	2011-06-22	02:31:08	N.D.	N.D.	N.D.	-0.5
38	2011-06-22	02:33:45	N.D.	N.D.	N.D.	-0.5
39	2013-12-10	13:07:05	N.D.	N.D.	N.D.	1.5

*Tab. 1.2. Terremoti ad Ischia registrati dalla rete sismica locale dell'Osservatorio Vesuviano in funzione dal 1999 (database INGV-OV)*

### 3. Valutazione del massimo terremoto atteso (da Luongo et al., 2006)

Il volume sismogenetico responsabile della sismicità dell'isola d'Ischia, può essere ottenuto sulla base dello spessore dello strato fragile e dell'estensione complessiva delle aree epicentrali relativa ai terremoti storici. Per procedere a questa valutazione bisogna considerare che i valori di "ultimate strain" (deformazione limite per la rottura) per la crosta terrestre sono dell'ordine di  $10^{-4}$  o inferiori, mentre il valore di strain associato agli eventi sismici è dell'ordine di  $1-2 \cdot 10^{-4}$ ; la crosta può essere deformata fino a questo livello con un processo elastico, per valori superiori si frattura. In laboratorio il valore di strain alla rottura è dell'ordine di  $10^{-3}$ ; la differenza con il valore di campo viene interpretata con la presenza nella crosta di numerose faglie e fratture che ne riducono la resistenza. Sulla base di questi dati, sulla conoscenza della struttura dell'isola, sulle condizioni dei campi di sforzo e sulla sismicità storica si può procedere alla stima dell'energia accumulata nella crosta in seguito a deformazione in condizioni critiche e quindi alla valutazione del massimo terremoto possibile. Nel caso più semplice, nel quale il campo di deformazione è rappresentato da una singola componente di taglio,  $\varepsilon$ , l'energia del mezzo per unità di volume ( $e = \mu\varepsilon^2$ ) è compresa tra  $2.5 \cdot 10^3$  e  $10^4$  erg  $\text{cm}^{-3}$  per  $\mu$  (rigidità) =  $5 \cdot 10^{11}$  dine- $\text{cm}^{-2}$  e  $\varepsilon = 1-2 \cdot 10^{-4}$ . In sismologia sono state introdotte numerose formule empiriche che correlano le dimensioni della sorgente sismica agli effetti in superficie, alla magnitudo e quest'ultima all'energia liberata dal terremoto. È possibile dunque correlare il volume della sorgente all'energia del terremoto, ovvero:

$$\log E = \log V + 3.0 \quad (1)$$

dove  $V$  è il volume in  $\text{cm}^3$ . Il rapporto  $E/V = 10^3$  erg  $\text{cm}^{-3}$  rappresenta la densità di energia ed è prossima al valore dell'estremo inferiore dell'intervallo ottenuto per l'energia associata allo strain delle rocce nella crosta. Utilizzando il dato della densità di energia possiamo calcolare la magnitudo massima possibile (MMP) introducendo il volume sismogenetico, nell'ipotesi che questo liberi energia in un unico evento. La dimensione del volume sismogenetico totale è ottenuta dal volume descritto dai fuochi dei terremoti. Nel caso di Ischia, tale volume corrisponde a quello di un cilindro con raggio di 3 km ed altezza di 2 km. Questa sorgente copre una superficie pari al 70% dell'isola. Applicando la formula empirica (1) si ottiene  $E = 10^{19.8}$  erg. Utilizzando la relazione empirica magnitudo-energia  $\log E = 11.8 + 1.5M$  (2) dove  $M$  è la magnitudo, otteniamo  $M=5.3$ , che rappresenta il valore della MMP. Il valore del massimo terremoto possibile, secondo le ipotesi sopra avanzate, è molto prossimo al valore massimo ottenuto dall'analisi del campo macrosismico del terremoto del 1883, che varia tra magnitudo 4.3 e 5.2. In tal caso si può concludere che le analisi condotte per il terremoto del 1883 sono di estrema utilità per la costruzione dello scenario del massimo terremoto atteso nell'isola. L'analisi dei processi che governano i terremoti nelle aree vulcaniche si mostra più complessa di quella relativa alla sismicità in aree di catene montuose di recente formazione ed ancora in evoluzione. Nel nostro caso una modellazione del campo di sforzi della struttura dell'isola d'Ischia si presenta più complessa di quella della vicina catena appenninica. In aggiunta i dati relativi alla storia sismica per le aree vulcaniche sono generalmente più poveri e tale condizione

non consente di ottenere previsioni statistiche attendibili, come si verifica ad Ischia. Infatti per l'isola, nonostante un periodo di circa 800 anni di dati, non è possibile ottenere un valore attendibile sul periodo di ritorno dei terremoti. Questo risultato discende da due ordini di motivi, la mancanza di una sequenza di eventi di grande energia e la complessità del campo di sforzi agente. Quindi la "previsione" di un evento sismico è da perseguire attraverso un'analisi della struttura e dei processi tettonici che hanno interessato ed interessano l'isola. In particolare la conoscenza dei processi deformativi delle rocce del basamento è fondamentale per poter valutare il campo di sforzi agente ed il periodo di ritorno degli eventi. Tuttavia nelle aree vulcaniche attive il campo di sforzi si presenta complesso, in quanto a questo concorrono sia il campo di sforzi regionale che campi locali. Se gli eventi sismici nell'isola fossero localizzati su una struttura tettonica regionale, a questi dovrebbero accompagnarsi eventi localizzati in aree prossime ma al di fuori dell'area vulcanica, secondo lineazioni di carattere regionale. In tal caso un modello geodinamico regionale fornirebbe elementi utili alla conoscenza del campo di sforzi agente e conseguentemente alla genesi dei terremoti. Se questa condizione non si verifica e al contrario si osservano solo eventi nell'area vulcanica, la sorgente potrebbe essere ancora associata ad una struttura regionale, ma bisognerebbe ipotizzare che il tratto di struttura che attraversa l'area vulcanica costituisca una zona di forte debolezza. In queste condizioni nell'area vulcanica la rottura si genererebbe per livelli più bassi di energia elastica accumulata rispetto alle aree circostanti e di conseguenza nelle prime l'energia accumulata si libererebbe con maggiore frequenza con eventi di bassa e moderata energia, mentre nelle seconde i tempi di ritorno sarebbero più lunghi con eventi di maggiore energia. Nel caso dell'isola d'Ischia la storia sismica regionale farebbe escludere entrambe le ipotesi in quanto l'isola non si svilupperebbe su una o più faglie sismogenetiche a dimensioni regionali. Per quanto osservato, bisogna ritenere che il campo degli sforzi responsabile della sismicità sia di origine locale, mentre processi asismici sarebbero responsabili delle deformazioni regionali. Questo risultato conduce a due possibili soluzioni, l'una prevede l'azione di masse magmatiche in pressione che produrrebbero sollevamento e fratturazione dello strato fragile sovrastante, l'altra prevede l'azione di un campo di sforzi associato al carico della struttura del Monte Epomeo. La bassa energia degli eventi osservati nell'isola indica la presenza di un piccolo volume sismogenetico dovuto ad un limitato sviluppo dello strato fragile superficiale, all'intensa fratturazione del basamento dell'isola per l'attività eruttiva e più in generale alla bassa rigidità del mezzo. I gradienti termici elevati in tutta l'isola, superiori a  $150^{\circ}$  C/km, indicano la presenza di rocce ad alta temperatura a piccola profondità che, in analogia con quanto osservato ai Campi Flegrei, fanno ritenere ragionevole l'ipotesi che lo strato fragile abbia uno spessore non superiore a 2 km, sovrastante uno strato duttile incapace di accumulare energia elastica. La sismicità nell'isola conferma una tale ipotesi in quanto i dati macrosismici sono associati a sorgenti poco profonde. In particolare per il terremoto del 1883 è stata ottenuta una profondità compresa tra 1 e 2 km.

#### 4. Analisi della sensibilità della rete sismica di Ischia

La sensibilità della rete sismica indica la capacità della rete di registrare eventi sismici di una determinata soglia di magnitudo e di permetterne la localizzazione. La conoscenza della sensibilità è di fondamentale importanza per implementare la qualità del dato sismico registrato. Tale considerazione è fondamentale quando si vogliono registrare terremoti in aree vulcaniche, come l'Isola d'Ischia, che è caratterizzata dalla sporadicità degli eventi, dalla bassa magnitudo e dalla notevole attenuazione del mezzo in cui le onde sismiche si propagano (Carlino et al., 2009).

Attualmente la rete sismica dell'Isola consiste di tre stazioni sismiche poste lungo la costa che non sempre sono sufficienti per localizzare un terremoto di bassa magnitudo.

La prima stazione sismica installata sull'isola di Ischia risale al 1885, quando, dopo il catastrofico terremoto che nel 1883 colpì Casamicciola Terme, lo scienziato Giulio Grablovitz (1846-1928) fondò un Osservatorio Geodinamico sull'isola. In questo osservatorio Grablovitz installò una Vasca Sismica (uno strumento in grado di misurare e registrare su carta le oscillazioni del acqua contenuta in un serbatoio rispetto al suolo). Le attività dell'Osservatorio terminarono nel 1923. Nello stesso Osservatorio nel 1993 è stato installato un sensore sismico monocomponente che, recentemente, è stato sostituito da una stazione sismica multi-parametrica composta di un velocimetro ed un accelerometro. Attualmente la rete sismica gestita dall'Osservatorio Vesuviano è composta da 3 siti: stazione OC9 presso l'Osservatorio di Casamicciola, FO9 presso Forio d'Ischia e CAI presso il Castello Aragonese (Fig.1.4).



Figure 1.4. Mappa dell'isola di Ischia con indicati i siti delle stazioni sismiche (triangolini rossi)

Fino al 2009 la rete sismica era composta esclusivamente da stazioni analogiche a corto periodo. Nel 2009 la stazione analogica FO9 è stata integrata da un sensore digitale a larga banda e nel 2011 si è provveduto ad incrementare la stazione OC9 con un sismometro a larga banda ed un accelerometro. Al momento, tutti i dati registrati dalle

stazioni, vengono trasmessi in tempo reale al centro di monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano utilizzando sia sistemi digitali che analogici.

Al fine di quantificare le prestazioni della rete sismica abbiamo stimato la sua sensibilità nella detezione e/o localizzazione di terremoti di magnitudo diversa utilizzando il metodo descritto da Tramelli et al., 2013. Con soglia di detezione si intende la magnitudo minima affinché un terremoto venga registrato da almeno uno strumento della rete sismica. Con soglia di localizzazione s'intende, invece, la magnitudo minima di un terremoto localizzabile, quindi un terremoto registrabile da almeno 4 stazioni o, in alcuni casi, anche da meno stazioni, purché siano identificabili più fasi del terremoto sul sismogramma.

Di seguito è stata stimata la soglia di detezione della rete sismica attraverso la simulazione di terremoti sintetici. Si è ipotizzato l'accadimento di terremoti, di magnitudo diversa, attorno ad ognuna delle tre stazioni presenti sull'isola ed abbiamo calcolato la distanza massima per la quale il segnale sismico generato dal terremoto fosse identificabile sul sismogramma, ovvero quando il segnale generato dal terremoto è maggiore del rumore sismico generalmente registrato dalla stazione. In questo modo si valuta se un terremoto di una data magnitudo genera un segnale identificabile sui tracciati registrati dalla stazione sismica. Per la simulazione sono state calcolate le ampiezze teoriche delle onde P per un terremoto di una magnitudo nota e confrontate con il livello medio di rumore sismico in ogni stazione. L'ampiezza teorica è stata stimata utilizzando un modello a frequenza d'angolo singola per lo spettro del terremoto (Boatwright et al., 1991) e tenendo conto dell'attenuazione geometrica ed anelastica del mezzo. Per questi calcoli è stato considerato un modello di velocità uniforme per le onde P con un valore della velocità dell'onda pari a 3.5 km/s, stimato come media approssimativa del modello di velocità 3D di D'Auria et al. (2008). Come fattore di attenuazione è stato utilizzato un valore di  $Q_p$  pari a 100 estrapolato da Del Pezzo e Bianco (2013). Il rumore medio ad ogni stazione è stato estrapolato dai valori calcolati da Del Pezzo et al. (2013) per le stazioni dei Campi Flegrei, pari a  $2 \times 10^{-5}$  m/s.

In figura 2.4 si mostrano i risultati ottenuti. Nella colonna di sinistra sono mostrate le soglie di detezione della rete a diverse profondità. Dalla figura si evince che, per eventi superficiali (0.5 km) la rete è in grado di rilevare eventi di magnitudo superiore a 0.5. Solo la parte centro-meridionale dell'isola resta scoperta, nelle aree corrispondenti ai comuni di Serra Fontana e Barano la soglia detezione è sopra ad 1. Ovviamente vicino alle stazioni sismiche la soglia di detezione si abbassa fino a magnitudo 0. Per terremoti con ipocentri più profondi (5 km), che tuttavia sono assai improbabili ad Ischia, la soglia di detezione si alza fino a magnitudo 1.5. Questa soglia di detezione teorica ben si accorda con i dati ricavati dalla curva di Gutenberg-Richter stimata per l'area. Questa curva rappresenta la relazione fra magnitudo e numero del totale dei terremoti di quella magnitudo o di magnitudo minore in una data regione. La forma di questa curva per basse magnitudo permette di definire la completezza del catalogo, cioè la soglia di magnitudo sotto la quale non tutti gli eventi vengono rilevati. La soglia di detezione definita in questo modo, che è quindi ricavata dai dati reali, si accorda con quella ricavata dalla simulazione.

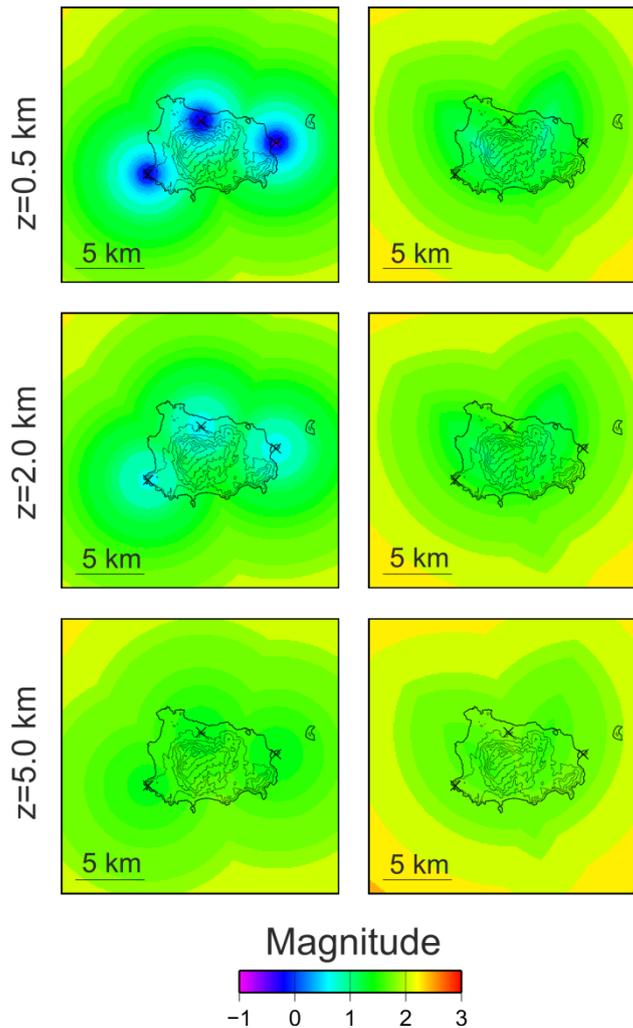


Figure 2.4. Pannelli di sinistra: soglia di detezione per la rete sismica rappresentata dalle crocette nere per eventi sismici con ipocentro a 0.5 km (alto), 2.0 km (centro) e 5.0 km (basso) sotto il livello del mare. Pannelli di destra: soglia di localizzazione calcolata utilizzando almeno 2 stazioni sismiche per la rete sismica rappresentata dalle crocette nere per eventi sismici con ipocentro a 0.5 km (alto), 2.0 km (centro) e 5.0 km (basso) sotto il livello del mare.

E' stata anche stimata la soglia di magnitudo per la localizzazione. In questo caso sono simulati terremoti di una data magnitudo distribuiti su di una griglia che copre l'intera isola fino ad una profondit  di 5 km, localizzati utilizzando le 3 stazioni presenti sull'isola. Essendo presenti solo 3 stazioni sull'isola abbiamo scelto di abbassare a 2 il numero minimo di stazioni necessarie per poter localizzare un evento, imponendo che fosse possibile l'identificazione sul sismogramma di due fasi dell'onda sismica (onda P e onda S) quando l'ampiezza dell'onda P era sufficiente a superare il rumore generalmente registrato dalla stazione. Nella colonna di destra di figura 2.4 si mostrano i risultati ottenuti. Dalle immagini si comprende che la rete sismica attuale presente sull'isola permette di localizzare terremoti superficiali di magnitudo maggiore o uguale a 1.5 sotto tutta l'area coperta dall'isola. Ovviamente il valore aumenta con la profondit  ipocentrale. L'errore sulla stima della localizzazione in questo caso sar  molto alto, poich  sull'isola non sono presenti 4 stazioni sismiche che permetterebbero di calcolare le coordinate ipocentrali.

L'esperienza di monitoraggio sull'isola ci insegna che generalmente terremoti di magnitudo maggiore di 1.9 vengono percepiti dalla popolazione ma, in alcuni casi, anche terremoti di magnitudo minore sono stati percepiti, come per il terremoto di magnitudo 1.3 del 6 Giugno 2007, a causa della loro estrema superficialità.

## 5. Monitoraggio sismico

Al fine di programmare il monitoraggio dell'impianto geotermico seguendo le Linee Guida proposte dal Ministero dello Sviluppo Economico (LG) è necessario definire il "dominio interno di rilevazione" (DI), cioè l'area nella quale è necessario identificare una eventuale sismicità associata all'attività di iniezione ed emungimento. Per le motivazioni già descritte è stato ipotizzato un serbatoio di  $4 \times 4 \text{ km}^2$  centrato sotto il campo pozzi, che si estende tra ~200 e ~700 m sotto il livello del mare. In figura 5.1 rappresentiamo la proiezione in superficie del serbatoio. Nel caso di emungimento con re-iniezione nello stesso serbatoio, le LG per il monitoraggio della sismicità indotta prevedono che il DI venga esteso di 5 km su ogni lato. Ovviamente nel caso dell'isola di Ischia questa richiesta non è attuabile in quanto gran parte del DI si estenderebbe a mare. Di conseguenza si è deciso di monitorare tutta l'area dell'isola in modo che su la zona on-shore vengano soddisfatti i requisiti sulla sensibilità dalla rete richiesti dalle LG. In questo modo verranno comunque soddisfatti gli scopi del monitoraggio, cioè la rilevazione e localizzazione della microsismicità nel DI a terra. In ogni caso la presenza di stazioni della rete sismica dell'Osservatorio Vesuviano permettono di monitorare l'area a Nord-Est del DI. E' stata quindi studiata una configurazione di rete tale da migliorare la soglia di detezione e localizzazione della rete attuale.



Fig. 5.1: Isola di Ischia. La linea bianca indica il dominio spaziale di interesse dello studio, essa non è rappresentativa della proiezione in superficie del serbatoio geotermico, i triangolini rossi le stazioni sismiche attualmente in funzione sull'isola.

Secondo le LG la rete sismica installata dovrà essere in grado di rilevare e localizzare terremoti di magnitudo compresa tra 0 e 1 nel DI e l'incertezza della localizzazione non dovrà essere superiore ad alcune centinaia di metri.

Abbiamo progettato una rete sismica che si integri a quella già esistente gestita dall'Osservatorio Vesuviano, come indicato dalle LG. La rete già esistente, infatti, soddisfa gran parte delle caratteristiche tecniche richieste. Delle tre stazioni gestite dall'Osservatorio Vesuviano quella localizzata presso l'Osservatorio di Casamicciola, OC9, risulta già composta da un sismometro broad band (Guralp CMG) e da un accelerometro (Episensor) entrambi tri-assiali che acquisiscono in continuo, come richiesto dalle LG. Una volta digitalizzati i segnali sono inviati via ADSL al centro di monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano in tempo reale. Nello stesso sito si trova anche un sismometro corto periodo (Mark L-4) i cui dati vengono trasmessi via radio all'Osservatorio Vesuviano. La stazione di Forio, FO9, è composta da un sismometro broad band (Guralp CMG) e da un corto periodo (Mark L-4) entrambi tri-assiali che acquisiscono in continuo. Anche in questo caso i dati raccolti dalla stazione broad band vengono inviati in tempo all'Osservatorio Vesuviano via ADSL, mentre quelli della stazione corto periodo vengono inviati via radio. Seguendo le indicazioni delle LG, in questo sito dovrà essere installato anche un accelerometro tri-assiale con acquisizione in continuo. Infine la stazione situata presso il Castello Aragonese, CAI, è composta unicamente da un sensore corto periodo tri-assiale del tipo Mark L-4 che trasmette in tempo reale i dati raccolti via radio all'Osservatorio Vesuviano. Il sensore Mark L-4 ha un periodo proprio di 1 s, quindi rispetta quanto richiesto dalle LG. In questo caso dovrà essere sfruttato lo stesso sito per l'installazione di un accelerometro tri-assiale con acquisizione in continuo i cui dati verranno trasmessi in tempo reale all'Osservatorio Vesuviano.

Nel sito OC9 è anche presente un sensore GPS i cui dati vengono costantemente inviati all'Osservatorio Vesuviano.

Dalle analisi condotte sulla sensibilità della rete sismica si evince che per eventi superficiali (0.5 km) la rete sismica attuale è in grado di rilevare eventi di magnitudo superiore a 0.5. Solo la parte centro-meridionale dell'isola resta più scoperta, nelle aree corrispondenti ai comuni di Serra Fontana e Barano la soglia di rilevazione è di circa 1. Per terremoti con ipocentri più profondi (5 km) la soglia di rilevazione si alza fino a magnitudo 1.5. D'altra parte la magnitudo minima che un terremoto deve avere per essere localizzato è intorno a 1.5 per terremoti superficiali.

Per abbassare queste soglie di magnitudo è necessario installare nuove stazioni. Purtroppo la litologia dell'isola è tale per cui i siti ideali, in termini di risposta sismica, in cui installare le stazioni sismiche sono in numero ridotto. Infatti, la parte centro-meridionale dell'isola è costituita da depositi di frana ed è caratterizzata da una topografia complessa, fattori che rendono i siti non ottimali per l'installazione di una stazione a causa della bassa qualità di risposta di sito al passaggio dell'onda sismica. Le stazioni sismiche saranno quindi posizionate in aree il più possibile idonee all'installazione, ci si riserva comunque un'analisi più dettagliata delle risposte dei siti, che saranno scelti prima di procedere all'installazione delle stazioni. Sarà quindi posizionata una stazione (IS1) a copertura

dell'area meridionale nella zona di Barano d'Ischia, una nella zona occidentale ai piedi del sito del pozzo (IS2) e una nella zona sommitale dell'isola vicino a Migliaccia (IS3). Posizionare una stazione a testa pozzo, cioè a 500 m d'altezza, renderebbe più difficile identificare onde sismiche provenienti da profondità di circa 700 m sotto il livello del mare. Infatti, a causa dell'attenuazione geometrica ed anelastica l'onda sismica verrebbe registrata con un'ampiezza minore su di una stazione posizionata a 500 m d'altezza rispetto a come verrebbe registrata su di una stazione vicino al livello del mare. In figura 5.2 sono riportate le posizioni delle 3 stazioni sismiche da installare. Le coordinate di tutte le stazioni sismiche sono riportate in tabella 1.

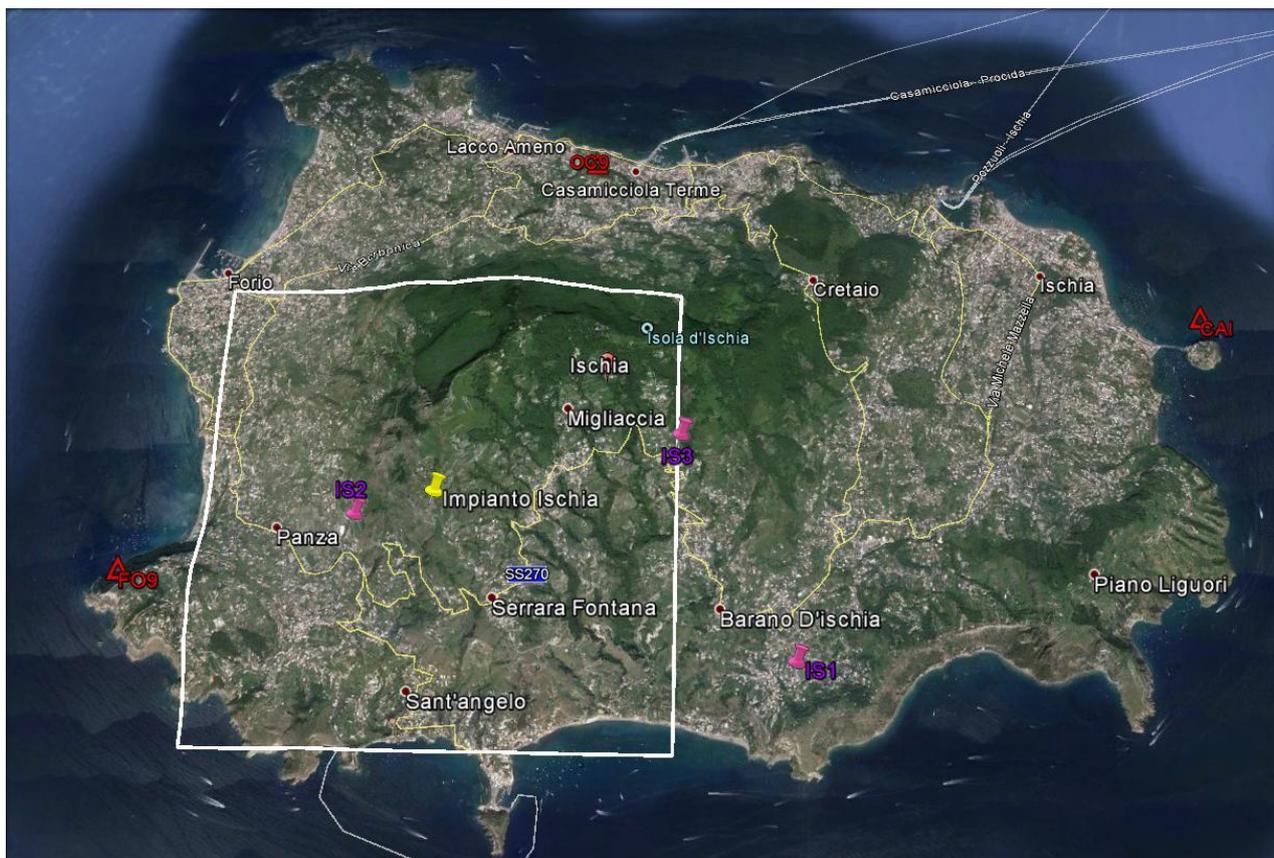


Fig. 5.2: Isola di Ischia. I marker viola indicano le stazioni sismiche da installare per il monitoraggio dell'impianto.

Nome	Longitudine	Latitudine	Altezza (m a.s.l.)
CAI	13.9653	40.7313	80
FO9	13.8553	40.7108	234
OC9	13.9008	40.7458	123
IS1	13.9209	40.7045	192
IS2	13.8773	40.7158	173
IS3	13.9097	40.7215	547

*Table 1: Stazioni sismiche dell'isola di Ischia. Le prime tre sono attualmente installate sull'isola e gestite dall'Osservatorio Vesuviano. Le altre tre sono quelle da aggiungere per il monitoraggio dell'impianto.*

E' stata quindi calcolata la soglia di detezione della rete sismica composta dalle tre stazioni già esistenti e dalle 3 stazioni che andranno ad integrare la rete. In figura 5.3 è riportato il grafico raffigurante la magnitudo minima rilevabile per terremoti con ipocentro a 700 m sotto il livello del mare. Tale profondità minima di 700 m è ritenuta largamente cautelativa, in quanto, ipocentri meno profondi sono poco probabili.

Come mostrato in figura 5.3 la rete sismica composta da 5 stazioni (stelline rosse) è in grado di rilevare terremoti di magnitudo tra 0 e 0.5 localizzati a 700 m sotto il livello del mare in tutta l'area dell'isola. Vale a dire che qualunque terremoto di magnitudo maggiore di 0.5, che avvenga al di sotto del perimetro dell'isola di Ischia, fino ad una profondità di 700 m b.s.l., verrà rilevato dalla rete sismica configurata come mostrato in figura 5.2 (marker viola + triangolini rossi).

Anche la soglia di localizzazione è stata ricalcolata per la nuova rete sismica. In figura 5.4 riportiamo la sensibilità della rete sismica per terremoti localizzati a 700 m sotto il livello del mare. Da qui si evince che la soglia di localizzazione della rete sismica è minore di 1 per terremoti con ipocentro a 700 m sotto il livello del mare su tutta l'isola. Vale a dire che i terremoti di magnitudo di poco minore di 1 o di magnitudo maggiore con ipocentro fino a 700 m di profondità sono identificabili su almeno 2 stazioni, con lettura sia della fase P che della fase S.

Per avere una localizzazione più accurata, cioè per diminuire l'incertezza sulla localizzazione, è invece indispensabile che almeno 4 stazioni registrino l'evento sismico. In figura 5.5 è rappresentata la soglia di localizzazione ottenuta in questo caso. Come si vede dalla figura, terremoti di magnitudo maggiore di 1 - 1.5 sono identificabili su almeno 4 stazioni e quindi localizzabili con buona precisione.

In ognuno dei 3 siti verrà installato un sismometro corto periodo, con periodo proprio non inferiore a 0.5 s ed un accelerometro come prescritto dalle LG.

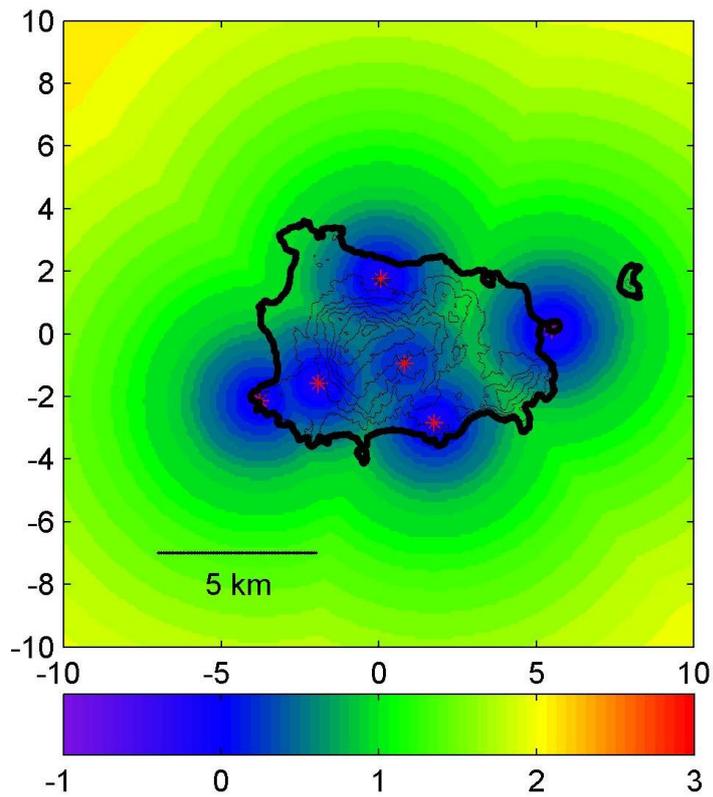


Fig. 5.3: Soglia di deteazione per terremoti localizzati ad una profondità di 700 m b.s.l. (Scala in Magnitudo)

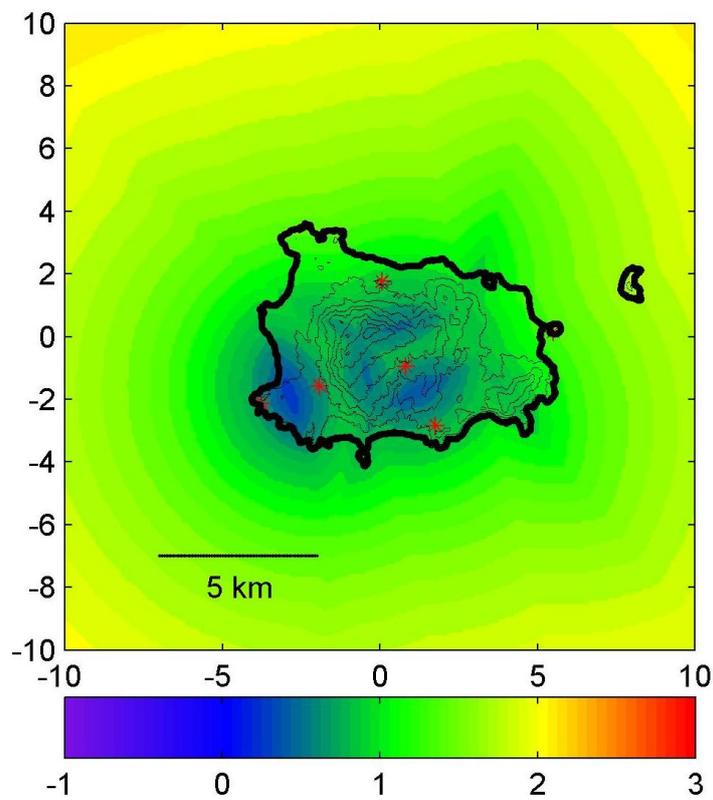


Figure 5.4: Soglia di localizzazione per terremoti localizzati ad una profondità di 700 m b.s.l. Lo soglia è stata calcolata imponendo che solo 2 stazioni rilevino l'evento sismico. (Scala in Magnitudo)

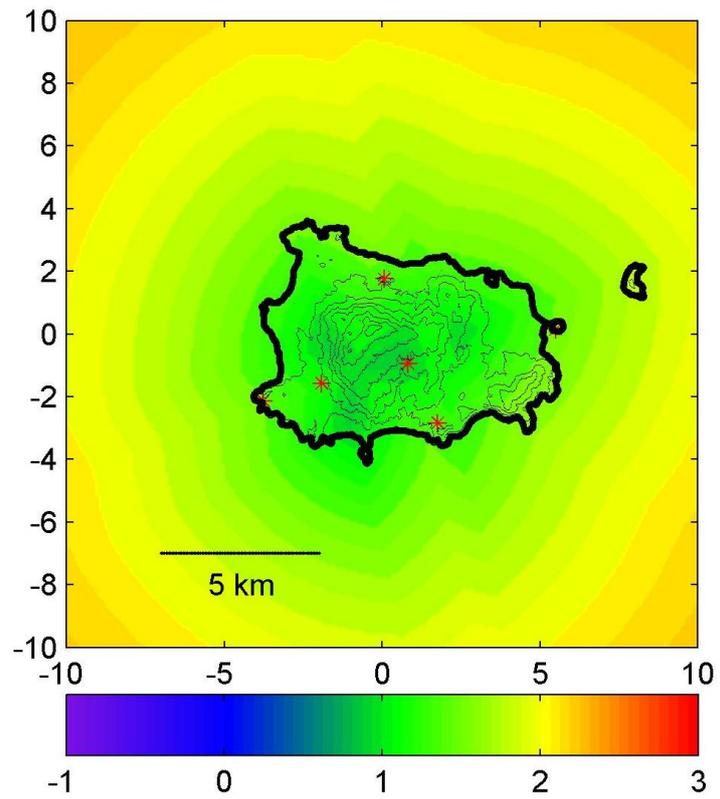


Figure 5.5: Soglia di localizzazione per terremoti localizzati ad una profondità di 700 m b.s.l. Lo soglia è stata calcolata imponendo che 4 stazioni rilevinò l'evento sismico. (Scala in Magnitudo)

## 6. Analisi di pericolosità sismica

### 6.1. Premessa

I risultati presentati in questa sezione sono parte integrante della mappa di pericolosità sismica nazionale calcolata dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (<http://esse1.mi.ingv.it>), attualmente in vigore in Italia a seguito dell'Ordinanza PCM 3519 del 28 aprile 2006 dalla G.U. n.108 del 11/05/06 "Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone":

L'approccio utilizzato per il calcolo della mappa è l'approccio probabilistico standard proposto da Cornell (1968). Nella pratica, l'approccio richiede: i) la selezione delle zone sismogenetiche di interesse per il sito in esame, ii) la definizione delle caratteristiche di ricorrenza degli eventi sismici (e.g. la relazione di Gutenberg - Richter), iii) la selezione della modalità di attenuazione del moto del suolo con la distanza e la magnitudo.

Il risultato dell'analisi è una curva o una mappa che riporta i valori di un parametro utilizzato per caratterizzare il moto del suolo (azione sismica) a cui è soggetta la struttura da edificare o da adeguare, come ad esempio l'accelerazione massima orizzontale su suolo rigido  $a_g$ , che ha una data probabilità (o frequenza) di superamento, per un dato intervallo temporale  $V_R$  noto come periodo di esposizione o di riferimento.

Il periodo di riferimento  $V_R$  di una costruzione, viene valutato moltiplicando la vita nominale  $V_N$  (espressa in anni) per il coefficiente d'uso della costruzione  $C_U$  ( $V_R = V_N \times C_U$ ).

In particolare, la Vita nominale ( $V_N$ ) di una costruzione, così come definita al § 2.4.1 delle Nuove norme tecniche per le costruzioni, è la durata alla quale deve farsi espresso riferimento in sede progettuale, con riferimento alla durabilità delle costruzioni, nel dimensionare le strutture ed i particolari costruttivi, nella scelta dei materiali e delle eventuali applicazioni e delle misure protettive per garantire il mantenimento della resistenza e della funzionalità. I valori a cui fare riferimento sono riportati nelle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008 di cui portiamo un estratto in Figura 6.1.1a-b.

**Tabella 2.4.I** – Vita nominale  $V_N$  per diversi tipi di opere

TIPI DI COSTRUZIONE		Vita Nominale $V_N$ (in anni)
1	Opere provvisorie – Opere provvisionali - Strutture in fase costruttiva <sup>1</sup>	$\leq 10$
2	Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	$\geq 50$
3	Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	$\geq 100$

Fig. 6.1.1a. Estratto dalle Nuove norme tecniche per le costruzioni dove si riportano i valori di vita nominale  $V_N$  in anni per i diversi tipi di opere.

## 2.4.2 CLASSI D'USO

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso così definite:

*Classe I:* Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.

*Classe II:* Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.

*Classe III:* Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.

*Classe IV:* Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al D.M. 5 novembre 2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.

Il valore del coefficiente d'uso  $C_U$  è definito, al variare della classe d'uso, come mostrato in Tab. 2.4.II.

Tab. 2.4.II – Valori del coefficiente d'uso  $C_U$

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE $C_U$	0,7	1,0	1,5	2,0

Se  $V_R \leq 35$  anni si pone comunque  $V_R = 35$  anni.

Fig. 6.1.1b. Estratto dalle Nuove norme tecniche per le costruzioni. Si riportano le classi d'uso ed il coefficiente d'uso da utilizzare per il calcolo del periodo di riferimento  $V_R$ .

Per opere ordinarie (Classe d'uso II e coefficiente d'uso  $C_U=1.0$ ) il periodo di riferimento è  $V_R= 50$  anni, mentre la probabilità di superamento  $P$  è fissata al 10%. Assumendo un modello di occorrenza dei terremoti di tipo Poisson, è possibile quindi calcolare il periodo di ritorno dell'azione sismica considerata come:

$$T_R = - \frac{V_R}{\ln(1 - P)} \quad (1)$$

Utilizzando i valori sopraindicati per  $P$  e  $V_R$ , risulta che il periodo di ritorno dell'azione sismica da considerare è 475 anni.

## 6.2. Pericolosità sismica

Il sito considerato ha coordinate geografiche Latitudine: 40°43' 01,88N e Longitudine:13° 53' 11,21E ed è ubicato sul versante ovest dell'isola di Ischia (Figura 6.2.1).

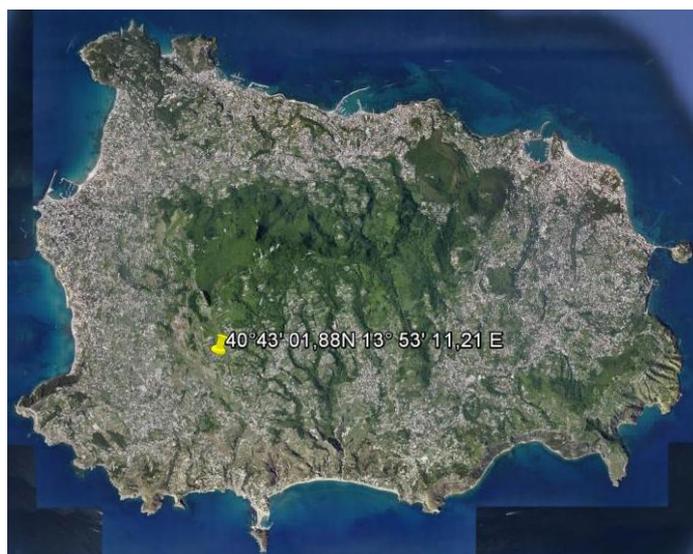


Fig. 6.2.1. Posizione geografica del sito di interesse per l'analisi di pericolosità sismica

Con riferimento alla Zonazione Sismogenetica ZS9 (<http://zonesismiche.mi.ingv.it/>) attualmente in vigore per l'Italia esso è ubicato nella zona sismogenetica numero 928. Per tale zona il valore di magnitudo massima considerata per il calcolo della pericolosità sismica è  $M_w$  5.91, il valore di  $b$  della Gutenberg - Richter è -1.04 se si considerano gli intervalli di completezza prevalentemente storici, mentre è -0.66 qualora si considerino intervalli di completezza prevalentemente statistici. La magnitudo minima è  $M_w$  4.76 ed il tasso di occorrenza dei terremoto è 0.21 eventi per anno.

Per quanto concerne la relazione di attenuazione del moto del suolo, data l'assenza di registrazioni strumentali per eventi di interesse per il calcolo della pericolosità sismica, sono state calcolate delle tabelle di attenuazione utilizzando una tecnica di simulazione stocastica, assumendo un valore di *stress-drop* di 50 bar in linea con quanto riportato da De Natale et al. (1988). Le tabelle riportano i valori dell'accelerazione massima del suolo per magnitudo comprese tra 3 e 6.5 e distanze comprese tra 1 e 20 km.

Come si evince dalla figura 6.2.2, il sito di interesse (identificato dall'incrocio delle due linee tratteggiate) non coincide con nessun nodo della griglia utilizzata per il calcolo della mappa nazionale. Pertanto, come previsto dalle Nuove norme tecniche per le costruzioni (D.M. 14 gennaio 2008), il valore di pericolosità sismica espresso come valore di accelerazione con periodo di ritorno di 475 anni, è dato dalla media pesata dei valori di pericolosità nei quattro punti della griglia di riferimento, secondo l'equazione:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{p_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i}} \quad (2)$$

dove  $1/d^i$  rappresentano i pesi e corrispondono agli inversi delle distanze tra il sito in esame e i quattro vertici.

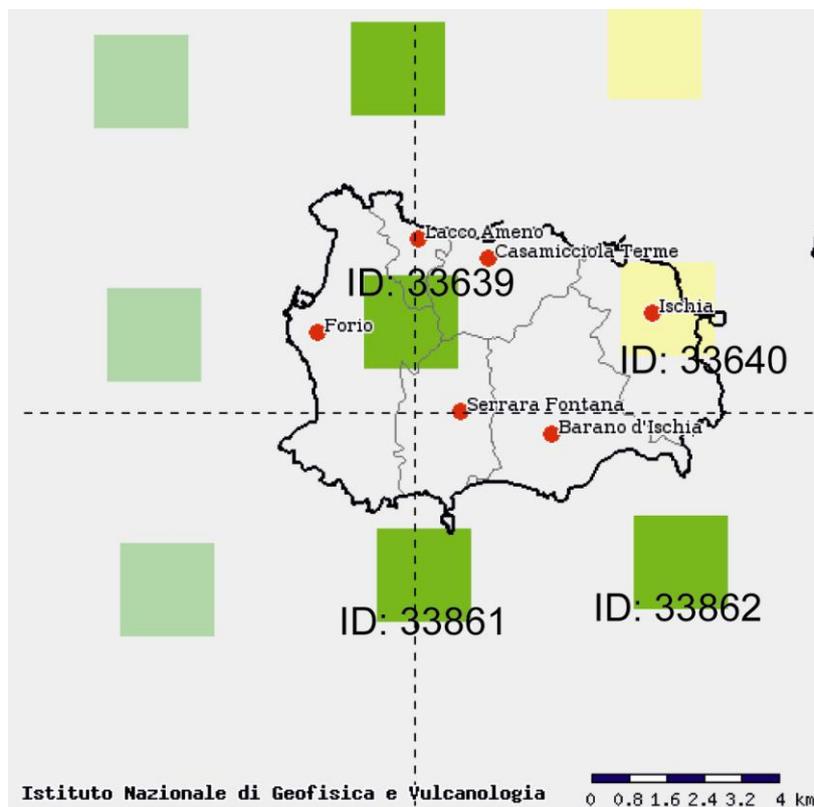


Fig. 6.2.2: Griglia dei valori di pericolosità sismica in termini di accelerazione massima orizzontale ag (espressi in g; essendo g l'accelerazione di gravità) su sito roccioso con probabilità di superamento del 10%

in 50 anni, o con periodo di ritorno di 475 anni. Nella figura sono riportati anche gli ID relativi ai siti utilizzati per calcolare il valore di  $a_g$  al sito in esame.

Nella tabella 6.1.1, che segue, si riportano i valori di  $a_g$  espressi in  $g$  ai quattro punti indicati in figura 6.2.2, il cui ID è riportato nella prima colonna della Tabella stessa.

Punto griglia	Latitudine	Longitudine	Distanza (km)	$a_g(g)$
ID: 33639	40.7343	13.8862	1.924	0.1458
ID: 33861	40.6843	13.8859	3.636	0.1333
ID: 33640	40.7341	13.9521	5.886	0.1595
ID: 33862	40.6841	13.9518	6.645	0.1492

Tabella 6.1.1

I valori di  $a_g$  riportati in Tabella si ottengono dalle curve di pericolosità riportate nelle figure da 6.2.3 a 6.2.7 e corrispondenti al valore di frequenza annuale di superamento di  $0.0021 \text{ anni}^{-1}$  che corrisponde a periodo di ritorno  $T_R=475$  anni.

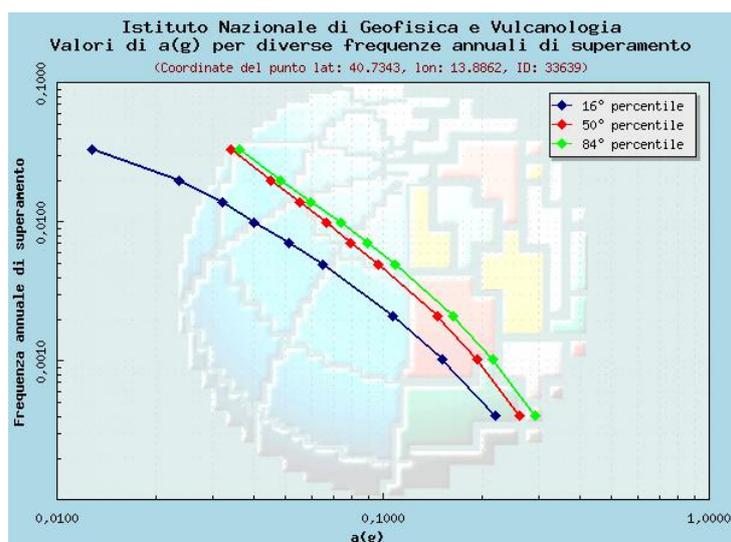


Figura 6.2.3. Curve di pericolosità sismica per il sito ID:33639. La curva in rossa rappresenta i valori medi delle frequenze annuali di superamento dell'accelerazione massima. Le curve blu e verdi corrispondono invece rispettivamente al 16° ed all'84° percentile.

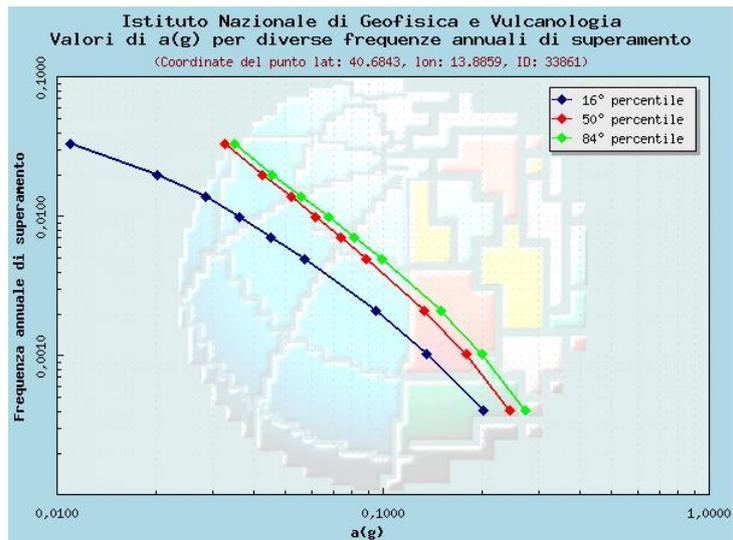


Figura 6.2.4. Curve di pericolosità sismica per il sito ID:33861.

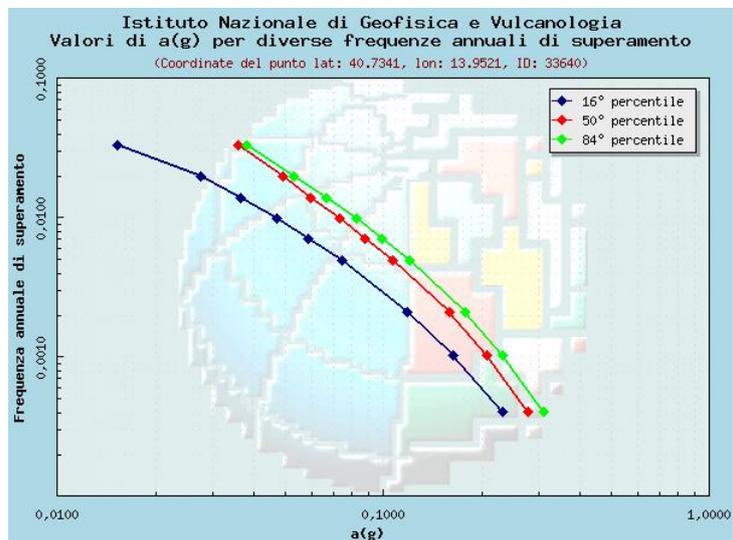


Figura 6.2.5. Curve di pericolosità sismica per il sito ID:33640.

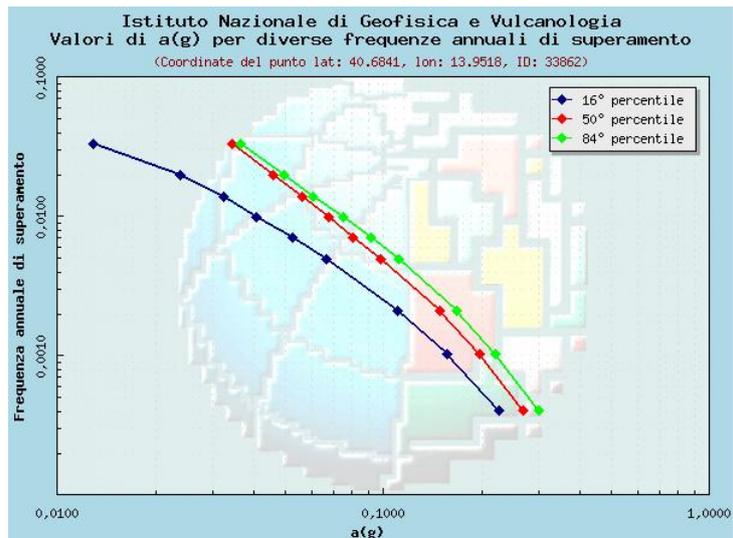


Figura 6.2.7. Curve di pericolosità sismica per il sito ID:33862.

Utilizzando l'equazione (2) ed i valori riportati in tabella 6.1.1 si ottiene quindi per il sito di interesse il valore di  $a_g=0.1453g$ .

Sulla base di quanto stabilito dalle Nuove norme tecniche per le costruzioni (D.M. 14 gennaio 2008) il sito in esame è quindi ubicato in ZONA 3, ovvero in questa zona possono verificarsi forti terremoti anche se questo sono estremamente rari.

## Bibliografia

Carlino S, Cubellis E, Luongo G, Obrizzo F (2006) On the mechanics of caldera resurgence of Ischia Island (southern Italy). In: Troise C, De Natale G, Kilburn CRJ (eds) Mechanisms of activity and unrest at large calderas, vol 269. Geological Society, London, pp 181–193, Special Publications

Carlino S, Cubellis E, Maturano A (2009) The catastrophic 1883 earthquake at the island of Ischia (southern Italy): macroseismic data and the role of geological conditions. *Nat Hazards* 52:231– 247. doi:10.1007/s11069-009-9367-2

Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.* **58**, 1583-1606.

Del Pezzo E. and F. Bianco. (2013) A reappraisal of seismic Q evaluated in Campi Flegrei caldera. Receipt for the application to risk analysis. *J. Seismol.* Volume 17, Issue 2, pp 829-837 doi:10.1007/s10950-012-9349-9

Del Pezzo E., F. Bianco, M. Castellano, P. Cusano, D. Galluzzo, M. La Rocca, and S. Petrosino. (2013) Detection of Seismic Signals from Background Noise in the Area of Campi Flegrei: Limits of the Present Seismic Monitoring. *Seism. Res. Lett.* Volume 84, Number 2 doi: 10.1785/0220120062

D'Auria, L., M. Martini, A. Esposito, P. Ricciolino and F. Giudicepietro. (2008) A unified 3D velocity model for the neapolitan volcanic areas, In: W. Marzocchi and A. Zollo (eds.), Conception, verification and application of innovative techniques to study active volcanoes, INGV-DPC, 375-390. ISBN:978-88-89972-90-0.

De Natale G., Faccioli E. and Zollo A. (1988). Scaling of peak ground motion from digital recordings of small earthquakes at Campi Flegrei, Southern Italy. *Pure and Applied Geophysics*, 128, 37-53.

Luongo G., Carlino S., Cubellis E., Delizia I., Iannuzzi R., Obrizzo F. (2006) Il terremoto di Casamicciola del 1883: una ricostruzione mancata. Alfa Tipografia Napoli.

Tramelli, A., C. Troise, G. De Natale, M. Orazi. (2013). A new method for optimization and testing of microseismic networks: an application to Campi Flegrei (Southern Italy). *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol.103 (3), 1679-1691,doi: 10.1785/0120120211.