REGIONE CAMPANIA

*Presidenza del Consiglio dei Ministri*
*Il Commissario per la ricostruzione*
*nei territori dell'isola d'Ischia interessati dal sisma del*
*21 agosto 2017*

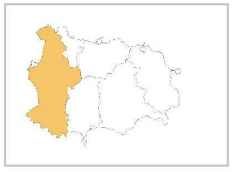
PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile

Piano degli studi di microzonazione sismica di III livello dei Comuni di Casamicciola, Lacco Ameno e Forio, ai sensi del D. L. 28 settembre 2018, n. 109 art. 18, comma 1, lettera h

# MICROZONAZIONE SISMICA

## Relazione illustrativa

## Regione Campania
## Comune di Forio



| Soggetto realizzatore | Data e Revisione | |
|---|---|---|
| Arch. Antonio Oliviero<br>Dott. Geol. Francesco Cuccurullo<br>Dott. Geol. Angelo Verta | | CENTRO MS<br>CENTRO PER LA MICROZONAZIONE SISMICA E LE SUE APPLICAZIONI |

# Sommario

1 Introduzione ..... 4
1.0 Finalità degli studi ..... 4
1.1 Descrizione generale dell'area comunale ..... 7
1.2 Definizione dei documenti di base utilizzati nello studio ..... 8
1.3 Aree da sottoporre agli studi di MS ..... 10
2. Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento ..... 12
2.1 Sismicità storica dell'area di studio ..... 15
2.2 Sismicità recente dell'area di studio ..... 21
2.3 Pericolosità sismica di base ..... 25
3. Assetto geologico e geomorfologico dell'area ..... 34
3.1 Inquadramento geologico ..... 34
3.2 Assetto geomorfologico ..... 51
3.3 Assetto stratigrafico ..... 70
3.4 Elementi tettonici (Faglie attive e capaci e potenzialmente attive e capaci) ..... 88
3.5 Considerazioni finali sull'architettura stratigrafica e sull'assetto morfologico e strutturale ..... 89
4. Dati geotecnici e geofisici ..... 91
4.1 Dati pregressi ..... 92
4.2 Dati acquisiti ex-novo ..... 95
5. Modello del sottosuolo finalizzato alla MS ..... 124
5.1 Unità geologico-tecniche: definizione e parametrizzazione ..... 124
5.2 Sezioni geologico-tecniche ..... 147
6. Interpretazioni e incertezze ..... 153
7. Metodologie di elaborazione e risultati ..... 158
7.1 Zone stabili suscettibili di amplificazione ..... 159
7.1.1 Scelta dell'input sismico ..... 161
7.1.2 Simulazioni numeriche ..... 167
7.1.3 Risultati ..... 177
7.2 Zone instabili ..... 192
7.2.1 Faglie attive e capaci (FAC) ..... 192
7.2.2 Liquefazioni (LQ) ..... 192
7.2.3. Instabilità di versante sismoindotte (FR) ..... 197
8. Elaborati cartografici ..... 202
8.1 Carta delle indagini (CI) ..... 202
8.2 Carta delle frequenze naturali dei terreni ..... 204

8.3 Carta Geologico Tecnica per la MS (CGT_MS) ..... 208
8.4 Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) ..... 211
8.5 Carte di Microzonazione Sismica (MS) di III livello ..... 225
8.6 Commenti finali e criticità ..... 227
9. Bibliografia ..... 230
10. Allegati ..... 235

# 1 Introduzione

## 1.0 Finalità degli studi

In ottemperanza all'Ordinanza del Commissario Straordinario per la ricostruzione nei territori dell'isola d'Ischia interessati dal sisma del 21 agosto 2017 n. 1 del 27 novembre 2018: "Assegnazione dei finanziamenti per gli studi di microzonazione sismica di III livello ai Comuni di Casamicciola Terme, Forio, Lacco Ameno dell'isola di Ischia a seguito degli eventi sismici del 21 agosto 2017", l'Amministrazione Comunale di Forio, giusta Determina di incarico del 07.01.2019, ha affidato all'RTP costituito dall'Arch. Antonio Oliviero, dal Dr. Geol. Francesco Cuccurullo e dal Dr. Geol. Angelo Verta, l'incarico di effettuare lo "Studio di Microzonazione Sismica di Terzo Livello del territorio comunale di Forio".

Lo studio di MS di livello III svolto, a seguito di sopralluoghi, rilievi, raccolta dati, indagini in situ, interpretazione ed analisi varie) ha portato alla redazione delle cartografie, della relazione e degli elaborati informatici indicati nel disciplinare di incarico.

L'analisi di MS di livello 3 è finalizzata a quantificare la pericolosità sismica locale delle microzone, con particolare riferimento alle aree stabili, alle aree stabili suscettibili di amplificazione e alle aree instabili; ed alla redazione delle Carte di Microzonazione sismica di livello 3 alla scala 1:5.000. Preliminarmente alla valutazione quantitativa della MS di III Livello sono stati effettuati anche gli studi di I Livello per il comune di Forio, di cui non era ancora dotato.

Lo studio è stato realizzato nel rispetto degli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica (ICMS, 2008 e successivi aggiornamenti) e delle indicazioni contenute nei "Protocolli di raccolta dati e relativa elaborazione finalizzate alla realizzazione di carte di Microzonazione Sismica di Livello 3". e restituito secondo gli Standard di rappresentazione e archiviazione informatica degli studi di MS (Standard Versione 4.0b.

Lo studio di MS di livello 3 è stato effettuato mediante analisi di risposta sismica locale monodimensionale (1D) e bidimensionale (2D), effettuate su verticali e sezioni rappresentative, in numero adeguato per poter caratterizzare le tipologie di microzone individuate nella Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS). I risultati delle analisi numeriche sono stati restituiti in termini di accelerogrammi calcolati in superficie ed elaborati in termini di fattori di amplificazione in pseudo-accelerazione calcolati per prefissati intervalli di periodi, nonché di spettri di risposta in accelerazione al 5% di smorzamento.

Tutte le attività finalizzate alla realizzazione dello studio di MS di III livello sono state eseguite in coordinamento con il Centro per la Microzonazione Sismica e le sue applicazioni (Centro MS tramite l'Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria del Consiglio Nazionale delle Ricerche) che ha svolto per conto del Commissario per la ricostruzione l'attività di supporto tecnico-scientifico, acquisizione, elaborazione e verifica dei risultati).

In particolare le attività svolte sono state le seguenti:

1. raccolta ed elaborazione dei dati pregressi (un congruo numero di indagini pregresse è stato fornito dal Cento MS, i restanti dati sono stati forniti dal I Settore - Ufficio

Urbanistica che ha fornito un supporto utilissimo anche per l'individuazione delle aree dove effettuare nuove indagini);

2. definizione del piano di indagini integrative;
3. esecuzione dei rilievi geologico-tecnici di dettaglio;
4. esecuzione delle indagini integrative;
5. archiviazione dei dati e dei metadati;
6. redazione della Carta delle Indagini;
7. realizzazione della Carta delle Frequenze Naturali Dei Terreni;
8. realizzazione della Carta Geologico-Tecnica (CGT) corredata dalle sezioni geologico-tecniche;
9. definizione del modello di sottosuolo finalizzato allo studio di MS;
10. realizzazione della Carta delle Microzone Omogenee in prospettiva sismica (MOPS);
11. esecuzione di analisi numeriche monodimensionali (1D) di risposta sismica locale;
12. realizzazione delle Carte di microzonazione sismica di livello 3, con indicazione dei fattori di amplificazione e degli spettri di risposta in accelerazione;
13. redazione della presente Relazione illustrativa.

Durante l'intero periodo di lavoro c'è stato un continuo scambio di informazioni, dati ed interpretazioni il Centro MS – CNR IGAG ed ISMAR, sia de visu tramite periodiche riunioni presso la sede del CNR-ISMAR di Napoli ed il Dipartimento di Ingegneria dell'Università Federico II di Napoli, sia in remoto tramite mail e telefonate.

I riferimenti normativi e tecnici principali utilizzati per il presente lavoro sono i seguenti:

- Ordinanza n. 1/2018 del 28/11/2018, Assegnazione dei finanziamenti per gli studi di microzonazione sismica di III livello ai Comuni di Casamicciola Terme, Forio, Lacco Ameno dell'Isola di Ischia interessati dal sisma del 21.08.2017;
- Protocolli di acquisizione dati ed elaborazione relativi alle attività di Microzonazione di Livello III nei territori dei Comuni dell'isola di Ischia interessati dall'evento sismico del 21 agosto 2017 – Gennaio 2019;
- "Primi interventi urgenti di protezione civile conseguenti all'evento sismico che ha interessato il territorio dei comuni di Casamicciola Terme, di Forio e di Lacco Ameno dell'Isola di Ischia il giorno 21 agosto 2017" – Misure di carattere non strutturale finalizzate alla riduzione del rischio residuo (art. 8 del Ordinanza OCDPC n. 476 del 29 agosto 2017) - Relazione Finale (così definita nel presente lavoro);
- EC8 -1 - Design of Strutctures for earthquake resistance, part.1: General rules, seismic action and rules for building;
- Indirizzi e criteri generali per la Microzonazione sismica, GdL DPC/Regioni. Testo approvato dalla Conferenza dei Presidenti delle Regioni nella seduta del 13 novembre 2008;

- Decreto Ministeriale Infrastrutture e Trasporti del 17.01.2018 - Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni;
- Gruppo di lavoro MS, 2008. Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica. Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome - Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e Dvd. Disponibili nel sito web del Dipartimento della Protezione Civile, area "Rischio Sismico". Link: http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_pub.wp?contentId=PUB1137
- Contributi per l'aggiornamento degli Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica. Ingegneria Sismica, Anno XXVIII – n.2 – 2011. Link: http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/aggiornamento_indirizzi_microzonazione_sismica.pdf
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2015. Standard di rappresentazione e archiviazione informatica. a. Versione 4.0b. Roma, ottobre 2015. 122 pp. Link: http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/StandardMS_4_0b.pdf
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2015. Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da Faglie Attive e Capaci (FAC), Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome – Dipartimento della protezione civile, Roma. Link: http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/LineeGuidaFAC_v1_0.pdf;
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2017. Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da Liquefazione (LQ). Dipartimento della protezione civile, Roma. Versione 1.0, Link http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/LG_Liq_v1_0.pdf
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2015. Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da instabilità di versante sismoindotte (FR). Dipartimento della protezione civile, Roma. Versione 1.0. Link: http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/LG_Frane_v1_0.pdf
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2014. Linee guida per l'elaborazione della carta e delle sezioni geologico tecniche per la microzonazione sismica (CGT_MS). Dipartimento della protezione civile, Roma. Bozza, ver. 1.2 beta.
- Significato e contenuto degli studi di MS di livello 2 e 3. Link: http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/Significato_e_contenuto_degli_studi_di_MS_di_livello 2_e_3.pdf.
- Software per l'archiviazione delle indagini per la MS (SoftMS versione 4.0).

## 1.1 Descrizione generale dell'area comunale

Il territorio comunale di Forio è situato nella parte nord occidentale dell'isola di Ischia e ne comprende all'incirca un terzo dell'intera superficie. Confina a nord est con il comune di Lacco Ameno, ad est con i comuni di Casamicciola Terme e Serrara Fontana, mentre a nord, ovest e sud è circondato dal Mar Tirreno.

La sua altitudine va dal livello del mare ai 788 m. del Monte Epomeo. Lo stesso presenta un'estensione pari a circa 13.08 $km^2$. Il confine nord orientale è costituito dalla Punta Caruso, promontorio alto sul mare. Verso ovest lo scenario si trasforma in due lunghe spiagge, dette "San Francesco" la prima e "la Chiaia" la seconda, che quasi senza soluzione di continuità arrivano fino al porto. Questo è concluso dal promontorio del Soccorso, che si protende sul mare. Una strada panoramica alta lungo la costa conduce ad una serie di scogli tufacei dalle forme suggestive, uno dei quali, somigliante ad una testa d'aquila, forma uno spartitraffico naturale. In basso, la spiaggia di Cava dell'Isola, e infine la baia di Citara, una delle spiagge più grandi dell'isola di Ischia.

La baia si conclude con il promontorio di Punta Imperatore, alto all'incirca 150 m. sul livello del mare e coronato da un faro. Questo tratto di costa è caratteristico per le scogliere affioranti, dette "chianare". La costa resta rocciosa e a picco, con piccoli promontori, fino al confine sud del Comune, concluso dalla Punta Chiarito.

Nella parte più interna, la vecchia strada detta "la Borbonica", attraversato il centro abitato, prosegue lungo la provinciale verso il monte Epomeo

Il centro abitato più antico si riconosce nell'area che parte dall'innesto corso Umberto I – via Matteo Verde con via Roma, e prosegue lungo gli assi stradali principali che conducono a nord, dove ha inglobato e trasformato case agricole e nuclei sparsi, sperdendosi infine in un tessuto minuto di vicoli, delimitati da cortine edilizie e da recinti di giardini, che per le più recenti trasformazioni hanno perso il carattere di topicità originario, mostrandosi nel complesso in modo disordinato e distribuiti "a pioggia".

Altri due nuclei riconoscibili sono nella parte interna:

- in direzione est-ovest Panza, che si estende in lieve pendio includendo l'abitato di Fiorentino ed edilizia sparsa;
- lungo la direttrice nord-sud l'area di Cuotto, situata verso monte in corrispondenza della baia di Citara, inglobante aree agricole residuali ed edilizia spontanea molto recente.

*Figura 1 - Territorio comunale di Forio e degli altri comuni dell'isola di Ischia (da Google Earth Pro).*

## 1.2 Definizione dei documenti di base utilizzati nello studio

Per lo studio svolto e per la redazione delle carte tematiche redatte sono state utilizzate le seguenti basi cartografiche:

- Carte tecniche numeriche (C.T.R.) Regione Campania in scala 1:5.000, Tavv. 464032, 464033, 464071, 464072, 464073, 464074, 464111 e 464114 – anno 2004 con relativa licenza d'uso;
- DTM Foglio 164 ISCHIA;
- Foto satellitari da Google Earth.

Gli aspetti geologico-morfologici e strutturali del comprensorio comunale indagato sono stati in gran parte ricavati da numerosi studi di carattere scientifico presenti in bibliografia (fornite tramite server FTP dal CNR-ISMAR), da diversi studi geologici forniti dall'Amministrazione Comunale (in particolar modo dallo Studio Geologico – Sismico allegato al Piano Urbanistico Comunale) e dal lavoro eseguito dal CNR-IGAG e dal Centro MS nell'ambito dei *"Primi interventi urgenti di protezione civile conseguenti all'evento sismico che ha interessato il territorio dei comuni di Casamicciola*

*Terme, di Forio e di Lacco Ameno dell'Isola di Ischia il giorno 21 agosto 2017".* Quest'ultimo è stato il principale riferimento per il presente studio.

Inoltre sono state consultate e valutate le seguenti fonti geologiche e cartografiche:

1. Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PSAI) del Distretto Idrografico dell'Appennino Meridionale redatto dall'ex Autorità di Bacino Regionale Campania Centrale ed approvato Delibera di Adozione del Comitato Istituzionale n.1 del 23/02/2015, per l'individuazione e la perimetrazione delle aree a rischio idrogeologico;
2. Progetto IFFI (banca dati inventario fenomeni franosi d'Italia) per l'individuazione delle aree in frana;
3. Progetto ITHACA (ITaly HAzard from CApable faults – catalogo delle faglie capaci);
4. Sbrana, A., Toccaceli, R.M. (2011) - Carta Geologica della Regione Campania alla scala 1:10.000. Foglio 464 Isola d'Ischia. Progetto CARG Campania, Assessorato Difesa del Suolo. Litografia artistica cartografica,
5. Volcanological map of Ischia Alessandro Sbrana, Paola Marianelli, Giuseppe Pasquini, Scala 1:10.000, 2018;
6. Carta Geolitologica allegata allo studio *"Primi interventi urgenti di protezione civile conseguenti all'evento sismico che ha interessato il territorio dei comuni di Casamicciola Terme, di Forio e di Lacco Ameno dell'Isola di Ischia il giorno 21 agosto 2017";*
7. Carta geologico-tecnica e delle indagini allegata allo studio *"Primi interventi urgenti di protezione civile conseguenti all'evento sismico che ha interessato il territorio dei comuni di Casamicciola Terme, di Forio e di Lacco Ameno dell'Isola di Ischia il giorno 21 agosto 2017";*
8. Carta delle MOPS allegata allo studio *"Primi interventi urgenti di protezione civile conseguenti all'evento sismico che ha interessato il territorio dei comuni di Casamicciola Terme, di Forio e di Lacco Ameno dell'Isola di Ischia il giorno 21 agosto 2017".*

Infine è stato utilizzato come fonte di acquisizione di dati geognostici e sismici lo Studio Geologico – Sismico allegato al Piano Urbanistico Comunale, fornito dal dirigente del I Settore – Urbanistica del comune di Forio, arch. Marco Raia.

I dati acquisiti sono stati successivamente caricati all'interno delle specifiche cartelle create sul server FTP creato dal Centro MS al fine di condividere i files e le informazioni con gli altri gruppi di lavoro

## 1.3 Aree da sottoporre agli studi di MS

Lo studio di Microzonazione Sismica per il comune di Forio, così come concordato con gli Enti preposti prima della sottoscrizione del contratto, è stato effettuato nelle due aree a maggiore urbanizzazione del territorio comunale e cioè l'area del centro urbano di Forio (1,77 $km^2$) nella parte centrale del territorio comunale e l'area del centro urbano di Panza (0.63 $km^2$) a sud dello stesso (Figura 2).

La stessa figura mostra chiaramente che le aree da cartografare nelle carte di Microzonazione di I Livello (Geologico – Tecnica, MOPS, Indagini e Frequenze) non comprendono le zone di Zaro, Monte Nuovo, Monte Epomeo, Punta Imperatore e Capo Negro. Ciò nonostante, nell'ambito delle attività svolte, al fine di dare continuità al lavoro effettuato, è stato ritenuto opportuno studiare e cartografare nelle tavole tematiche e nei relativi shape files prodotti l'intero territorio comunale.

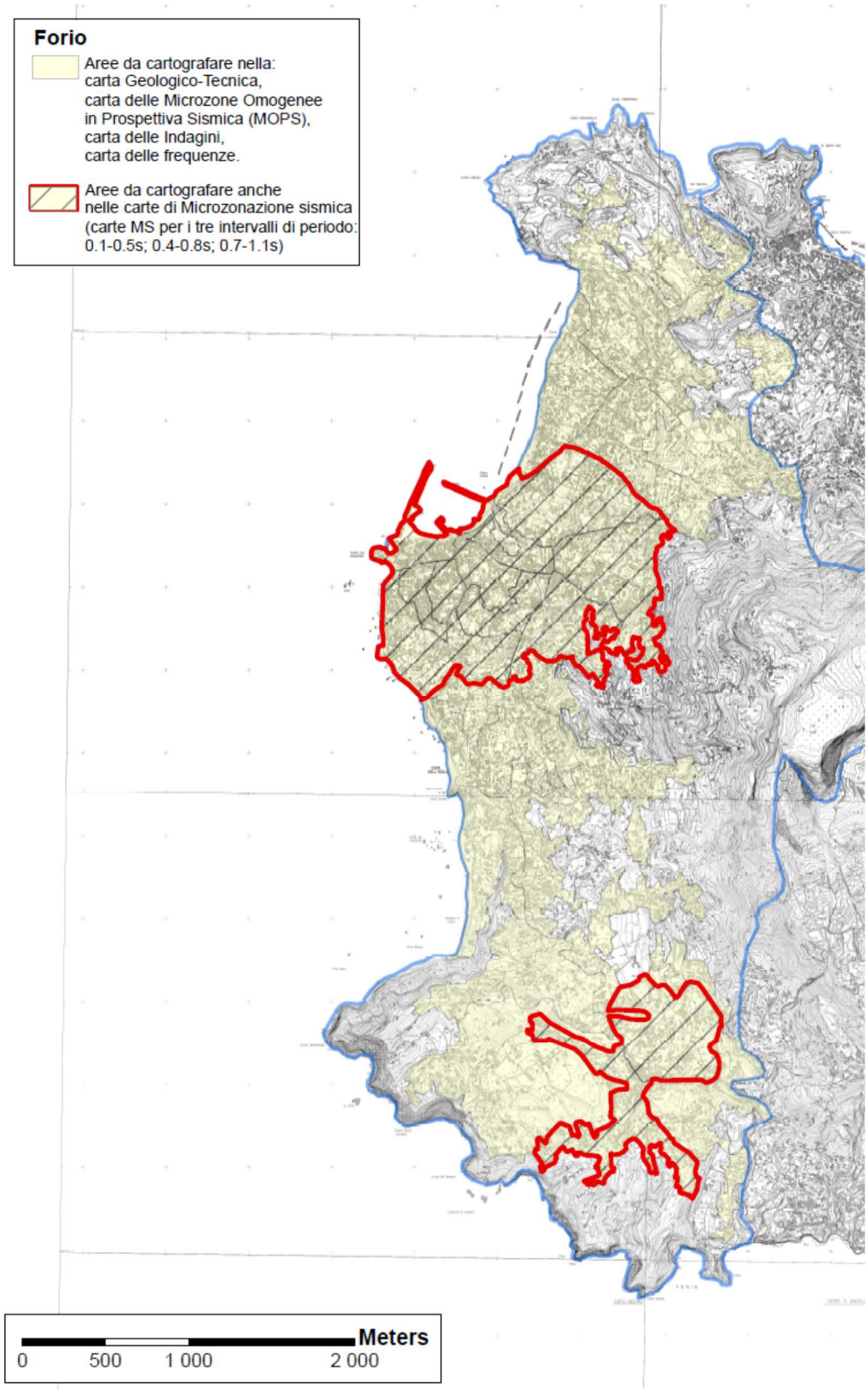



*Figura 2 – Carta approvata delle aree da sottoporre a Microzonazione Sismica per il comune di Forio.*

# 2. Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento

La pericolosità sismica di un'area è intesa come la probabilità che un dato valore di scuotimento del terreno, espresso con parametri fisici (picco di accelerazione orizzontale, picco di velocità, picco di spostamento, accelerazione spettrale) possa essere superato in un certo lasso di tempo a seguito di un terremoto. La pericolosità sismica, insieme alla vulnerabilità e al valore esposto in un'area, rappresenta la grandezza fondamentale per la definizione del rischio sismico inteso come la probabilità che un dato valore di danno possa essere superato in un certo intervallo di tempo a seguito di un evento sismico (Elementi di calcolo della pericolosità D. Slejko 1999).
Il punto di riferimento per la valutazione della pericolosità di base del territorio italiano era rappresentato, fino al 2002, dalla zonazione sismogenetica ZS4 (Meletti et al., 2000 Scandone e Stucchi 2000). Successivamente, i nuovi sviluppi e ricerche nell'ambito della sismogenesi (INGV-AA.VV. 2004) hanno evidenziato alcune incongruenze e la scarsa compatibilità con alcuni cataloghi di terremoti e pertanto è stato proposto un nuovo modello di zonazione sismogenetica denominato ZS9. Tale zonazione ha apportato alcune modifiche al modello iniziale con il raggruppamento e l'introduzione di nuove zone sismogenetiche (Figura 3 e Figura 4).

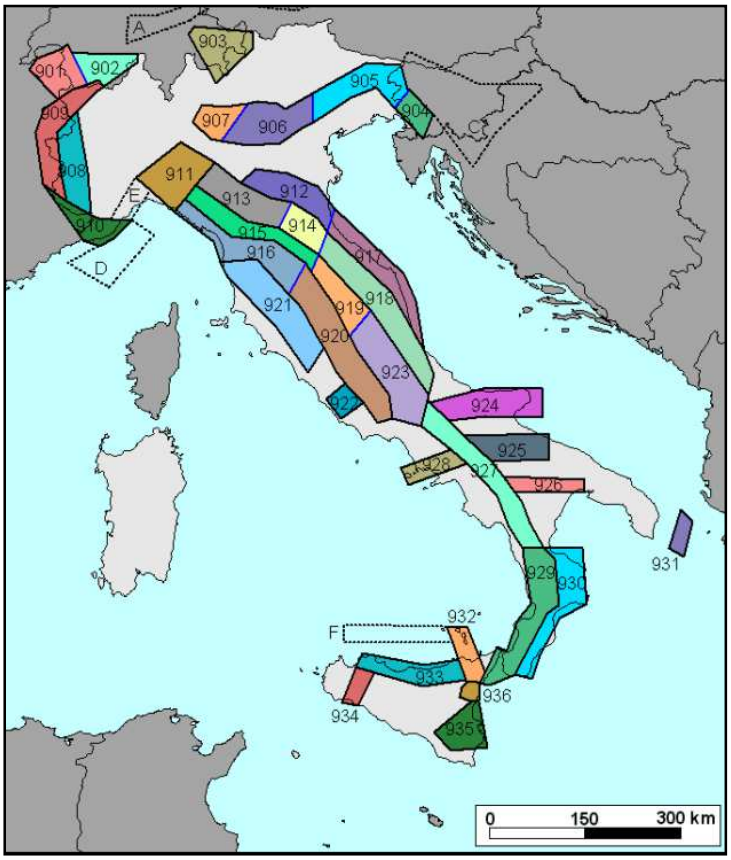



*Figura 3 - Zonazione sismogenetica SZ9.*

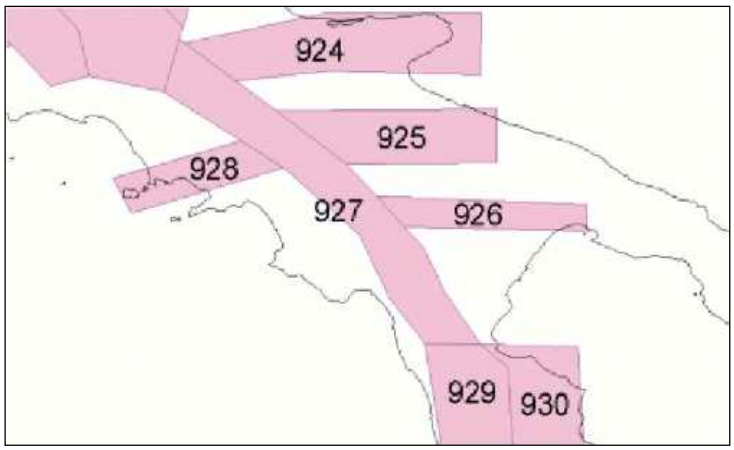



*Figura 4 - Zonazione sismogenetica SZ9 – particolare. L'area oggetto di studio ricade all'interno della zona-sorgente 928.*

L'area oggetto di studio ricade all'interno della zona - sorgente 928, alla quale è associata una magnitudo $MW_{MAX}$ pari a 5.91.

Dalla banca dati DISS (Database of Individual Seismogenic Sources dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia), un archivio che utilizza informazioni di diversa natura per delineare le sorgenti sismogenetiche ritenute in grado di generare terremoti di magnitudo 5.5 e superiori, è possibile ricavare le sorgenti sismogenetiche della Regione Campania, le quali si localizzano maggiormente nella zona assiale della catena appenninica meridionale. Per l'isola di Ischia, invece, si individua n.1 sorgente individuale e n.1 sorgente composita.

Per sorgente sismogenetica individuale si intende una struttura geologica che sia in grado di generare, ciclicamente ed esclusivamente, il terremoto massimo ad essa associato. Un'altra proprietà è quella di possedere una consistenza interna in termini di lunghezza, larghezza, entità della dislocazione per evento e magnitudo. Una sorgente sismica areale rappresenta un insieme di strutture geologiche aventi tra loro caratteristiche geometriche e cinematiche comuni, quali profondità, direzione, immersione, verso e pendenza, e potenzialmente in grado di generare terremoti di magnitudo maggiore di 5.5.

Infine, le sorgenti macrosismiche sono state ottenute, nella suddetta banca dati, sulla base dei campi macrosismici dei terremoti storici di magnitudo uguale o superiore a M5.5 attraverso il programma Boxer (Gasperini et al., 1999), che consente di determinare la posizione (coincidente con l'epicentro macrosismico del terremoto), le dimensioni e, nel caso in cui i dati siano sufficienti, la direzione della sorgente sismogenetica.

Per quanto concerne l'area di Forio, la sorgente sismogenetica individuale è denominata Casamicciola Terme ITIS068 ed è associata al terremoto di Casamicciola del 1883 (Me 5.8). Essa è stata dedotta a partire dalle conoscenze geologiche e dal trend strutturale regionale ed è individuata su importanti fratture estensionali con trend NE - SW ed orientazione N 235°, che delimitano il blocco risorgente dell'isola.

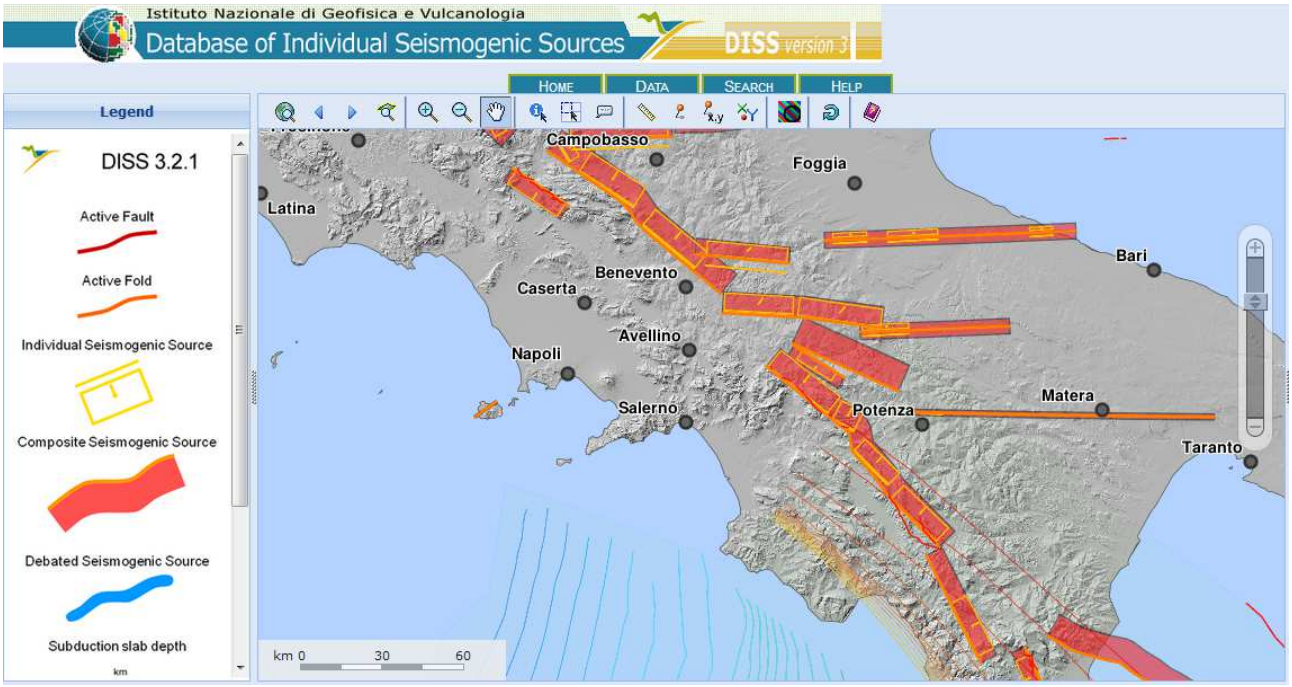



*Figura 5 - L'area oggetto di studio ricade all'interno della zona-sorgente 928 (da DISS – "Database of Individual Seismogenic Sources dell'INGV").*

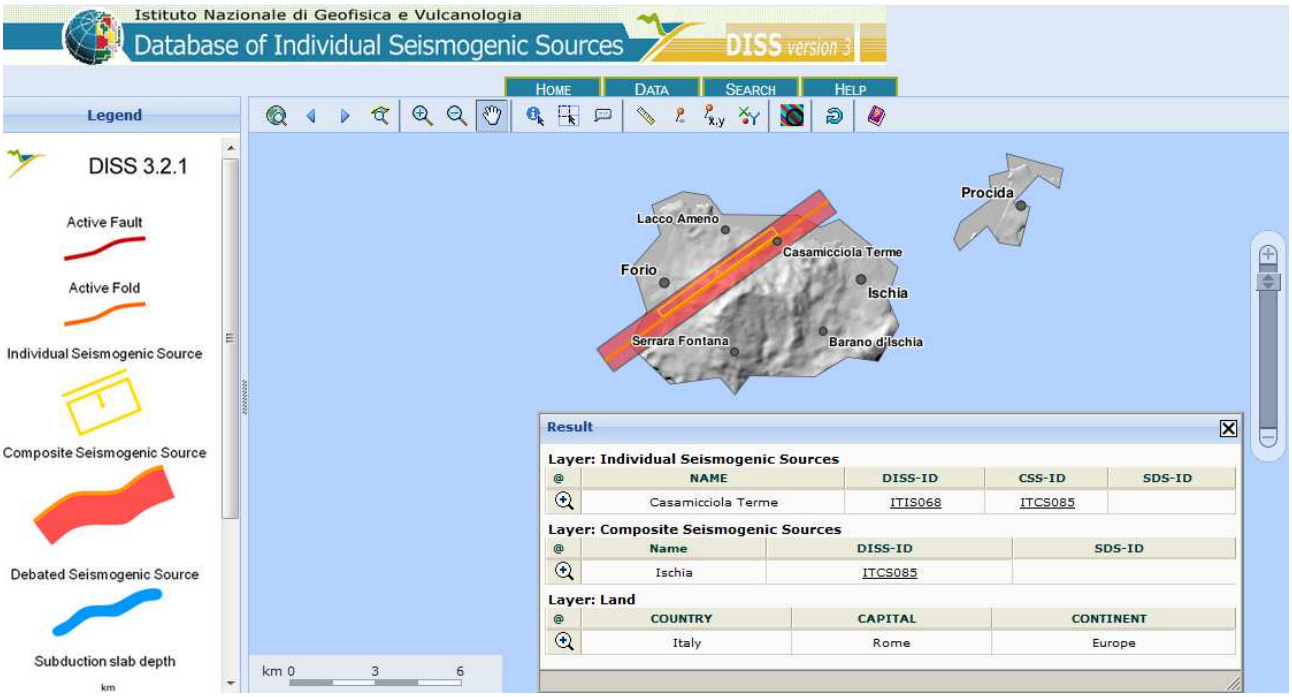



*Figura 6 - Database of Individual Seismogenic Sources dell'INGV riferito all'isola di Ischia da http://diss.rm.ingv.it/dissmap/dissmap.phtml.*

La sorgente ITIS068-Casamicciola Terme è molto superficiale con pendenze molto elevate e si presume responsabile dei più forti terremoti dell'isola di Ischia. La posizione e la geometria di questa sorgente sismica sono conformi con i dati batimetrici ed i profili di sismica a riflessione relativi all'offshore occidentale dell'isola di Ischia (Bruno et al., 2002).

## 2.1 Sismicità storica dell'area di studio

Il territorio Comunale di Forio ubicato a NO del Golfo di Napoli, nella zona più occidentale del complesso vulcanico dei Campi Flegrei, è interessato da un'intensa e frequente sismicità crostale caratterizzata da terremoti di bassa e media magnitudo con ipocentro molto superficiale), caratteristici di aree prettamente di tipo vulcanico. I terremoti più forti che hanno colpito l'isola, infatti, hanno una magnitudo che supera di poco i 4 con un ipocentro che non va oltre i due chilometri di profondità (SSN, 1998), a causa della presenza di camere magmatiche molto superficiali (Piochi, 1995). Le alte temperature superficiali, difatti, non permettono di avere le condizioni reologiche nelle rocce per dare origine a dei terremoti.
Alessio et al. (1996) hanno localizzato gli epicentri dei terremoti maggiori, come quelli di magnitudo molto elevata (M > 6.5) e con intensità massima pari al X - XI grado della scala MCS, e di molti altri eventi tutti concentrati in una stretta fascia orientata E-O, con area di circa 2 km$^2$, sul margine settentrionale del monte Epomeo, tra le località Fango, Maio, Bagni, Gran Sentinella e La Rita. Gli autori, inoltre, osservano verso nord e verso est una brusca riduzione dell'intensità, anche superiore a 3 gradi MCS in meno di un km (Figura 8).

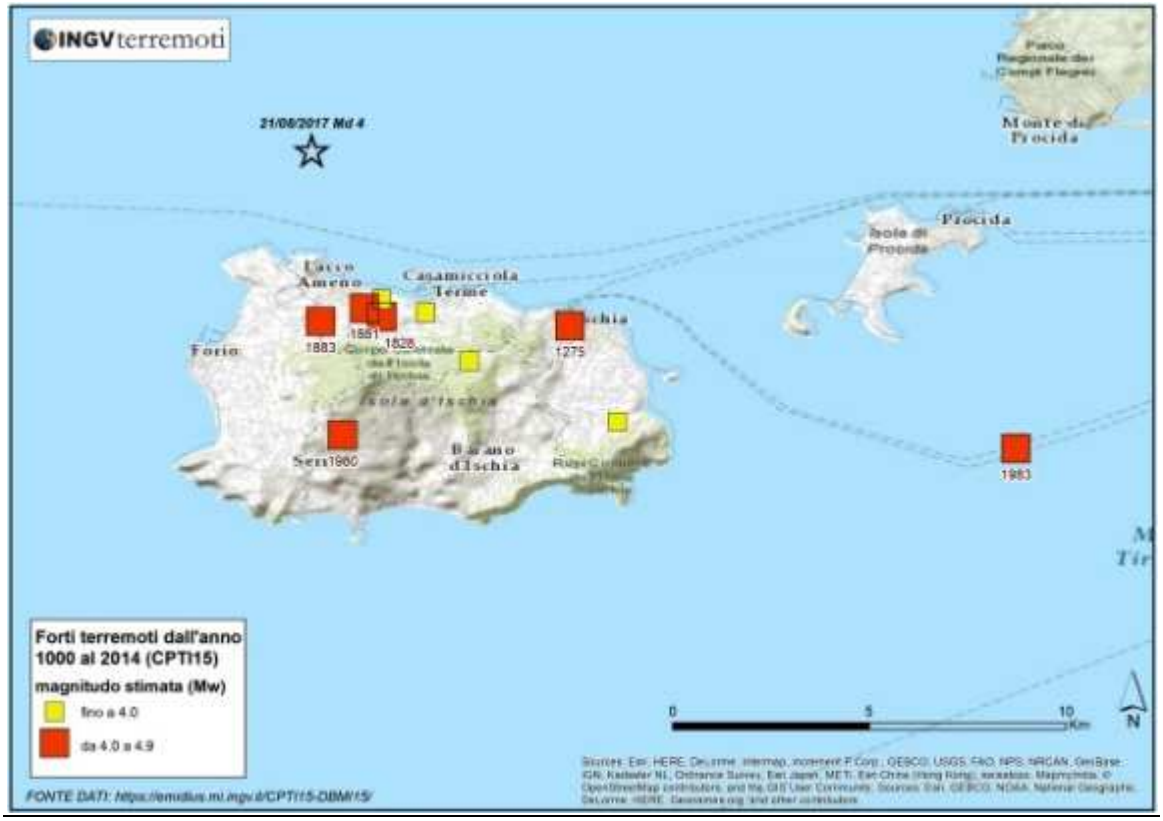



*Figura 7 – Terremoti dell'Isola d'Ischia nel catalogo CPTI15 (Rovida et al., 2016) (Fonte Ingv: https://ingvterremoti.wordpress.com/tag/terremoti-del-passato-ischia/).*

Dalla Relazione Finale si evince che "*le testimonianze più antiche sulla sismicità di Ischia sono riportate, nella letteratura classica, fino al III-IV secolo d.C., tuttavia non ci sono elementi sufficienti per verificare l'attendibilità di certe notizie, spesso legate alla mitologia (Servizio Sismico Nazionale,*

*1998). Non sembra esserci memoria storica di terremoti o eruzioni avvenuti nell'isola prima del 1228 (Mercalli 1881, 1883, 1884; Gatta 1883; Jhonston-Lavis, 1883, 1885), anno in cui una frana, innescata da un terremoto (Bonito, 1691; Mercalli, 1885; Baratta,1901) si staccò dal Monte Epomeo, seppellendo molte abitazioni della vicina Casamicciola e provocando la morte di circa 700 persone (Ryccardo da San Germano: in MURATORI, 1937-38). In tabella 2.5.2 vengono mostrati i principali terremoti che si verificarono nell'isola di Ischia dal 1228 e in figura 2.5.7 gli epicentri, con indicazione dell'intensità macrosismica (MCS).*

*Nel 1301 e 1302 un "terribilissimo terremoto" (Bonito, 1691) provocò il crollo di molti edifici; tuttavia fino al 1700 le informazioni sulla sismicità dell'area sono poche e non molto attendibili. Tra queste, degna di essere riportata è quella relativa al terremoto del 1557 che provocò il crollo di molti edifici, nonché della chiesa parrocchiale, nella località Campagnano, settore orientale dell'isola (Iovene, 1902). Il 1700 e il secolo successivo risultano essere caratterizzati dal verificarsi di un alto numero di terremoti, i quali furono causa di notevoli danni e numerose vittime nell'isola. Tra questi, quello del 23 luglio 1762, secondo il Baratta (1901), provocò notevoli danni a Casamicciola, che fu duramente colpita anche qualche anno dopo, in occasione del terremoto del 1796 (Mercalli, 1884). Quest'ultimo, che fu avvertito solo in forma lieve nelle altre parti dell'isola, provocò a Casamicciola il crollo di molte abitazioni e la morte di 7 persone.*

*Per i circa trent'anni che seguirono l'evento del 1796, si verificarono solo terremoti con epicentri al di fuori dell'isola, senza che questa ne risultasse danneggiata. Nel 1827 si registrarono nell'isola scosse di bassa sismicità, seguite, l'anno successivo da un evento (I0= VIII-IX MCS) che fu percepito in tutta l'isola (Covelli, 1828; De Rossi, 1881a, b, c, d, e, f ; Mercalli, 1881 e 1884; Morgera, 1890; D'Ambra, 1981; Luongo et al., 1987). Tale sisma fu seguito da altri tre eventi (1841, 1863 e 1867, rispettivamente I0 = V-VI, IV e IV-V MCS) che, viene riportato da Molin et al., 2003, provocarono danneggiamenti considerevoli solo presso Casamicciola Terme (Is=VI, VI-V e V rispettivamente per i terremoti del 1841, 1863 e 1867; da DBMI15), mente il DBM15 riporta un Is=V-VI anche per Lacco Ameno, in relazione all'evento del 1841.*"

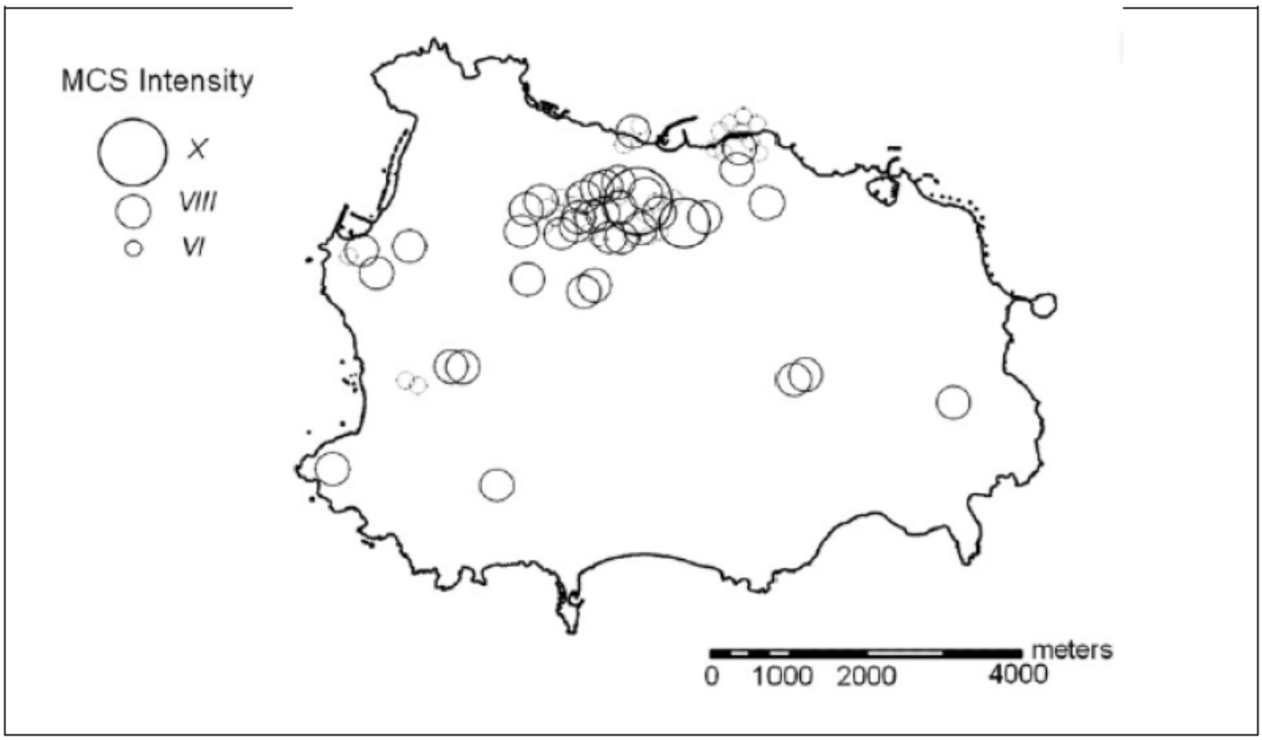



*Figura 8 - Mappa degli epicentri dei terremoti storici dell'isola di Ischia (da Rapolla et al., 2010, modificata da Alessio et al., 1996)*

Gli eventi storici che hanno colpito l'isola di Ischia altamente distruttivi sono stati:

1. Il terremoto di Ischia (02/09/1275; I = VIII - IX MCS );
2. il terremoto di Ischia e Casamicciola (23/07/1762; I = VII MCS);
3. il terremoto di Casamicciola (18/03/1796; I = VIII MCS) ;
4. il terremoto di Casamicciola (02/02/1828; I = IX MCS);
5. il terremoto del 1881;
6. Il terremoto del 1883;

Per Forio il valore massimo di intensità pari al grado 10 è quello osservato in corrispondenza del terremoto locale del 28 luglio 1883. Il grado di intensità 9 è stato osservato in occasione dei terremoti del 02 febbraio 1828 e del 4 marzo 1881.

Il Sisma del 2 febbraio 1828

Dell'evento del 2 febbraio 1828 si hanno notizie precise grazie alla presenza sull'isola del mineralogista e chimico Nicola Covelli che svolgeva studi sulle acque termali. Il sisma avvenne intorno alle ore 10:15 con epicentro nella zona nord - occidentale dell'isola, interessando in maniera più intensa pochi $km^2$. L'evento sismico fu caratterizzato da un valore massimo di intensità epicentrale pari al IX° MCS. Le località più danneggiate furono Casamicciola e la frazione Fango, nel comune di Lacco Ameno, dove collassarono numerosi edifici causando la morte di 29 persone e numerosi feriti. A Casamicciola tutti gli edifici della parte alta dell'abitato furono gravemente danneggiati e molti crollarono. Numerosi danni furono rilevati anche a Lacco Ameno e a Fontana.

Il Sisma del 4 marzo 1881

Il 4 Marzo 1881 alle ore 13.00 circa e per circa 7 secondi un terremoto di intensità massima del IX grado della scala Mercalli (MCS) fece crollare quasi tutte le case della parte superiore di Casamicciola. In particolare, le aree più colpite furono la zona di Piazza Majo, Casa Mennella, Purgatorio, contrada Sassola e Speziaria, Santa Barbara e Selva Pera. Danni minori, ma sempre rilevanti, furono fatti registrare dai rioni Maddalena, Vicolo di Casa Monti, tra piazza Majo e monte Cito, e lungo la strada che porta dalla Piccola alla Grande Sentinella, verso il Calvario (Servizio Sismico Nazionale, 1998).
In totale nel comune di Casamicciola crollarono 290 case. Si contarono 121 morti e 140 feriti (Servizio Sismico Nazionale, 1998). Duramente colpita risultò anche Lacco Ameno, dove il Rione Fango fu quasi completamente distrutto. Crollarono le chiese di S. Giuseppe al Fango, mentre quella del Rosario fu gravemente lesionata. I rioni più danneggiati risultarono quelli di Pannella, Casamonte e Mezzavia (Johnston-Lavis, 1885). Il terremoto fu intensamente avvertito anche in altre località dell'isola, come a Barano e Forio (Servizio Sismico Nazionale, 1998). In Figura 9 viene riportata la distribuzione dell'intensità macrosismica relativa al terremoto del 1881 secondo una ricostruzione di Rapolla et al.,2010. La zona di massimo risentimento (Is=IX) è concentrata in una piccola area, nel settore settentrionale dell'isola, che va da Casamicciola a Lacco Ameno.

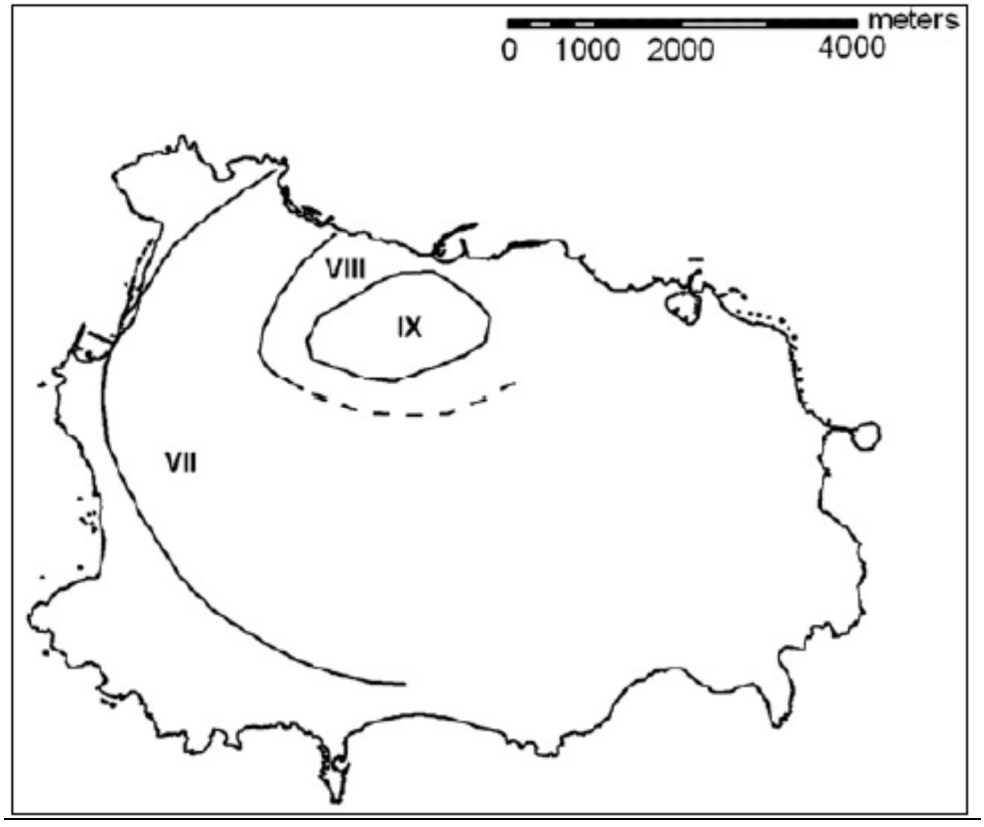



*Figura 9 - Distribuzione dell'intensità macrosismica del terremoto del 1881 (da Rapolla et al., 2010, modificata da Alessio et al., 1996).*

Il Sisma del 28 luglio 1883

Questo sisma rappresenta una delle più grandi catastrofi registrate in Italia in area vulcanica. Portò la morte di 2313 persone e 762 feriti (Cubellis & Luongo, 1998a), su una popolazione che contava all'epoca 4217 abitanti. I danni furono elevatissimi tanto che l'80% del patrimonio edilizio fu distrutto. Fu uno dei terremoti più severi (Luongo et al., 2006), caratterizzato, anche in questo caso, da una magnitudo decisamente non elevata (Mw= 4.26). L'alta intensità macrosismica registrata, pari a X MCS, e localmente XI secondo Cubellis (1985) e Cubellis & Luongo, (1998b), fu collegata alla superficialità della sorgente, posta a 1-1.6 km di profondità (Cubellis, 1985; Cubellis & Luongo, 1998b). Anche in questo caso l'epicentro si individua nel comune di Casamicciola (Figura 10), e la parte alta della città fu completamente distrutta.

Il terremoto provocò seri danni anche presso Lacco Ameno e Forio e in generale rilevanti danni in gran parte dell'isola (Cubellis & Luongo, 1998a). In Figura 11 si evidenzia un significativo riscontro dei danni per il territorio di Forio, con una particolare concentrazione nel centro di Forio e per la loc. Monterone.

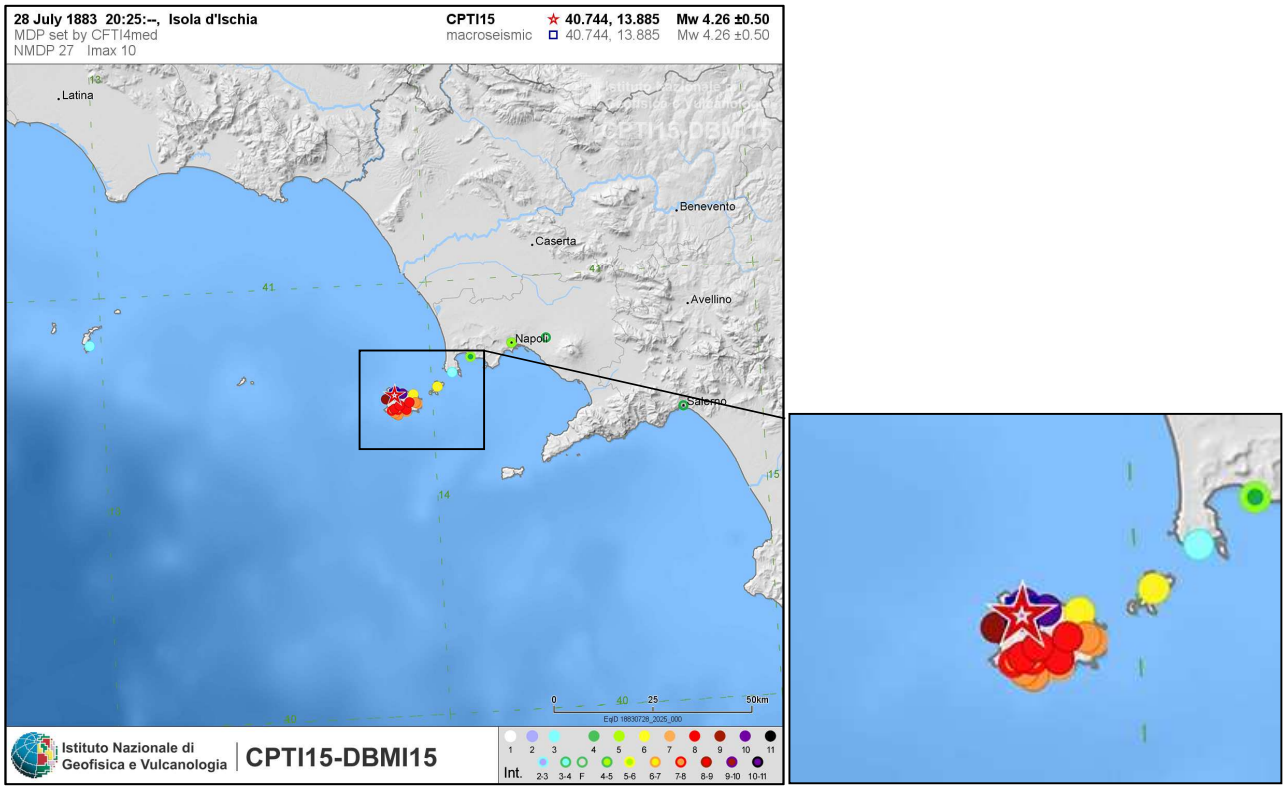



*Figura 10 - Epicentro sisma del 1883 da, https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/eq/18830728_2025_000.*

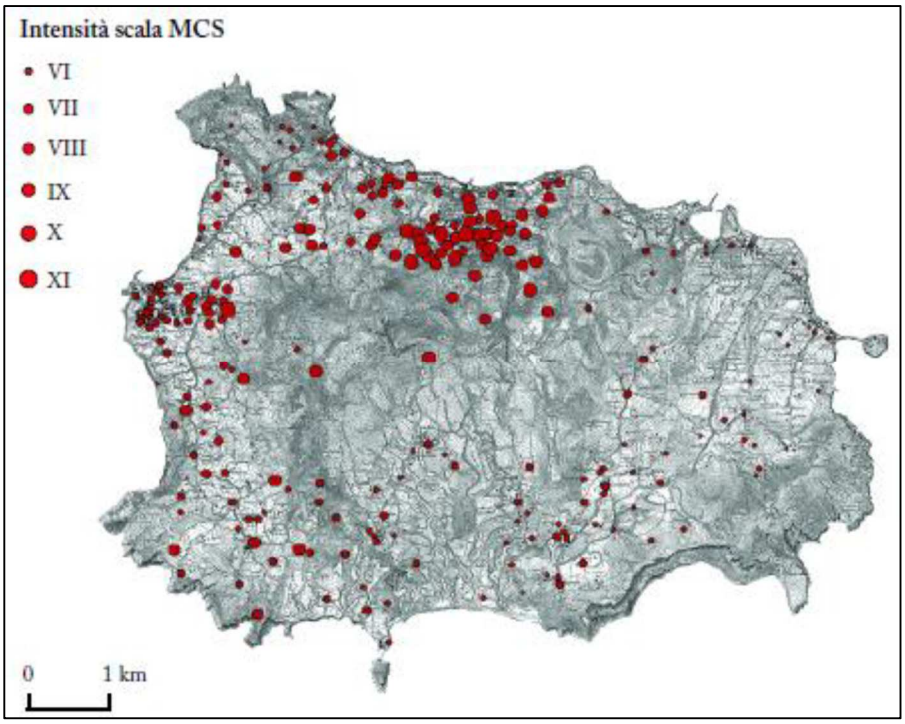



*Figura 11 - Mappa della distribuzione dei danni del terremoto di Casamicciola del 1883, ricavata dalle fonti storiche (Da Luongo et al., 2006).*

Dall'elenco del Catalogo Parametrico Terremoti Italiani (CPTI) disponibile online all'indirizzo web https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15, al comune di Forio sono attribuiti 11 eventi di riferimento a partire dall'anno 1000 (Tabella 1).

*Tabella 1- Elenco Catalogo parametrico Terremoti per il comune di Forio da https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15.*

| Intensity | Year Mo Da Ho Mi Se | Epicentral area | NMDP | Io | Mw |
|---|---|---|---|---|---|
| 5-6 | 1828 02 02 09 15 | Isola d'Ischia | 10 | 8-9 | 4.01 |
| F | 1841 03 06 12 | Isola d'Ischia | 3 | 5-6 | 3.25 |
| F | 1863 01 30 11 30 | Isola d'Ischia | 8 | 4 | 2.87 |
| F | 1880 07 24 05 40 | Isola di Ventotene | 5 | 6 | 4.63 |
| 6 | 1881 03 04 12 15 | Isola d'Ischia | 17 | 9 | 4.14 |
| 9 | 1883 07 28 20 25 | Isola d'Ischia | 27 | 9-10 | 4.26 |
| NF | 1892 11 16 02 10 | Isola di Ponza | 17 | 5-6 | 4.40 |
| 5 | 1930 07 23 00 08 | Irpinia | 547 | 10 | 6.67 |
| 5 | 1980 04 23 11 11 2 | Isola d'Ischia | 4 | 5 | 4.37 |
| 3 | 1990 05 05 07 21 2 | Potentino | 1375 | | 5.77 |
| NF | 1998 03 26 16 26 1 | Appennino umbro-marchigiano | 409 | | 5.2 |
| 5-6 | 1828 02 02 09 15 | Isola d'Ischia | 10 | 8-9 | 4.01 |

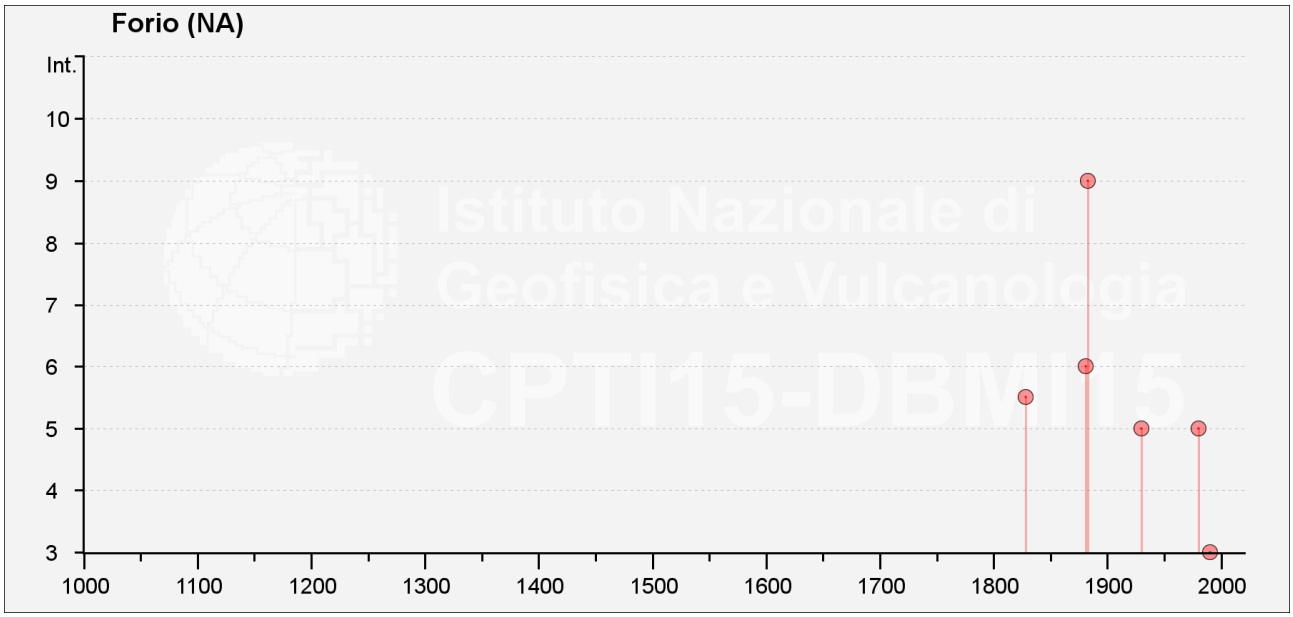



*Figura 12 - Storia sismica di Forio da https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/.*

## 2.2 Sismicità recente dell'area di studio

La Relazione Finale del gruppo di lavoro Gruppo MS riporta che: *"L'isola di 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 (Mw=4.3; catalogo CPTI15 -Rovida et al., 2016). Negli ultimi anni la sismicità si è mantenuta su livelli decisamente bassi sia come frequenza che come energia. In Figura 13 sono riportate le localizzazioni degli eventi registrati dal 1999".*

Un cenno particolare merita il caso del terremoto più recente, quello del 23 aprile 1980, che nel Catalogo CPTI15 presenta un valore di magnitudo relativamente elevato per quest'area (Mw 4.37); questo valore deriva da un dato strumentale (Mw 4.6, ISC) (Fonte Ingv: https://ingvterremoti.wordpress.com/tag/terremoti-del-passato-ischia/).

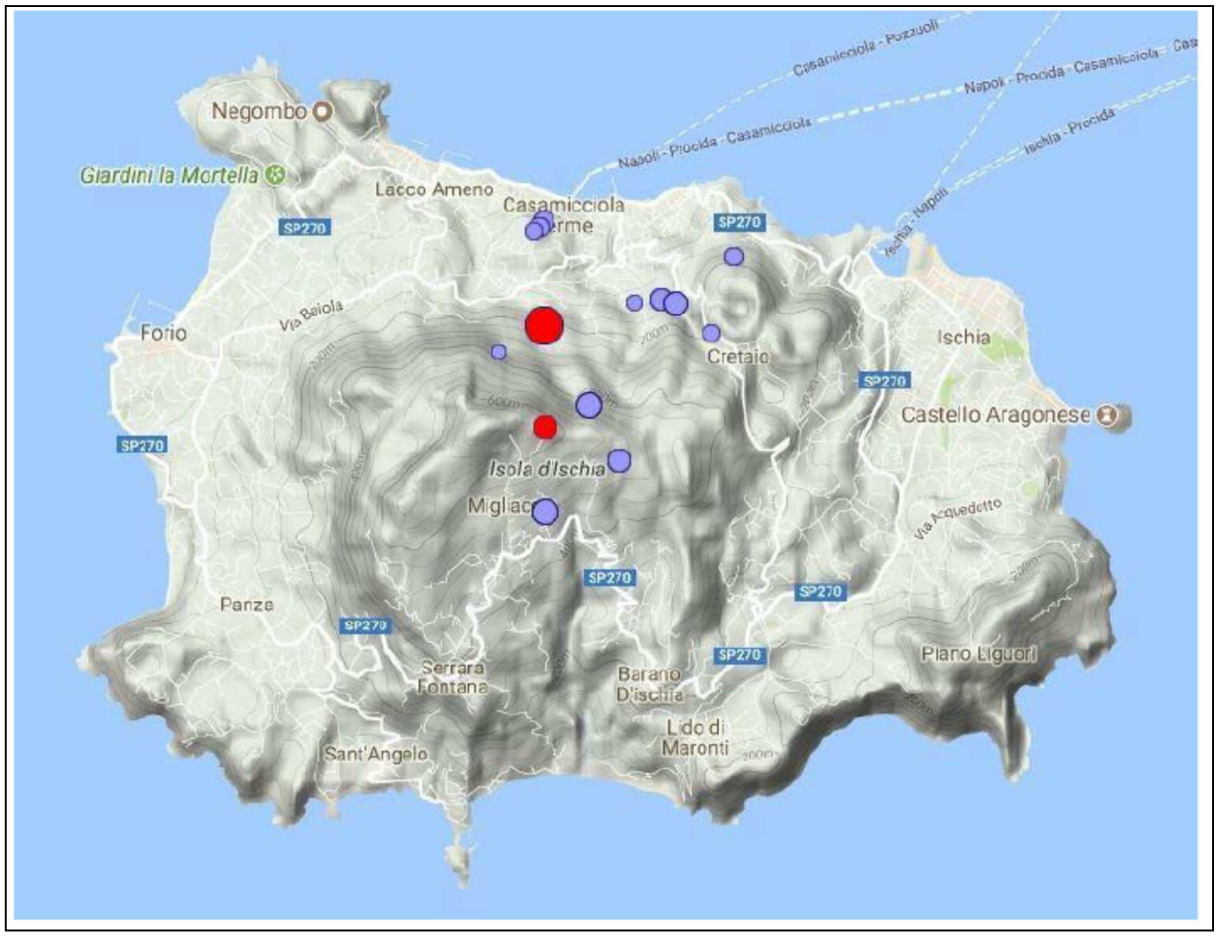



*Figura 13 - Localizzazioni dei terremoti ad Ischia nel periodo 1999-2017. In rosso gli eventi del 21/08/2017 (Md=4.0) e del 23/08/2017 (Md=1.9).*

"Nel grafico di Figura 14 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."

*"Altra caratteristica dei terremoti che vengono localizzati sull'isola d'Ischia è la superficialità degli ipocentri. Ciò è dovuto alla presenza di strutture sismogenetiche a bassa profondità che bordano l'horst vulcano-tettonico del Monte 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.*
*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."*

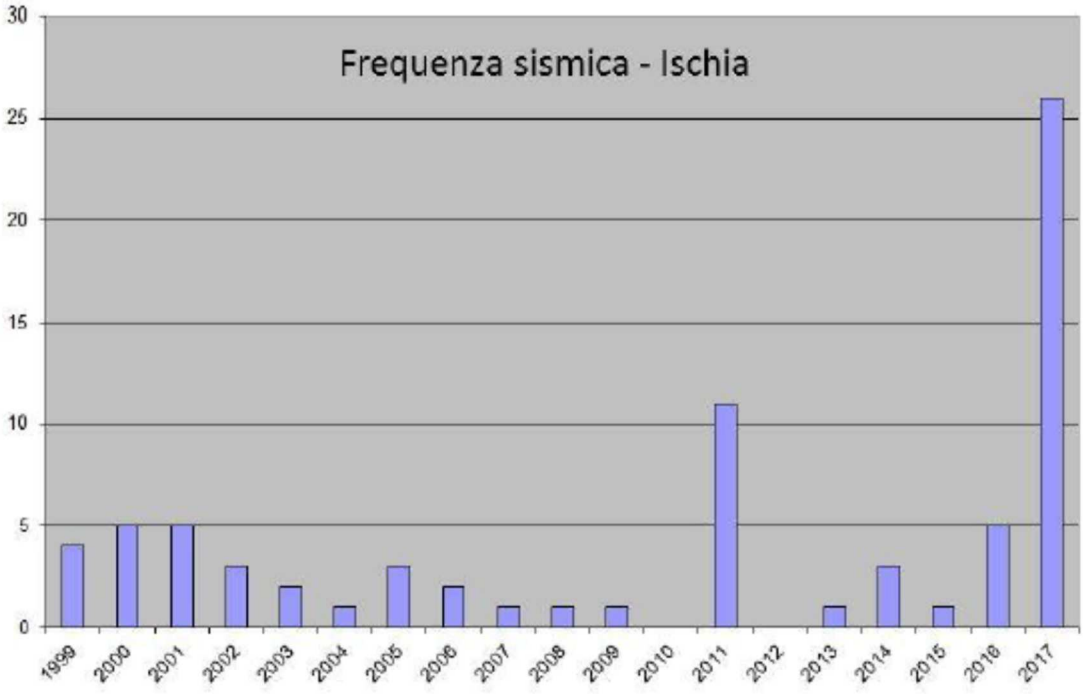



*Figura 14 - Frequenza sismica dei terremoti registrati ad Ischia dal 1999 al 2017 dalla Relazione Finale gruppo di lavoro Centro MS.*

**Il Sisma del 21 agosto 2017 (Fonti INGV e Relazione Finale gruppo MS)**

Il terremoto di magnitudo $M_L$ 3.6±0.2, $M_D$ 4.0±0.3 avvenuto il 21 agosto 2017 alle ore 20:57 italiane è stato localizzato alle seguenti coordinate (latitudine 40.74°, longitudine 13.90°) ad una profondità di circa 2 km, un evento quindi molto superficiale e non raro in corrispondenza di aree vulcaniche.

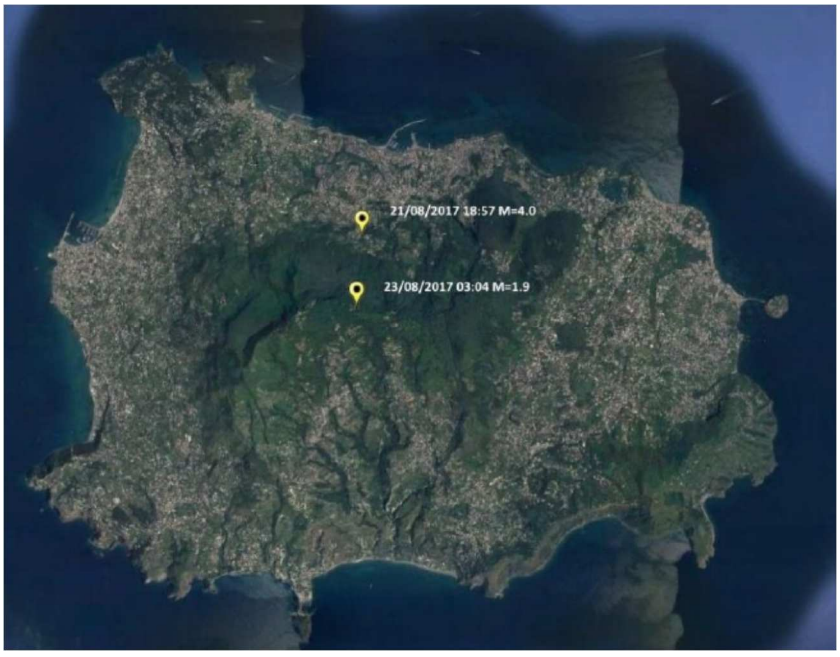



*Figura 15 - Ubicazione del mainshock del 21 agosto (Md=4.0) e della replica del 23 agosto (Md=1.9) da Relazione Finale Gruppo MS.*

L'evento è stato registrato sull'Isola dalla stazione accelerometrica "IOCA" ubicata nelle adiacenze dell'Osservatorio Geofisico situato in località Grande Sentinella, nel comune di Casamicciola Terme con valori di picco osservati pari a:

*Tabella 2 - Valori di picco dell'evento del 21 Agosto registrato alla stazione di IOCA.*

| | PGA (cm/s$^2$) | PGV (cm/s) | PGD (cm) |
|---|---|---|---|
| IOCA (Comp. E) | 272 | 18 | 2.8 |
| IOCA (Comp. N) | 191 | 11 | 1.7 |
| IOCA (Comp. Z) | 267 | 12 | 1.4 |

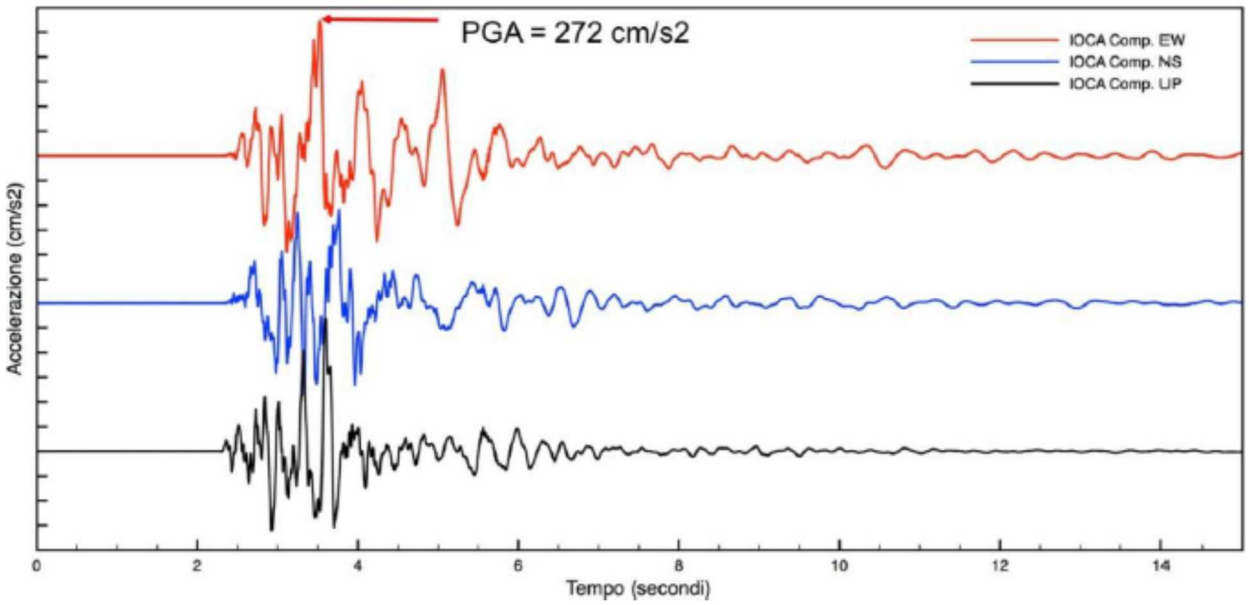



*Figura 16 - Forme d'onda in accelerazione dell'evento del 21 agosto 2017 registrato alla stazione accelerometrica di IOCA.*

Dalla Figura 16 si evidenzia la breve durata dell'evento, la cui fase di massima energia si esaurisce nell'arco di circa 5 secondi.

I danni all'edificato sono stati ingenti nell'area di Casamicciola e Lacco Ameno dove si sono verificati anche crolli parziali e totali come riportato dal "Report del Gruppo QUEST" dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) che ha effettuato il rilievo macrosismico.

Il Gruppo QUEST ha attribuito a Casamicciola Terme, Fango (Lacco Ameno) e Marina di Casamicciola rispettivamente un'intensità EMS [European Macroseismic Scale (Grünthal, 1998)] pari a VIII, VII e VI, mentre tutte le altre località dell'Isola sono state valutate tra EMS IV e V (QUEST, 2017).

In particolare per il territorio comunale di Forio si rilevano le seguenti intensità assegnate alle diverse località:

*Tabella 3 - Intensità macrosismiche rilevate nelle località di Forio*

| Località | Comune | Int. EMS |
|---|---|---|
| Cretaio | Forio | 5 |
| Monterone | Forio | 5 |
| Forio | Forio | 4-5 |
| Panza | Forio | 4 |
| Cuotto | Forio | 3-4 |

## 2.3 Pericolosità sismica di base

La pericolosità sismica, intesa in senso probabilistico, e lo scuotimento del suolo atteso in un dato sito con una certa probabilità di eccedenza in un dato intervallo di tempo, ovvero la probabilità che un certo valore di scuotimento si verifichi in un dato intervallo di tempo.
Questo tipo di stima si basa sulla definizione di una serie di elementi di input (quali catalogo dei terremoti, zone sorgente, relazione di attenuazione del moto del suolo, ecc.) e dei parametri di riferimento (per esempio: scuotimento in accelerazione o spostamento, tipo di suolo, finestra temporale, ecc.).
Con l'Ordinanza PCM 3274/2003 (GU n.108 dell'8 maggio 2003) si e avviato in Italia un processo per la stima della pericolosità sismica secondo dati, metodi, approcci aggiornati e condivisi e utilizzati a livello internazionale. Per la prima volta si è delineato un percorso per il quale venivano definite le procedure da seguire, il tipo di prodotti da rilasciare e l'applicazione dei risultati. Un documento di tale tipo avrebbe infatti costituito la base per l'aggiornamento dell'assegnazione dei comuni alle zone sismiche. L'INGV in collaborazione con esperti delle Università italiane e di altri centri di ricerca ha realizzato la Mappa di Pericolosità Sismica 2004 (MPS04) che descrive la pericolosità sismica attraverso il parametro dell'accelerazione massima attesa con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni su suolo rigido e pianeggiante. Dopo l'approvazione da parte della Commissione Grandi Rischi del Dipartimento della Protezione Civile nella seduta del 6 aprile 2004, la mappa MPS04 e diventata ufficialmente la mappa di riferimento per il territorio nazionale con l'emanazione dell'Ordinanza PCM 3519/2006 (G.U. n.105 dell'11 maggio 2006) (Figura 17 - Figura 18).
La legislazione nazionale prevede che l'aggiornamento delle zone sismiche spetti alle singole Regioni e Province Autonome, sulla base di valori di accelerazione proposti dalla mappa di pericolosità sismica MPS04 per individuare le soglie che definiscono il limite tra una zona sismica e un'altra.
Con Delibera di Giunta Regionale n. 5447 del 07.11.2002, La Regione Campania approva l'"Aggiornamento della classificazione sismica dei Comuni della Regione Campania" formulata sulla base dei criteri generali e delle risultanze del Gruppo di Lavoro costituito dal Servizio Sismico Nazionale, dall'Istituto Nazionale di Geofisica e dal Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, in base alla risoluzione approvata dalla Commissione Nazionale di Previsione e Prevenzione dei Grandi

Rischi nella seduta del 23 aprile 1997. La stessa prevede che nei comuni classificati sismici si applicano le disposizioni di cui alla legge 2 febbraio 1974 n. 64 e successive modificazioni ed integrazioni e le norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche di cui al Decreto Ministeriale 16 gennaio 1996 pubblicato nella Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 29 del 5 febbraio 1996 e le relative istruzioni applicative (circolare Ministero dei Lavori Pubblici n. 65/AA.GG. del 10 aprile 1997).

Il Comune di Forio, già classificato sismico nel 1981, vede confermare la sua classe di pericolosità in seconda classe sismica (media sismicità) con valori di $a_g$ maggiori di 0.25g.

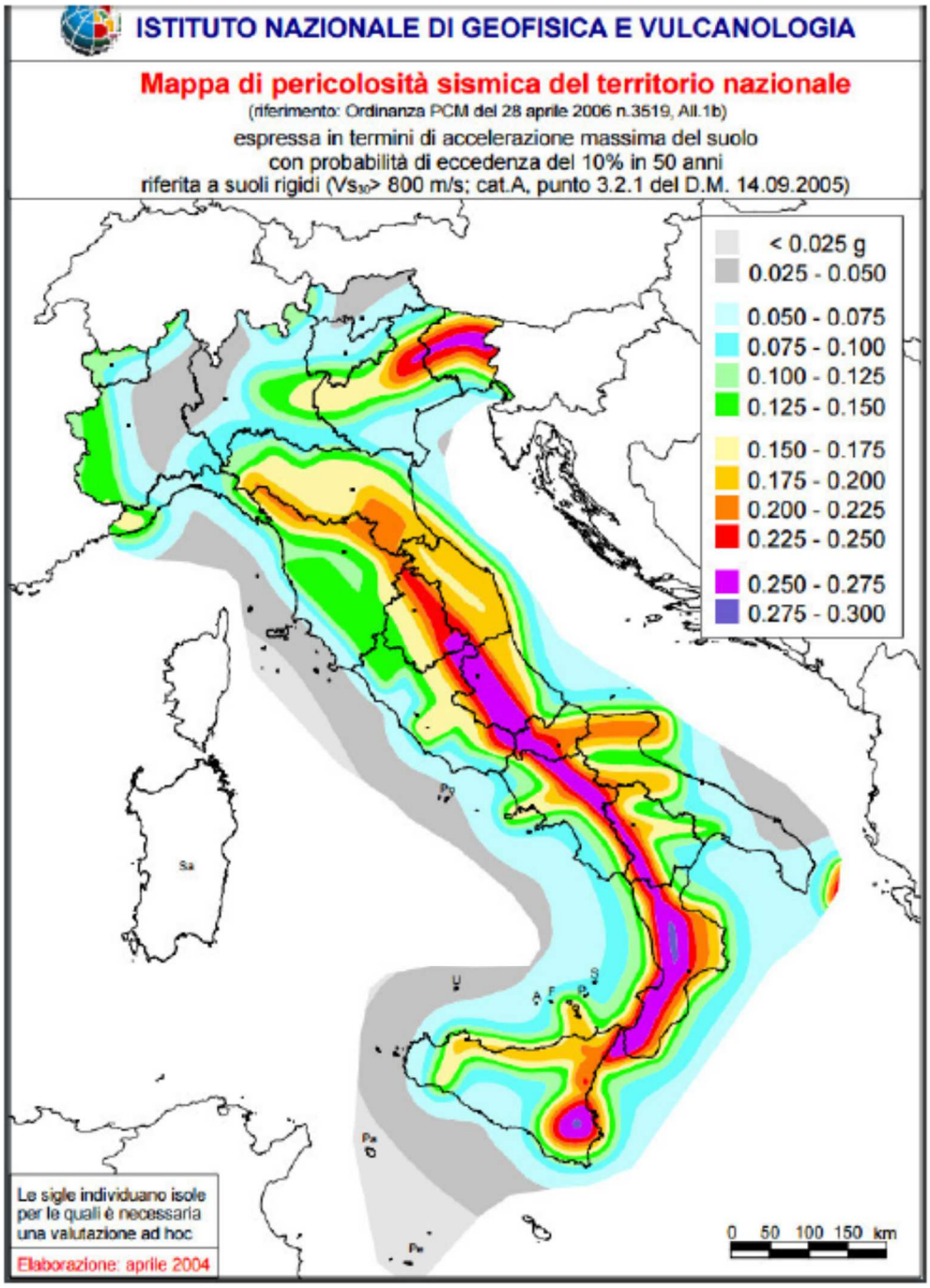



*Figura 17 - Mappa di Pericolosità Sismica del Territorio Nazionale in riferimento all'OPCM del 28 aprile 2006 n. 3519 (Istituto Nazionale Geofisica e Vulcanologia).*

Successivamente, nell'ambito del progetto INGV-DPC S1 (2005-2007), sono state rilasciate una serie di mappe di pericolosità sismica per diverse probabilità di eccedenza in 50 anni, basate sullo stesso impianto metodologico e sugli stessi dati di input di MPS04. Inoltre sono state prodotte mappe per gli stessi periodi di ritorno anche in termini di accelerazioni spettrali. Per ogni punto della griglia di calcolo (che ha una densità di 20 punti per grado, circa un punto ogni 5 km) sono oltre 2200 i parametri che ne descrivono la pericolosità sismica.

Per ogni singolo nodo della griglia di riferimento e possibile richiedere il dettaglio in forma grafica e tabellare dell'analisi di disaggregazione della relativa $a(_g)$, utilizzando lo strumento grafico di disaggregazione. Per lo stesso nodo si otterranno anche i valori medi di M-D-ε (magnitudo, distanza, epsilon).

La disaggregazione (o deaggregazione) della pericolosità sismica (McGuire, 1995; Bazzurro and Cornell, 1999) è un'operazione che consente di valutare i contributi di diverse sorgenti sismiche alla pericolosità di un sito. La forma più comune di disaggregazione e quella bidimensionale in magnitudo e distanza (M-R) che permette di definire il contributo di sorgenti sismogeniche a distanza R capaci di generare terremoti di magnitudo M. Espresso in altri termini il processo di disaggregazione in M-R fornisce il terremoto che domina lo scenario di pericolosità (terremoto di scenario) inteso come l'evento di magnitudo M a distanza R dal sito oggetto di studio che contribuisce maggiormente alla pericolosità sismica del sito stesso. Analogamente alla disaggregazione in M-R e possibile definire la disaggregazione tridimensionale in M-R-ε dove ε rappresenta il numero di deviazioni standard per cui lo scuotimento (logaritmico) devia dal valore mediano predetto da una data legge di attenuazione dati M ed R.

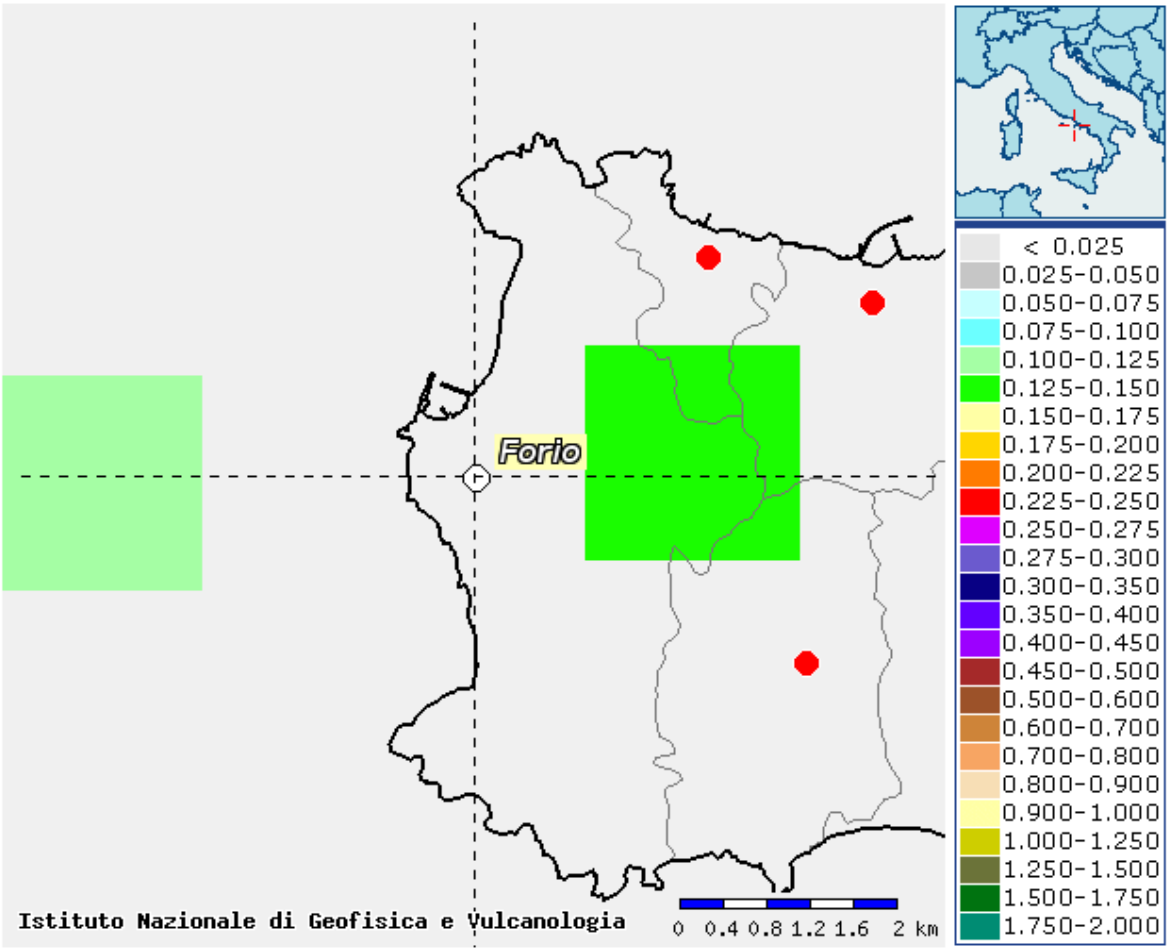



*Figura 18 - Mappa interattiva di pericolosità sismica redatta a cura dell'INGV di Milano da http://esse1-gis.mi.ingv.it/- Punti della griglia riferiti a: parametro dello scuotimento $a_g$; probabilità in 50 anni 10%; percentile 50.*

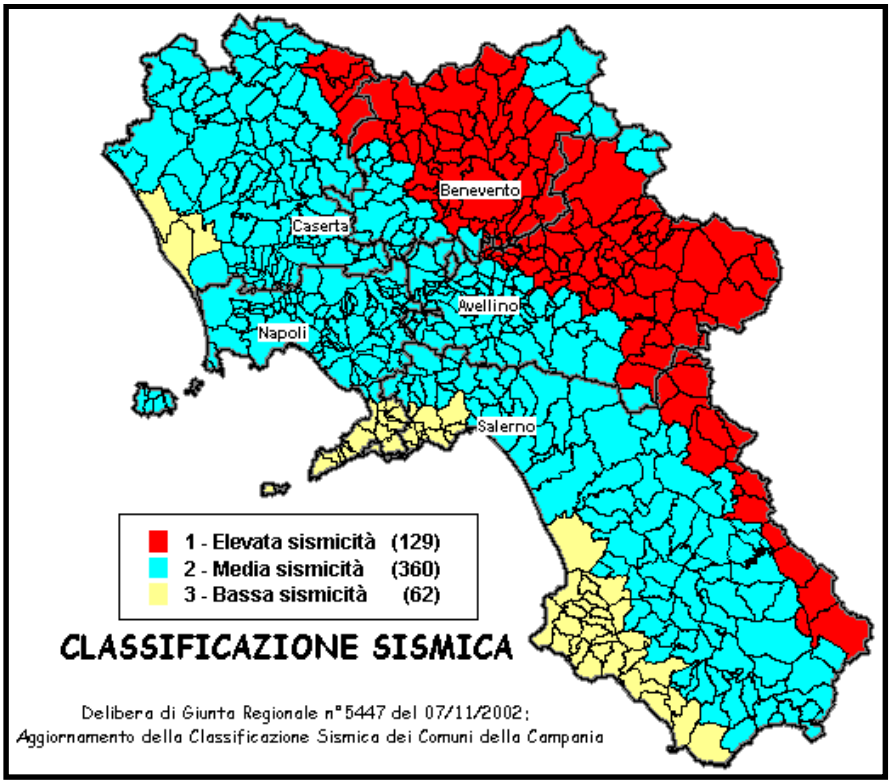



*Figura 19 - Classificazione sismica dei comuni della Campania.*

Nell'allegato 7 dell'OPCM n. 3907 del 13 novembre 2010 (''contributi per gli interventi di prevenzione del rischio sismico''), sono indicate le $a_g$, per un tempo di ritorno di 475 anni in condizioni di sottosuolo rigido e pianeggiante, corrispondente al valore più elevato di $a_g$ tra i centri e nuclei ISTAT del Comune (v. all.2 comma 2) e per Forio corrisponde a 0,15452g (Tabella 4).

*Tabella 4- Allegato 7 dell'Opcm n. 3907 del 13 novembre 2010*

| Codice Istat | Provincia | Comune | Ag | Data di prima classificazione | Periodo di declassificazione |
|---|---|---|---|---|---|
| 15063031 | 063 | Forio | 0.144831 | 1981 | |

La pericolosità sismica di base è stata valutata inoltre sulla base dei risultati del progetto S1 dell'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) con centroide sul comune di Forio (Tabella 5, Figura 20).

**Spettri di risposta di riferimento**

La notevole mole di dati a disposizione ha reso possibile la definizione di norme tecniche nelle quali l'azione sismica di riferimento per la progettazione e valutata punto per punto e non più solo per 4 zone sismiche, cioè secondo solo 4 spettri di risposta elastica. Infatti il Consiglio Superiore dei Lavori pubblici ha emanato nuove Norme Tecniche delle Costruzioni (NTC08) con il D.M. del 14 gennaio

2008 (G.U. n.29 del 04/02/2008) nelle quali la definizione dell'azione sismica di riferimento si basa sui dati rilasciati da INGV e dal Progetto S1.

Infatti le attuali Norme Tecniche per le Costruzioni hanno modificato il ruolo che la classificazione sismica aveva ai fini progettuali: per ciascuna zona, e quindi territorio comunale, precedentemente veniva fornito un valore di accelerazione di picco e quindi di spettro di risposta elastico da utilizzare per il calcolo delle azioni sismiche. Dal 1 luglio 2009 con l'entrata in vigore delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008, per ogni costruzione ci si deve riferire ad una accelerazione di riferimento "propria" individuata sulla base delle coordinate geografiche dell'area di progetto e in funzione della vita nominale dell'opera. Un valore di pericolosità di base, dunque, definito per ogni punto del territorio nazionale, su una maglia quadrata di 5 km di lato, indipendentemente dai confini amministrativi comunali.

Ai fini delle NTC le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento nel periodo di riferimento PVR, a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

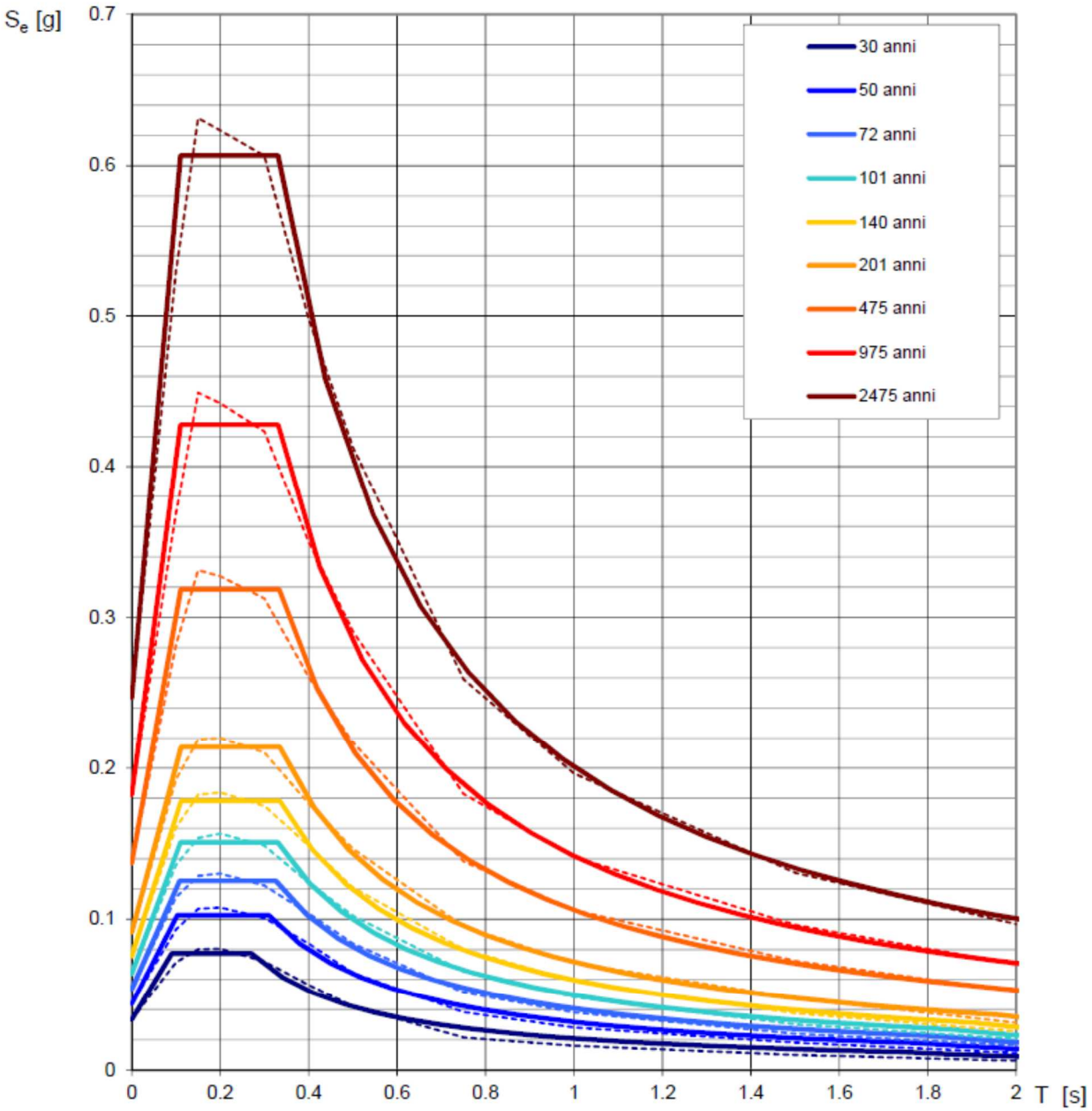
- $a_g$ accelerazione orizzontale massima al sito;
- $F_o$ valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- $T^*_C$ periodo di inizio del tratto a velocita costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Una delle novità delle NTC e appunto la stima della pericolosità sismica basata su una griglia di 10751 punti, ove viene fornita la terna di valori $a_g$, $F_o$ e $T^*_C$ per nove distinti periodi di ritorno $T_R$.

Di seguito si riportano gli spettri ricavati e i relativi valori di riferimento:

*Tabella 5 - Prospetto dei valori dei parametri $a_g$, $F_0$, $T_C$ per i periodi di ritorno $T_R$ di riferimento. $a_g$ = accelerazione orizzontale massima al sito; $F_0$ = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale; $T_C$ = periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.*

| $T_R$ [anni] | $a_g$ [g] | $F_o$ [-] | $T_C^*$ [s] |
|---|---|---|---|
| 30 | 0.033 | 2.309 | 0.271 |
| 50 | 0.044 | 2.348 | 0.310 |
| 72 | 0.054 | 2.337 | 0.325 |
| 101 | 0.064 | 2.355 | 0.330 |
| 140 | 0.076 | 2.351 | 0.335 |
| 201 | 0.091 | 2.341 | 0.335 |
| 475 | 0.137 | 2.321 | 0.333 |
| 975 | 0.182 | 2.347 | 0.331 |
| 2475 | 0.247 | 2.458 | 0.331 |




NOTA:
Con linea continua si rappresentano gli spettri di Normativa, con linea tratteggiata gli spettri del progetto S1-INGV da cui sono derivati.

*Figura 20 - Spettri di risposta elastici per i periodi di ritorno Tr di riferimento per categoria di suolo A.*

**Faglie sismogenetiche**

Il database delle Sorgenti Sismogenetiche Individuali (DISS http://diss.rm.ingv.it/diss/), dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia fornisce le sorgenti sismogenetiche dell'Isola d'Ischia suddivise in sorgenti individuali, sorgenti areali e sorgenti macrosismiche (Vedi Figura 21).

Una sorgente sismogenetica individuale è una struttura geologica in grado di generare, ripetitivamente ed esclusivamente, il terremoto massimo ad essa associato oltre a possedere una consistenza interna in termini di lunghezza, larghezza, entità della dislocazione per evento e magnitudo.

Una sorgente sismica areale rappresenta un insieme di strutture geologiche aventi tra loro caratteristiche geometriche e cinematiche comuni, quali profondità, direzione, immersione, verso e pendenza, ed è potenzialmente in grado di generare terremoti di magnitudo maggiore di 5.5.

Le sorgenti macrosismiche sono state ottenute, nella suddetta banca dati, sulla base dei campi macrosismici dei terremoti storici di magnitudo uguale o superiore a 5.5 attraverso il programma Boxer (Gasperini et al., 1999), che consente di determinare la posizione (coincidente con l'epicentro macrosismico del terremoto), le dimensioni e, nel caso in cui i dati siano sufficienti, la direzione della sorgente sismogenetica.

L'area di interesse del presente studio ricade all'interno della sorgente composita ITCS085 Ischia (vedi http://diss.rm.ingv.it) ubicata a nord ovest dell'isola d'Ischia con direzione SW-NE, in cui ricade la sorgente sismogenetica individuale, che si presume responsabile dei più forti terremoti storici dell'isola di Ischia, denominata ITIS068 - Casamicciola Terme associata al terremoto di Casamicciola Terme del 28 luglio 1883. Le caratteristiche principali derivate da dati geologici, geodetici e sismologici di letteratura e riportate nel DISS sono le seguenti:

- ✓ Profondità minima: 0,0 km
- ✓ Profondità massima: 4,0 km
- ✓ Direzione: 230-250°
- ✓ Immersione: 80°-90°
- ✓ Inclinazione: 260-280°
- ✓ Scivolamento annuo: 0,1-1,0 mm
- ✓ Magnitudo massima: 5,4 (derivata dalla magnitudo massima associata alle sorgenti individuali).

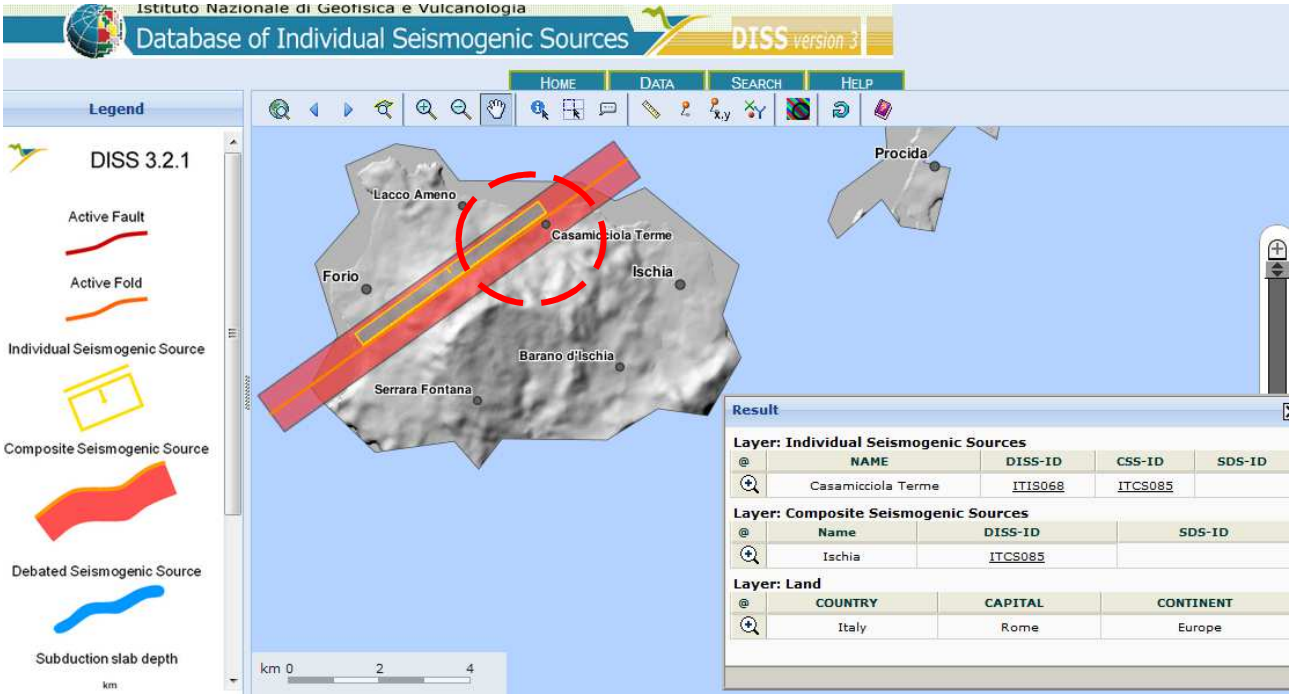



*Figura 21 - Sorgenti sismogenetiche individuali e areali dell'area in esame da [http://diss.rm.ingv.it/dissGM/](http://diss.rm.ingv.it/dissGM/).*

# 3. Assetto geologico e geomorfologico dell'area

## 3.1 Inquadramento geologico

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 sedimentarie, che derivano dall'accumulo e dalla cementazione di frammenti di rocce preesistenti, smembrate dai processi erosive.

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).

Il territorio comunale di Forio è sito sull'isola d'Ischia che costituisce un apparato vulcanico ubicato a NO del Golfo di Napoli (Figura 21). Esso si erge per circa 900 m dal fondo del mare nella zona più occidentale del complesso vulcanico dei Campi Flegrei e la sua complessa evoluzione vulcanologica e strutturale è stata ricostruita da parte di numerosi Autori (Rittmann & Gottini, 1980; Chiesa et al., 1987; Vezzoli, 1988; Orsi et al., 1991; Zuppetta et al., 1993; Luongo et al., 1995; Del Prete & Mele, 1999, Santacroce et al., 2003) che hanno portato a una dettagliata definizione dell'evoluzione del sistema magmatico dell'isola.

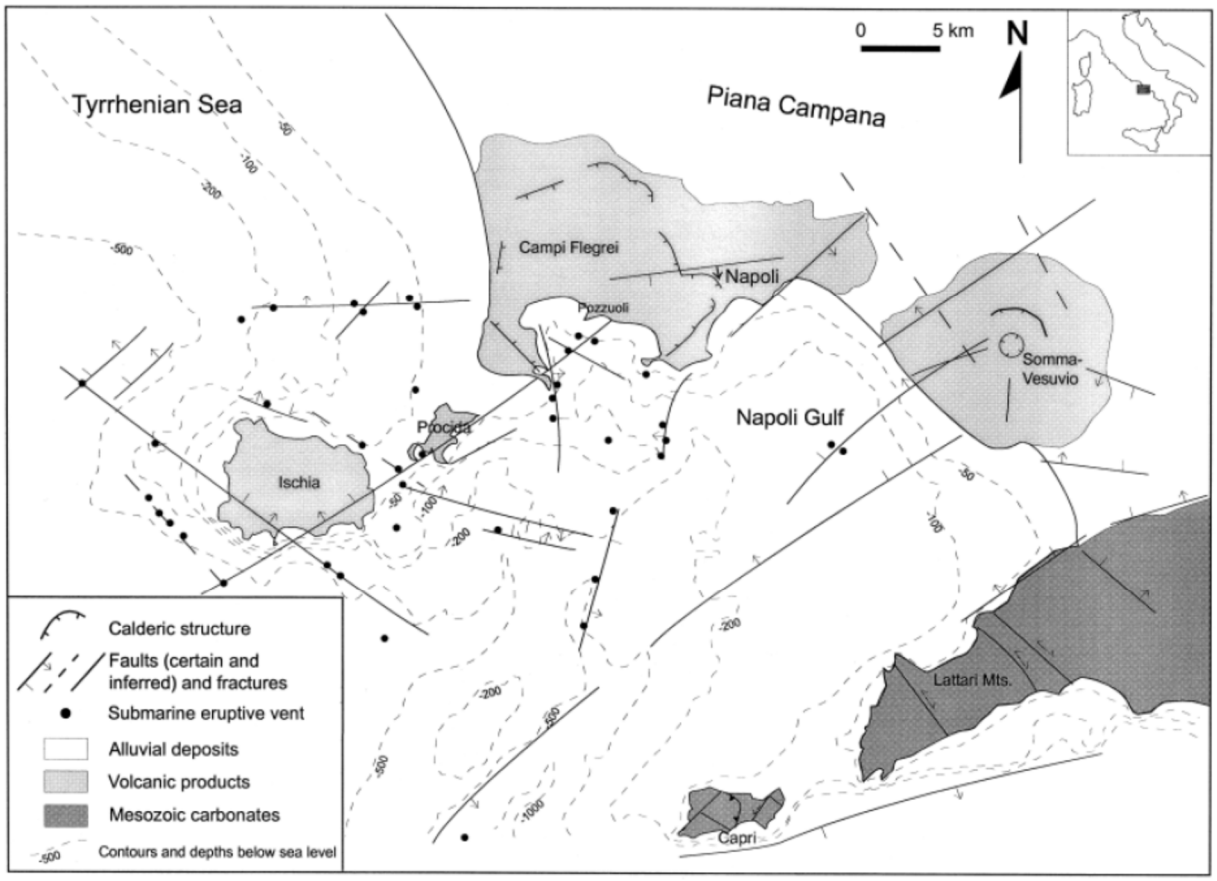



*Figura 22 - Schema strutturale dell'area vulcanica napoletana (Acocella & Funicello ,1999)*

La storia geologica recente dell'isola ha rivelato una intensa dinamica e una stretta connessione tra il sistema magmatico, gli elementi strutturali, il sistema geotermico, l'attività sismica e l'evoluzione geomorfologica. Eventi eruttivi, terremoti, frane, modificazioni dei campi fumarolici ed eventi bradisismici hanno marcato la storia evolutiva del complesso vulcanico, con dirette implicazioni per le comunità residenti sull'isola, nel corso dei secoli e l'evento del 28 luglio del 1883, che causò la distruzione di Casamicciola Terme, è sicuramente il più noto, sia per la sua intensità che per la ricchezza di testimonianze, ma è solo uno dei terremoti che ha interessato l'area. Altri eventi sismici, meno documentati ma con intensità locale anche superiore al IX grado MCS, colpirono l'isola di Ischia nei secoli precedenti.

**Contesto Sismotettonico**

La storia vulcanica dell'isola è strettamente connessa alla tettonica distensiva che dal Tortoniano ha generato il bacino tirrenico e i relativi bacini presenti lungo la costa occidentale della penisola (come la Piana Campana) e che ha progressivamente interessato la Catena Appenninica (Ippolito et al., 1973; D'Argenio et al., 1973; Chiesa & Vezzoli, 1983).

L'evoluzione pliocenico-quaternaria del margine tirrenico dell'Italia centro-meridionale è caratterizzata da un processo estensionale responsabile della formazione del bacino tirrenico. La tettonica distensiva si è manifestata in particolare attraverso faglie normali a direzione NW-SE e subordinatamente da sistemi di trasferimento costituiti da faglie normali e trascorrenti, con direzione NE-SW (Funicello et al., 1976; Mariani & Prato, 1988, Faccenna et al., 1994). In tale contesto la Piana Campana rappresenta una depressione strutturale pliocenico-quaternaria con direzione NW-SE (Carrara et al., 1973, Finetti & Morelli, 1974. Fedi & Rapolla, 1987). L'attività vulcanica ha accompagnato i processi estensionali durante il Pliocene e il Quaternario, essendo controllata dai sistemi di faglie e fratture con direzione NE-SW, e subordinatamente da quelli NW-SE. Questi sistemi hanno costituito una via preferenziale per la risalita di fluidi magmatici verso la superficie (Carrara et al., 1973; Funicello et al., 1976; Faccenna et al., 1994). In particolare, le faglie hanno guidato l'instaurarsi dell'attività vulcanica recente su alcune direzioni preferenziali nella Piana Campana e, in particolare, nell'isola d'Ischia (Zuppetta et alii,1993). Qui l'inizio dell'attività vulcanica viene collocato circa a 150.000 anni fa (Cassignol & Gillot, 1982) continuando, con diversi periodi di quiescenza, fino al 1302 d.C, quando una colata lavica fuoriuscì dal centro eruttivo dell'Arso (Figura 23)

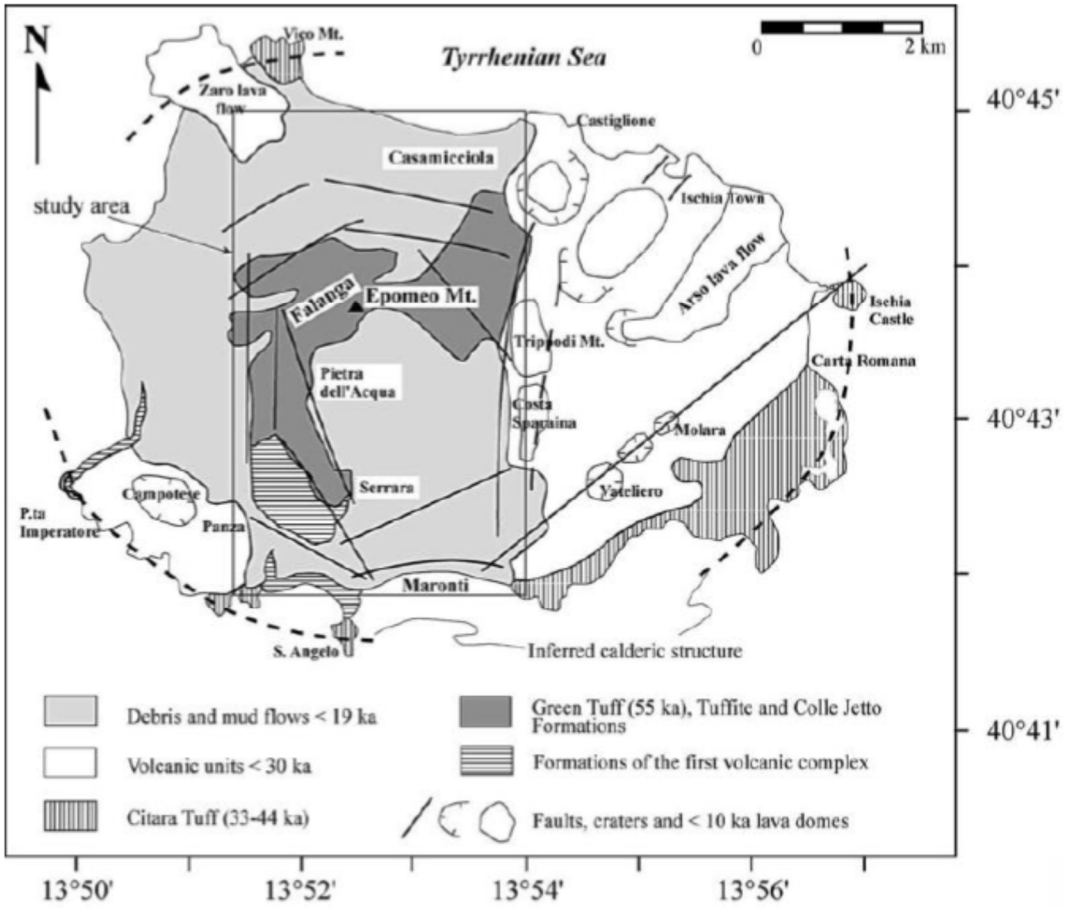



*Figura 23 - Schema geologico dell'isola di Ischia (Molin 2003, modificato da Gillot et al., 1982).*

L'evoluzione geo-vulcanologica è riportata schematicamente in Figura 24, in cui le rocce affioranti sono state raggruppate secondo una suddivisione in periodi di attività proposta dagli studi condotti da Vezzoli (1988). Secondo Vezzoli (1988) l'attività vulcanica dell'isola può essere suddivisa in due cicli: il primo ciclo, più antico, comprende le prime due fasi di attività vulcanica (età compresa tra > 150.000 anni e 75.000 anni); il secondo ciclo, comprendente le tre successive fasi di attività, è caratterizzato dal sollevamento vulcano-tettonico del Monte Epomeo.

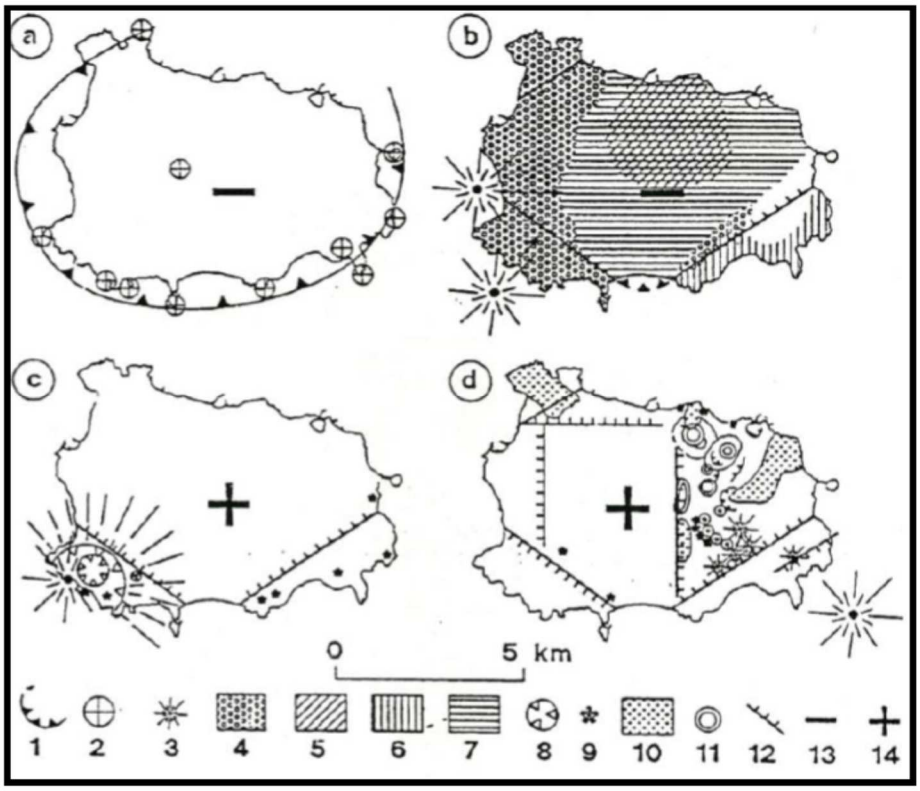



*Figura 24 - Evoluzione vulcanologica di Ischia: (a) periodo tra 150.000 e 75.000 anni; (b) tra 55.000 e 33.000 anni; (c) 28.500 e 18.000 anni; (d) ultimi 10.000 anni. 1) orlo di caldera; 2) Duomo; 3) Cono piroclastico; 4) Deposito piroclastico di caduta; 5) Sedimenti marini; 6) Flusso piroclastico del Tufo Verde del Monte Epomeo; 7) Ignimbrite del Tufo Verde del Monte Epomeo; 8) Crateri eruttivi; 9) Cono di scorie e pomici; 10) Colata di lava; 11) Duomi e lava recenti; 12) Faglie attive; 13) Settore in subsidenza; 14) Settore in sollevamento (da Bortoluzzi, 1995).*

**FASI DELLE ATTIVITÀ ERUTTIVE (Figura 25)**

**PRIMA FASE DI ATTIVITÀ VULCANICA: > 150.000 anni fa.** I prodotti vulcanici più antichi risalgono a circa 150 ka ed affiorano principalmente lungo la linea di costa, nel settore sud est. Questi appartengono ad un complesso vulcanico attualmente in parte eroso e ricoperto dai prodotti dell'attività più recente (Vezzoli, 1988). Si tratta di strati di piroclastiti pomicee con intercalazioni di scorie che costituiscono la Formazione di Carrozza. Tali depositi formano la struttura interna di Monte Vezzi e sono affioranti nella falesia lungo la Spiaggia di San Pancrazio.
I prodotti successivi a quelli della Formazione di Carrozza costituiscono la Formazione Inferiore della Scarrupata di Barano ed affiorano lungo la Scarrupata stessa e a Punta di San Pancrazio: si tratta di tufi e brecce di flusso piroclastico. La maggior parte di questi prodotti è stata erosa dall'azione del mare o è stata sepolta dai prodotti delle eruzioni successive.

**SECONDA FASE DI ATTIVITÀ VULCANICA: 150.000 – 75.000 anni fa.** La seconda fase, di età compresa tra i 150.000 e i 75.000 anni fa, è testimoniata principalmente lungo i bordi meridionali dell'isola. Questa fase è costituita quasi esclusivamente dalla messa in posto di duomi lavici. Questi affiorano nelle porzioni sud-orientale, sudoccidentale e settentrionale dell'isola, delineando la forma

di un'ipotetica caldera formatasi intorno ai 150.000 anni (Chiesa et al., 1987; Poli et al., 1989). Tra i 75.000 e 55.000 anni fa, il vulcanismo ischitiano ha conosciuto un periodo di stasi che è testimoniato sia dalla mancanza di prodotti vulcanici, sia da paesaggi erosionali localmente marcati da formazioni sedimentarie. Si tratta di depositi di versante localizzati a Monte Vico e Punta Imperatore, o alluvionali, presenti nella Scarrupata di Barano e Porticello.

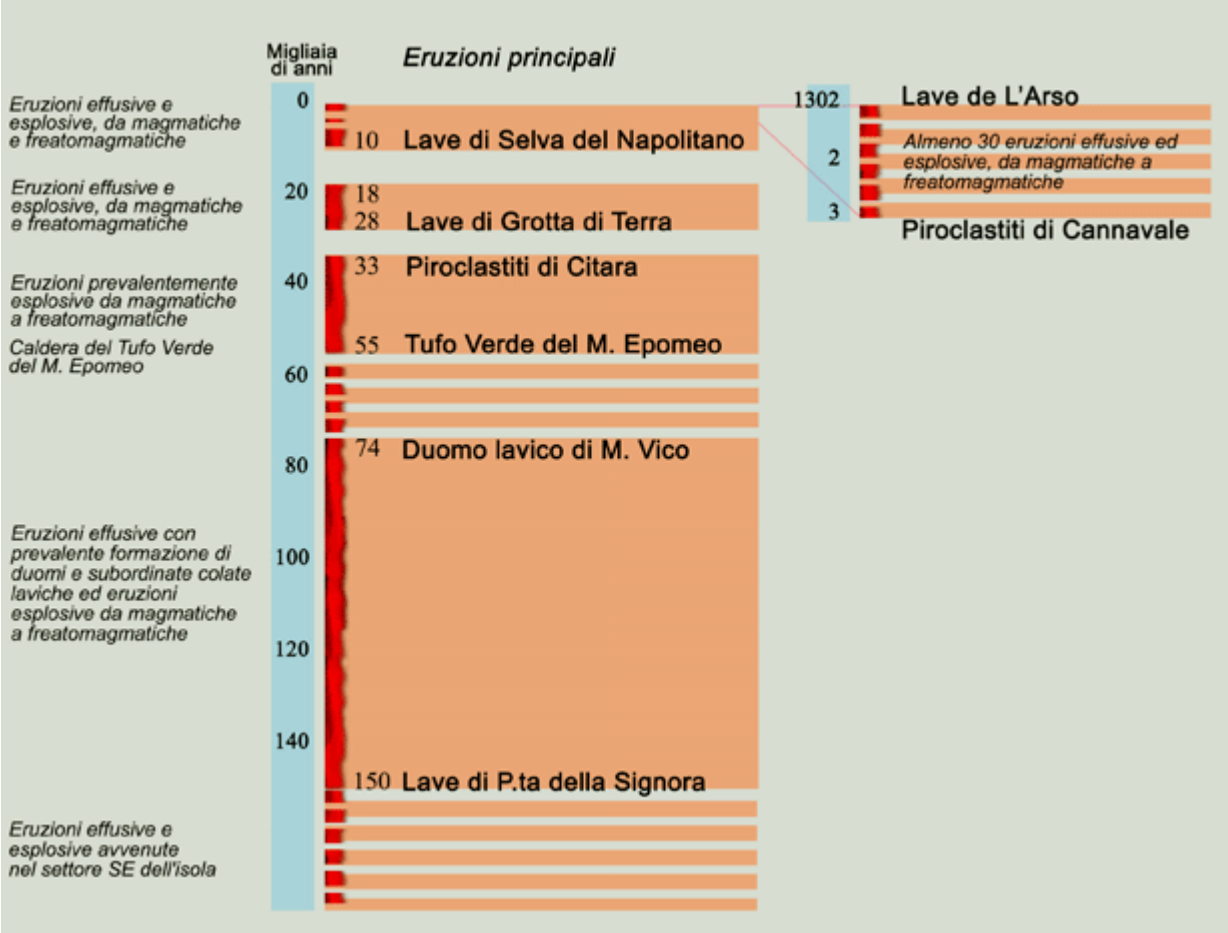



*Figura 25 - Fasi dell'attività vulcanica di Ischia.*

**III FASE DI ATTIVITÀ VULCANICA: 55.000 – 33.000 anni fa.** La terza fase, di età compresa tra 55.000 e 33.000 anni fa, vede la ripresa dell'attività vulcanica caratterizzata dall'eruzione, fortemente esplosiva del Tufo Verde dell'Epomeo, responsabile della formazione di una caldera che, verosimilmente, avrebbe occupato la zona che attualmente ospita la parte centrale dell'Isola. Questo evento determinò la formazione di flussi piroclastici che andarono a colmare parzialmente la depressione calderica, in precedenza invasa dal mare, e a ricoprire in parte le aree allora emerse. Nel complesso, questa fase eruttiva è caratterizzata da prodotti costituiti da banchi di lapilli e brecce pomicee di caduta con alla base una colata di lava intercalata, che vengono raggruppati nella Formazione del Pignatiello, in quella del Tufo Verde di Monte Epomeo e nella Formazione di Citara. Segue un breve periodo di quiescenza, durante il quale la geografia dell'isola andava profondamente modificandosi a seguito dell'emersione della sua porzione centrale, dovuta all'instaurarsi di un

fenomeno di sollevamento dal fondo della caldera (risorgenza) successiva all'eruzione del Tufo Verde del Monte Epomeo.

**IV FASE DI ATTIVITÀ VULCANICA: 28.500 – 18.000 anni fa.** La quarta fase di attività vulcanica, relativamente a breve distanza dalla precedente, si concentra nel settore sud-occidentale dell'isola (nell'area di Panza). Verso est, furono attivi altri centri eruttivi ubicati in corrispondenza degli Scogli di Sant' Anna e nell' area di Monte di Vezzi (i centri di Monte Cotto, Monte di Vezzi e Grotta di Terra). L'inizio di questa fase è segnato dall'eruzione del magma trachibasaltico di Grotta del Mavone, a sud di Punta Imperatore, lungo la costa sudoccidentale dell'isola, circa 28.000 anni fa.

**V FASE DI ATTIVITÀ VULCANICA: 10.000 anni fa – 1.302 d.C.** Numerose eruzioni, datate a partire da circa 10.000 anni fa, segnano la fine di un periodo di quiescenza e l'inizio di una fase di attività che si è protratta fino all'eruzione dell'Arso avvenuta nel 1302 d.C. I prodotti di questa fase vulcanica sono successivi alle formazioni marine tardo-pleistoceniche e si intercalano ai potenti ed estesi cumuli di frana che rimaneggiano i terreni marini.
L'attività vulcanica di questa fase si è sviluppata soprattutto nel settore orientale dell'isola, corrispondente all'area del graben di Ischia (Vezzoli, 1988). Nell'area, oltre alle strutture regionali ad andamento anti-appenninico, è possibile riconoscere tutta una serie di faglie associate al sollevamento del blocco risorgente del Monte Epomeo (Figura 26)

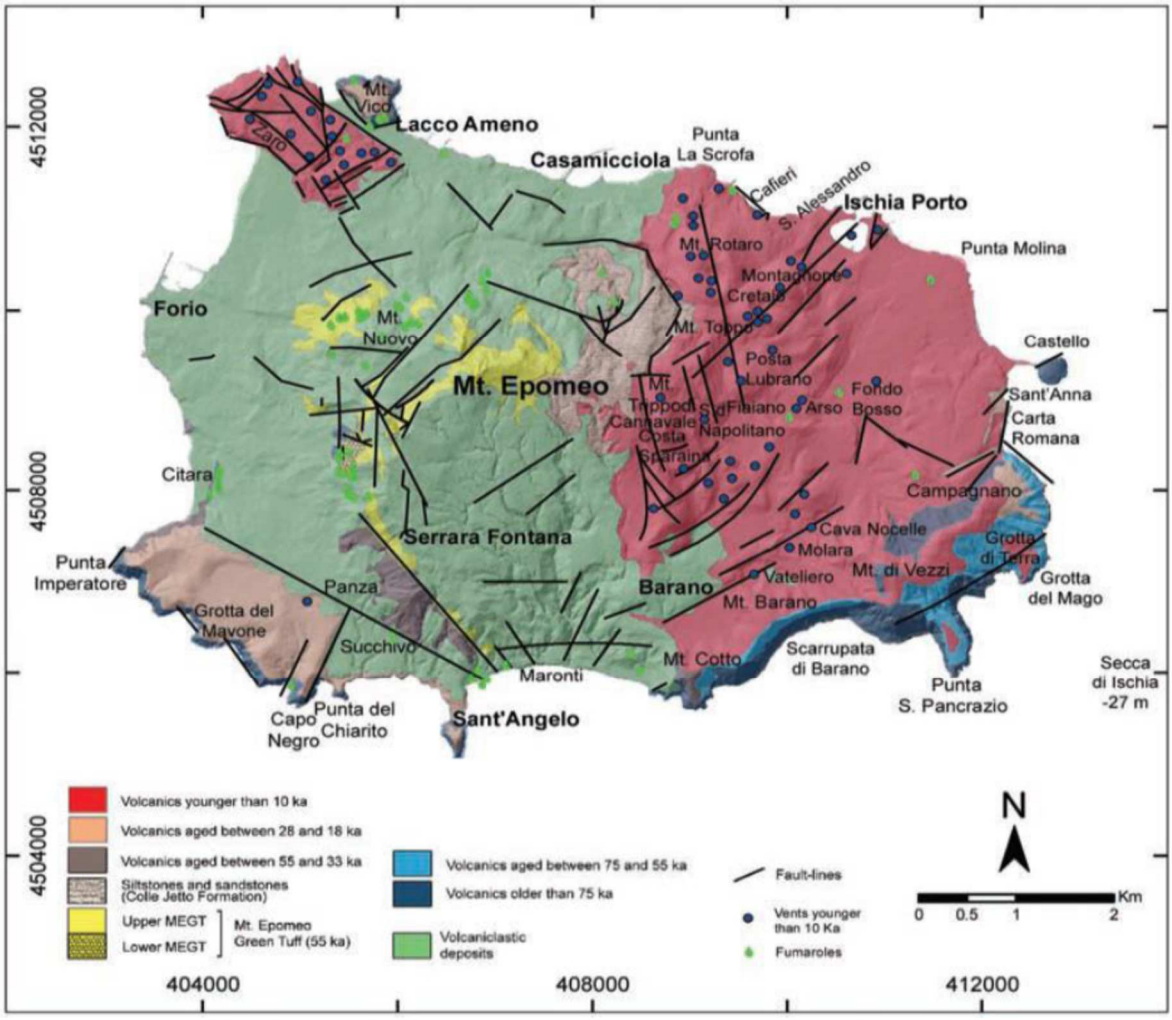



*Figura 26 - Schema Geologico dell'Isola d'Ischia. Si nota al cento dell'isola, il complesso sistema di faglie che borda il blocco risorgente dell'Epomeo (de Vita et al., 2010).*

Questo fenomeno (illustrato in Figura 27), iniziato durante la III fase di attività vulcanica, a seguito dell'intrusione di nuovo magma nel sistema, ha causato il sollevamento del blocco centrale dell'isola di almeno 900 m negli ultimi 30.000 anni (Orsi et al.,1991). Molin et al., (2003) suggeriscono che l'innalzamento asimmetrico del blocco sia in gran parte controllato dall'attività di faglie inverse ad alto angolo, nel settore più esterno della zona di risorgenza, nel settore periferico settentrionale del blocco (a). Queste faglie sono direttamente indotte dal sollevamento differenziale (Acocella et al., 2000). L'attività sismica si verifica lungo la parte più superficiale di queste faglie innescando variazioni nell'attività idrotermale (b). Le faglie normali si sviluppano nella parte più interna della periferia settentrionale del blocco. La loro formazione, secondo tali autori, è legata allo scorrimento gravitazionale dei volumi delimitati dalle faglie inverse (c).

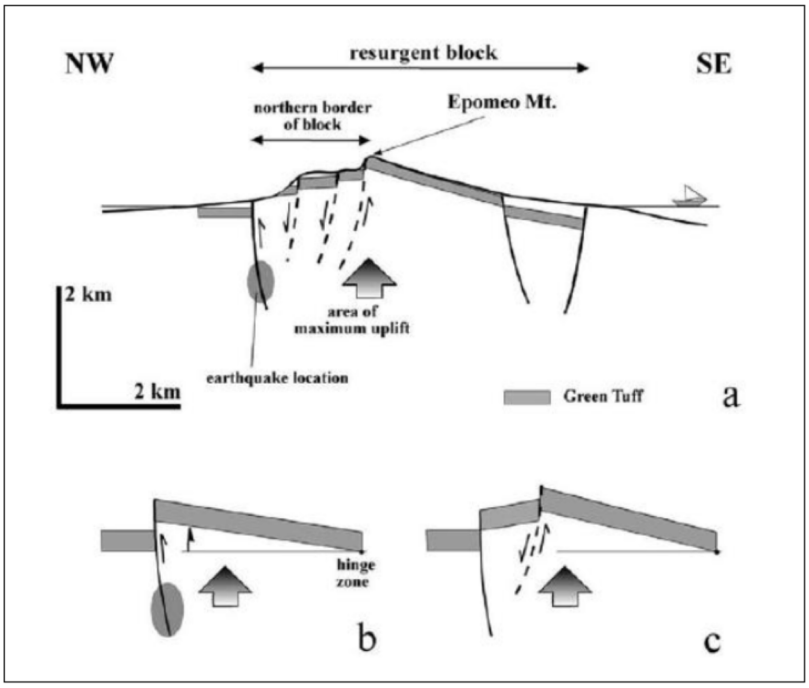



*Figura 27 - Fenomeno della risorgenza. a) configurazione attuale; b) attività sismica innescata da alcune faglie inverse; c) collasso del blocco sollevato a causa del proseguire dell'attività delle faglie inverse con contemporanea formazione di faglie estensionali, ritenute responsabili della attuale sismicità. Interpretazione proposta da (Molin et al. 2003).*

Sintetizzando, l'assetto strutturale dell'isola risulta essere caratterizzato da una caldera periferica e dall'alto strutturale e morfologico centrale del Monte Epomeo, interpretato come un Horst vulcano-tettonico (Rittmann, 1930; Fusi et al., 1990; Gillot, 1982; Vezzoli, 1988), risultato del precedentemente descritto fenomeno di risorgenza (Orsi et al., 1991).
Chiesa e Vezzoli (1983) suddividono strutturalmente e morfologicamente l'area di Ischia in quattro aree (Figura 28)

1) L'Horst del Monte Epomeo (787 m s.l.m.) è delimitato da faglie con direzione N-S ed E-O. Il rilievo del Monte Epomeo è costituito principalmente dall'enorme espandimento ignimbritico del Tufo Verde datato intorno a 55.000 anni fa.
2) Il Graben di Ischia è rappresentato dall'area depressa del settore nord-orientale dell'Isola ed è limitato ad ovest dalla faglia marginale del Monte Epomeo e a sud-est dalla faglia Barano-Carta Romana ad andamento antiappenninico (NE-SW). Litologicamente è costituito da prodotti sia lavici che piroclastici dei centri vulcanici recenti (Figura 29).
3) Il blocco stabile del Monte Torone-Vezzi-Cotto, che costituisce la dorsale sud-orientale dell'isola, è limitato a nord-ovest dalla faglia Barano-Carta Romana ad andamento NE-SW e a Sud-Est dal mare. Questo blocco rappresenterebbe la testimonianza del complesso vulcanico antico, interessato alla fine della sua attività, intorno ai 130.000 anni fa, dal collasso calderico in corrispondenza dell'attuale zona centrale dell'isola.
4) Le aree depresse marginali dell'Horst del Monte Epomeo, sono costituite da una serie di accumuli di frane di crollo e di colata di materiali del Tufo Verde che hanno ricoperto gran

parte dell'area occidentale e meridionale, a seguito del denudamento dei fianchi più ripidi dell'Horst.

Attualmente il versante meridionale del blocco strutturale del Monte Epomeo e il settore NO dell'isola sono caratterizzati da frane ascrivibili sia all'instabilità gravitativa dovuta alle forti pendenze dei versanti, sia allo scuotimento relativo ai forti terremoti che hanno colpito l'isola in tempi storici (Vezzoli, 1988; Alessio et al., 1996).

I forti terremoti storici, tra cui Casamicciola del 1881 e 1883 (Cubellis, 1985; Servizio Sismico Nazionale, 1998), sono correlati alle faglie a direzione E-O e ONO-ESE che bordano il settore più settentrionale dell'isola; la deformazione recente è localizzata nella fascia settentrionale che va da Casamicciola alle propaggini settentrionali del Monte Epomeo (Alessio et al., 1996).

L'orientazione del sistema estensionale del settore settentrionale di Ischia, consistente con il campo di deformazione regionale recente ed attuale (Fusi et al., 1990), suggerisce una possibile relazione tra il campo di deformazione regionale e la dinamica recente dell'isola. Lo stato deformativo dell'isola risulta governato sia dal campo di stress regionale sia dai fattori che determinano la risorgenza calderica.

I sistemi di faglie che interessano l'isola possono essere distinti in quattro gruppi (Nappi, 2006):

a. faglie ad orientazione E-O e ONO-ESE che bordano il settore nord del Monte Epomeo;
b. il sistema di faglie NE-SO che taglia i depositi del settore orientale;
c. faglie ad orientazione NO-SE relative al settore NO dell'isola;
d. le faglie NNO-SSE e N-S che bordano il settore orientale ed occidentale del Monte Epomeo.

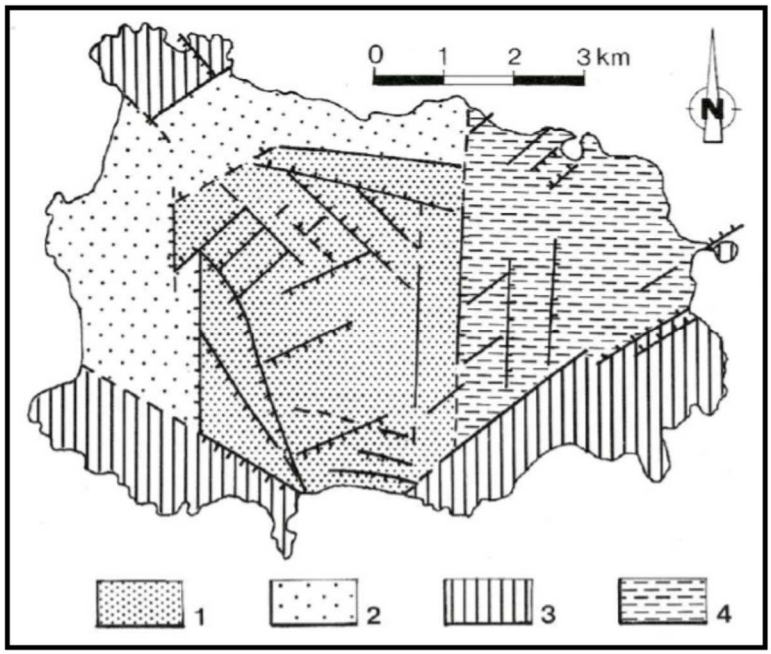



*Figura 28 - Schema strutturale dell'Isola d'Ischia. 1) Horst di M. Epomeo. 2) Aree depresse marginali all'Horst. 3) Dorsale di M.te Vezzi-Torone-Cotto, Panza e Monte Vico. 4) Graben d'Ischia (Chiesa & Vezzoli, 1983).*

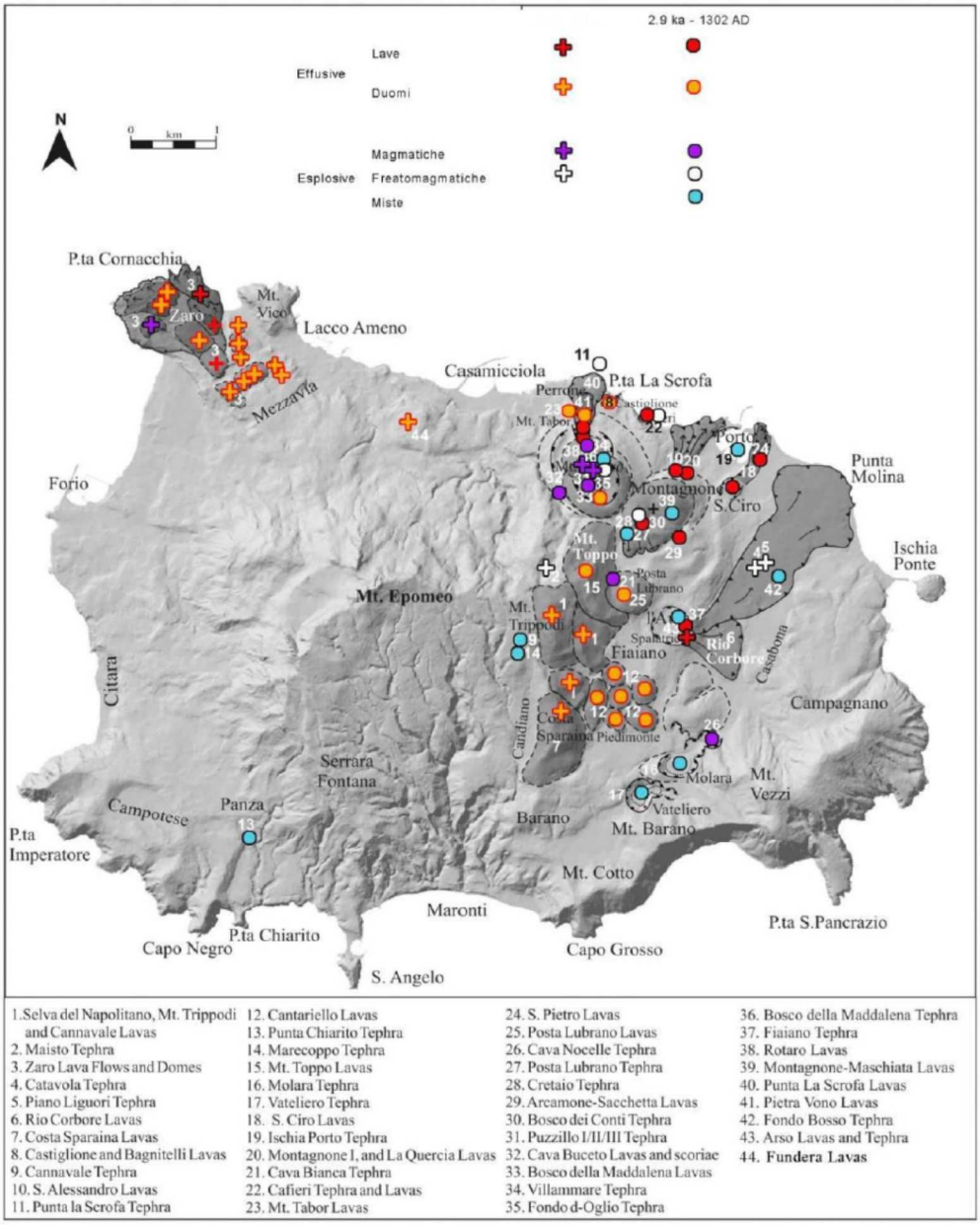



*Figura 29 - Centri attivi negli ultimi 10 ka, divisi per età (10-4.3 ka e 2.9 ka - 1302 AD), e per tipo di attività (effusive lave, effusive duomi, esplosive magmatiche, freatomagmatiche e miste) (da CPV-TdL Ischia 2016).*

**Assetto idrogeologico generale dell'Isola di Ischia**

La circolazione idrica sotterranea nell'isola d'Ischia è legata alle dinamiche vulcano-tettoniche che hanno condizionato la messa in posto dei depositi lavici e piroclastici che ne costituiscono i corpi acquiferi principali.

Tale circolazione risulta complicata dalle intercalazioni e sovrapposizioni di depositi epiclastici e formazioni sedimentarie di origine marina e si esplica principalmente per fessurazione nei termini litoidi lavici e tufacei e per porosità nei depositi incoerenti piroclastici.

Tale condizione lito-strutturale genera una struttura idrogeologica complessa, ovvero un acquifero costituito da una disordinata serie di orizzonti che localmente possono risultare semipermeabili o impermeabili dando luogo ad un deflusso idrico sotterraneo che avviene per falde sovrapposte. Tali

falde però possono essere in genere ricondotte, a grande scala, ad un'unica circolazione idrica sotterranea, caratterizzata da fenomeni di drenanza e da mescolamenti tra acque di diversa origine, a causa della variabilità ed eteropia dei vari depositi.

É possibile individuare nell'Isola di Ischia due zone caratterizzate da modalità di deflusso idrico sotterraneo distinte, corrispondenti grosso modo al settore centro-occidentale e orientale dell'Isola d'Ischia, rispetto all'allineamento Punta della Scrofa a N e Monte Cotto a S (Figura 30). Nella prima zona i primi 100÷200 m di spessore saturo di acquifero sono costituiti prevalentemente da depositi piroclastici e lave. Tale acquifero è caratterizzato da una trasmissività relativamente elevata e ospita un'unica falda libera rifornita sia dalle acque di alimentazione meteorica che da quelle di ingressione marina. Il recapito principale dell'idrostruttura è rappresentato, anche in condizioni indisturbate, dal mare.

Nella zona del graben di Ischia, l'acquifero superficiale (i primi 100-200m di spessore saturo) costituito da depositi piroclastici e lave, è caratterizzato da una trasmissività relativamente elevata ed ospita un'unica falda alimentata sia dalle acque di infiltrazione diretta sia da acque di ingressione marina. Il recapito principale dell'acquifero è rappresentato dal mare, in condizioni indisturbate.

Nella zona del Monte Epomeo, invece, e nelle zone marginali, nei primi 100-200m di spessore l'acquifero saturo sono presenti livelli permeabili (detriti e sabbie sciolte), livelli semipermeabili e impermeabili. Di conseguenza, l'acquifero risulta essere meno trasmissivo, più eterogeneo ed anisotropo, rispetto all'area del graben. Per questo motivo, in questa area sono presenti più falde sovrapposte, aventi come recapito principale il mare. Altra complicazione dello schema idrogeologico è data dalla presenza delle numerose faglie e fratture che interessano questo settore, perché queste rappresentano vie preferenziali del deflusso idrico sotterraneo, soprattutto lungo la verticale. Anche in questa zona è stata rilevata l'incidenza dell'alimentazione con acque di ingressione marina ed anche con fluidi di provenienza profonda.

Con lo studio del 1999, Celico et al. affermano che in generale, sia la valutazione delle risorse idriche sotterranee dell'isola, sia il chimismo delle acque campionate nel corso del suo studio, ben si adattano ad un modello idrogeologico che prevede una ricarica aggiuntiva dell'acquifero vulcanico, oltre a quella meteorica. Infatti, l'ingressione marina avviene anche senza emungimenti dalla falda, in relazione al flusso di calore che interessa l'isola, in quanto Celico (1999) afferma che *''l'interfaccia tra acqua di falda e acqua marina si solleva in funzione del variato rapporto di densità tra i due fluidi e ciò è dovuto essenzialmente alla differenza di temperatura tra le acque di mare (relativamente fredde, per effetto del sempre più attivo ricambio che subiscono via via che, all'interno dell'isola, si va verso la fascia costiera) e le più calde acque di falda".*

Tuttavia, a causa della estrema eterogeneità ed anisotropia dell'acquifero, la ricarica con acqua di mare assume connotazioni diversificate secondo le locali condizioni idrodinamiche, tanto da differenziare il chimismo delle acque prelevate da pozzi molto vicini.

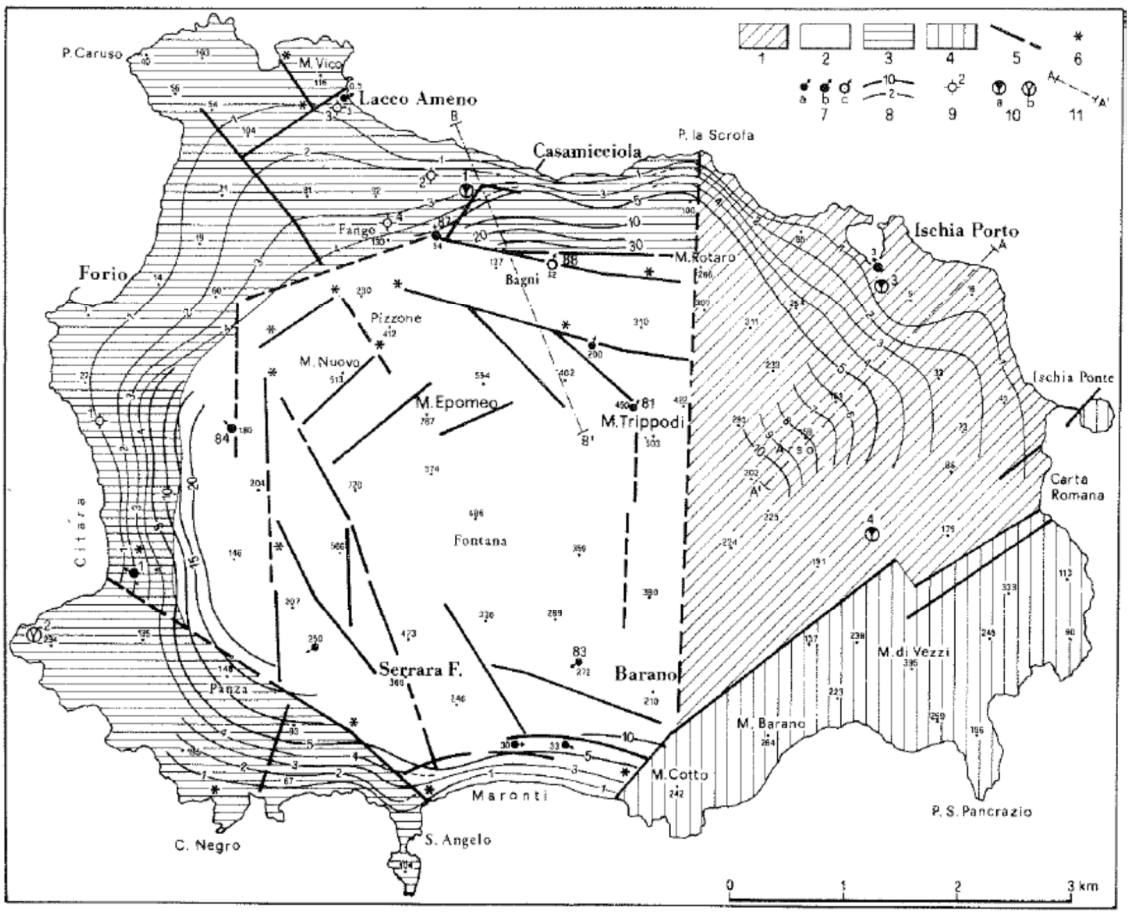



*Figura 30 – Carta idrogeologica dell'isola di Ischia, Celico 1999. 1 settore del graben, 2 settore horst Monte Epomeo, 3 settore delle aree marginali, 4 settore dei complessi vulcanici.*

**Assetto idrogeologico del territorio comunale di Forio**

La circolazione idrica sotterranea del territorio di Forio, si individua soprattutto nei complessi terrigeni piroclastici i quali accolgono il principale corpo idrico sotterraneo. Tali complessi costituiscono quindi l'acquifero principale, costituito da un'alternanza di orizzonti permeabili, che localmente possono essere semipermeabili o impermeabili in funzione della loro classazione granulometrica. Tale disomogeneità porterebbe a pensare per il territorio in esame ad un deflusso idrico per falde sovrapposte, ma sia le discontinuità laterali che quelle verticali dei livelli meno permeabili, comportano che la circolazione idrica sotterranea sia unica e quindi caratterizzata da una sola falda. Tale falda viene alimentata sia dalle acque meteoriche che localmente da quelle di ingressione marina, essa risulta tamponata alla base da potenti spessori tufacei o lavici ed il suo recapito principale è rappresentato dal mare.

Nell'elaborato di Figura 32 (Carta Idrogeologica tratta dal PUC) gli autori hanno suddiviso i complessi geolitologici individuati sul territorio comunale in funzione delle classi di permeabilità individuando complessi a permeabilità elevata per fratturazione (depositi lavici) e per porosità (sabbie e ghiaie di natura piroclastica sia primarie che rimaneggiate) e complessi a permeabilità media (livelli epiclastici addensati) e bassa (complesso tufaceo). Inoltre gli autori hanno anche ricostruito l'andamento della

superficie piezometrica della falda acquifera principale sulla base dei dati relativi a misure piezometriche di pozzi e sondaggi. La direzione prevalente di deflusso idrico presenta una orientazione prevalente Est-Ovest (SE-NW – NE-SW) e cioè il deflusso è diretto dal Monte Epomeo verso il Mar Tirreno.

Infine si ricorda che anche le acque del sottosuolo di Forio, come già accennato in precedenza, presentano particolari gradienti di temperatura. Le temperature più elevate delle acque sotterranee si registrano nei pozzi o sorgenti ubicati nelle vicinanze delle faglie più recenti, dove si verifica maggiormente la risalita di fluidi caldi profondi, o si assiste a manifestazioni fumaroliche. Le acque con temperature relativamente più basse, caratterizzano invece le falde sospese più superficiali e lontane dalle faglie di cui si è detto. Il flusso di calore che caratterizza l'isola d'Ischia e quindi anche Forio, determina la ricarica dell'acquifero da parte dei fluidi caldi profondi, mentre nelle aree più prossime alla costa si possono verificare anche dei fenomeni di ingressione delle acque marine.

Le temperature dell'acqua di falda nel comune di Forio variano da un minimo di circa 20° ad un massimo di circa 90° (cfr. Figura 31). Le acque più calde, estratte tramite pozzi, vengono utilizzate per scopo idrotermale, infatti l'uso della risorsa geotermica di Forio, così come quella dell'intera Isola d'Ischia, è del tipo a bassa entalpia e quindi idonea all'utilizzo per scopo termale.

Nel territorio di Forio non si evidenziano numerose manifestazioni sorgentizie, le uniche scaturigini naturali delle acque di sottosuolo nel territorio comunale sono alcune sorgenti termominerali come quelle ubicate in località "Cava dell'Isola" e "Citara", la sorgente posta lungo nell'insenatura di "Sorgeto", ovvero il tratto di costa compreso tra "Capo Negro" e "Punta Chiarito" e la scaturigine presente in località "S. Antuono" posta alla base della collina denominata "Mortola".

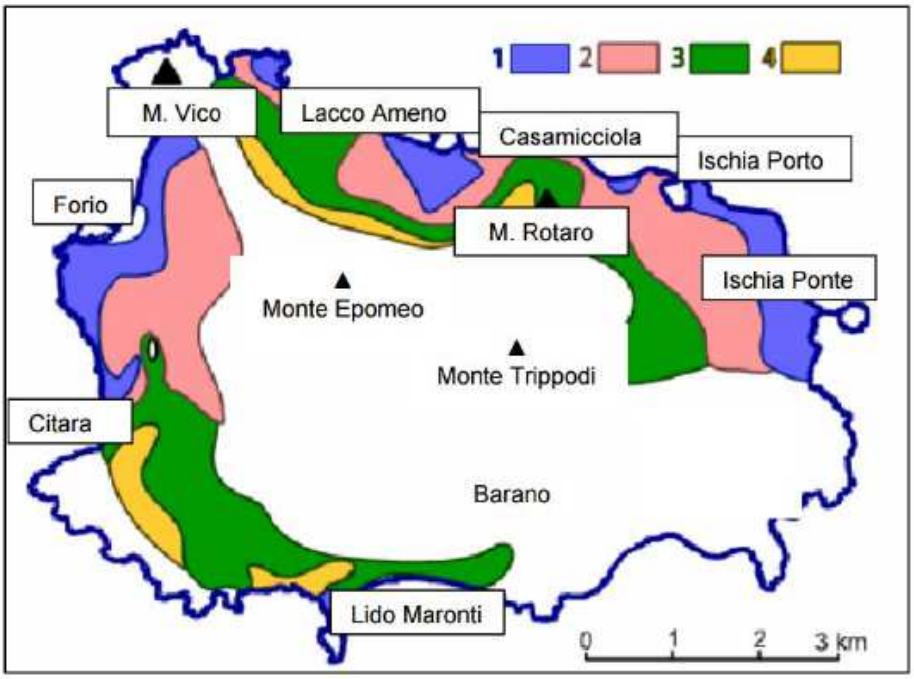



*Figura 31 - Le temperature delle acque sotterranee dell'Isola d'Ischia 1) da 20° a 40° 2) da 40° a 60° 3) da 60° a 80° 4) da 80° a 90°.*

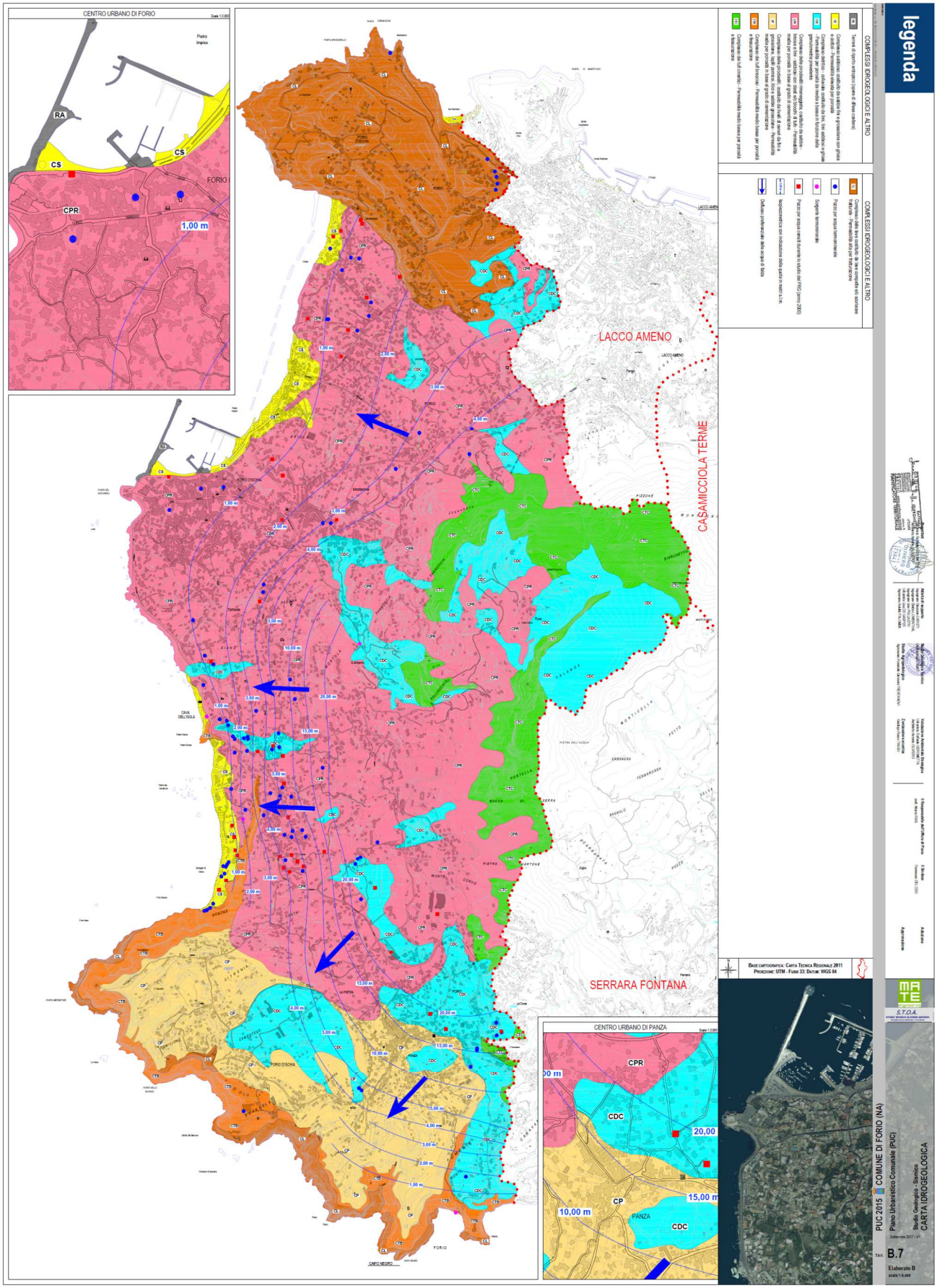



*Figura 32 - Carta Idrogeologica tratta dallo Studio Geologico allegato al PUC.*

**Geotermia dell'Isola d'Ischia (Tratto da Ricerca di risorse geotermiche finalizzata alla sperimentazione di un impianto pilota nel Comune di Serrara Fontana a cura dell'INGV)**

Il potenziale geotermico ad Ischia era già ben noto verso la fine del XVI secolo, ma era utilizzato, come accade ancora oggi, esclusivamente per le cure termali. Verso la fine del XX secolo nell'isola erano operativi oltre 180 stabilimenti termali e 130 piscine termali, alimentati da circa 200 pozzi di piccola profondità. Questa attività costituisce una solida ossatura economica dell'isola, mentre gli obiettivi prefissati negli anni '80, di allargare l'utilizzo della risorsa geotermica ad usi anche di tipo industriale è rimasto incompiuto. Gli unici esempi sporadici sono relativi all'utilizzo di acqua calda per il riscaldamento domestico.
Ad Ischia, la prima serie di pozzi per la ricerca di risorsa geotermica fu realizzata dal 1939 al 1943, nel settore occidentale e meridionale dell'isola, tra Cetara (Forio) ed i Maronti (Serrara Fontana) e nel settore settentrionale in località Monte Tabor (Casamicciola). Si tratta di n° 84 pozzi, di cui solo 5 superano i 100 metri di profondità dal p.c.. A partire dal 1951 e fino al 1954 la società SAFEN esegue n° 6 perforazioni, di cui n° 4 superano i 100 metri di profondità dal p.c. Dunque, in totale sul territorio dell'isola sono state effettuate n° 90 perforazioni, di cui solo n° 9 superano i 100 metri di profondità. La zona in superficie più calda dell'isola, è localizzata nel settore occidentale e meridionale, dove furono concentrate la maggior parte delle ricerche. In queste aree le temperature possono raggiungere più di 100 °C a pochi metri di profondità.

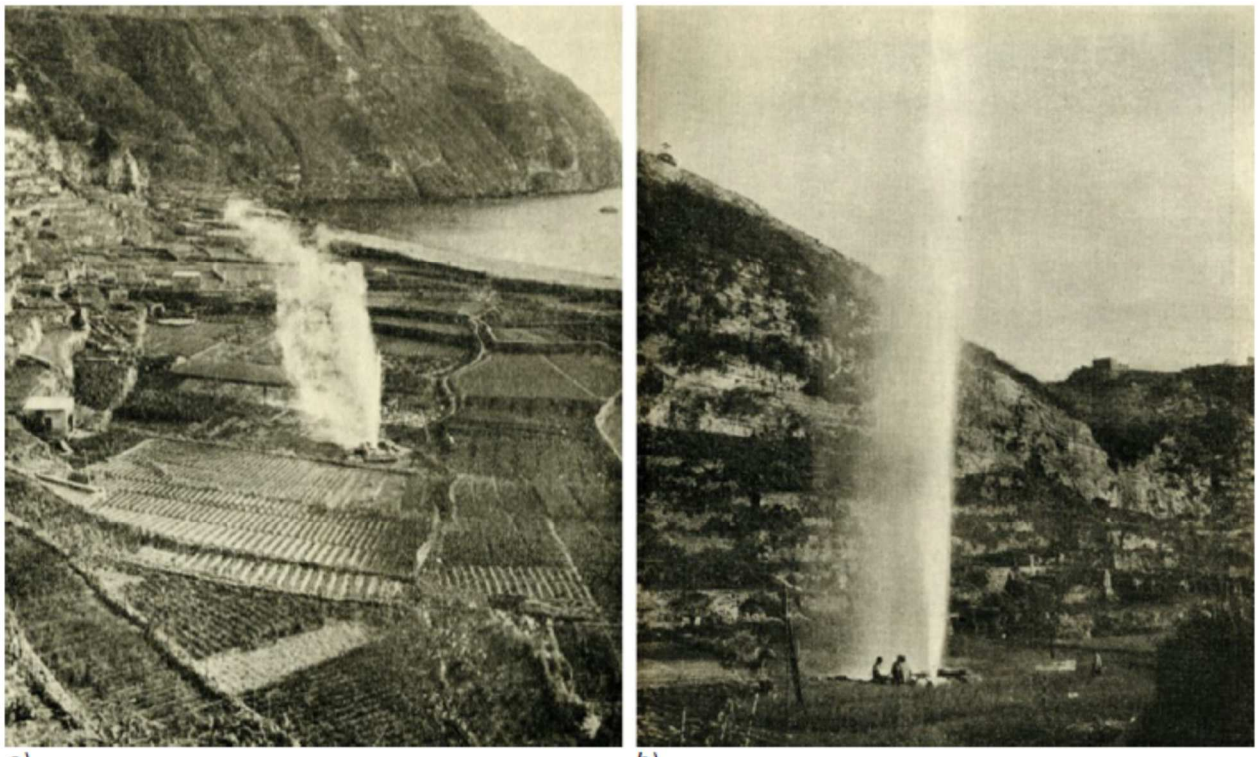



*Figura 33 - Manifestazioni del tipo geyser durante le perforazioni ad Ischia a) Cetara, aprile1949, b) Fumarole (settore sud) agosto 1939 (prime perforazioni geominerarie della società SAFEN tratto da "Ricerca di risorse geotermiche finalizzata alla sperimentazione di un impianto pilota nel Comune di Serrara Fontana" – INGV).*

Le temperature rinvenute nelle perforazioni dell'isola d'Ischia mostrano generalmente valori elevati (mediamente ~ 100°C a profondità di ~ 100 m dal livello del mare), con gradienti variabili in funzione delle condizioni geologiche e tettoniche locali, e del tipo di circolazione dei fluidi geotermali.
I dati di temperatura relativi ad i pozzi più profondi, ubicati tutti nel settore occidentale dell'isola, consentono di valutare il flusso di calore ed i gradienti di temperatura per il suddetto settore.
I gradienti di temperatura variano tra 180 e 220°Ckm$^{-1}$. Per quanto concerne le temperature misurate in superficie, si evidenza, in generale, un decremento radiale di queste (Figura 34), a meno di situazioni geologiche particolari che determinano una risalita o un abbassamento delle isoterme in profondità e quindi delle temperature in superficie (Figura 35).

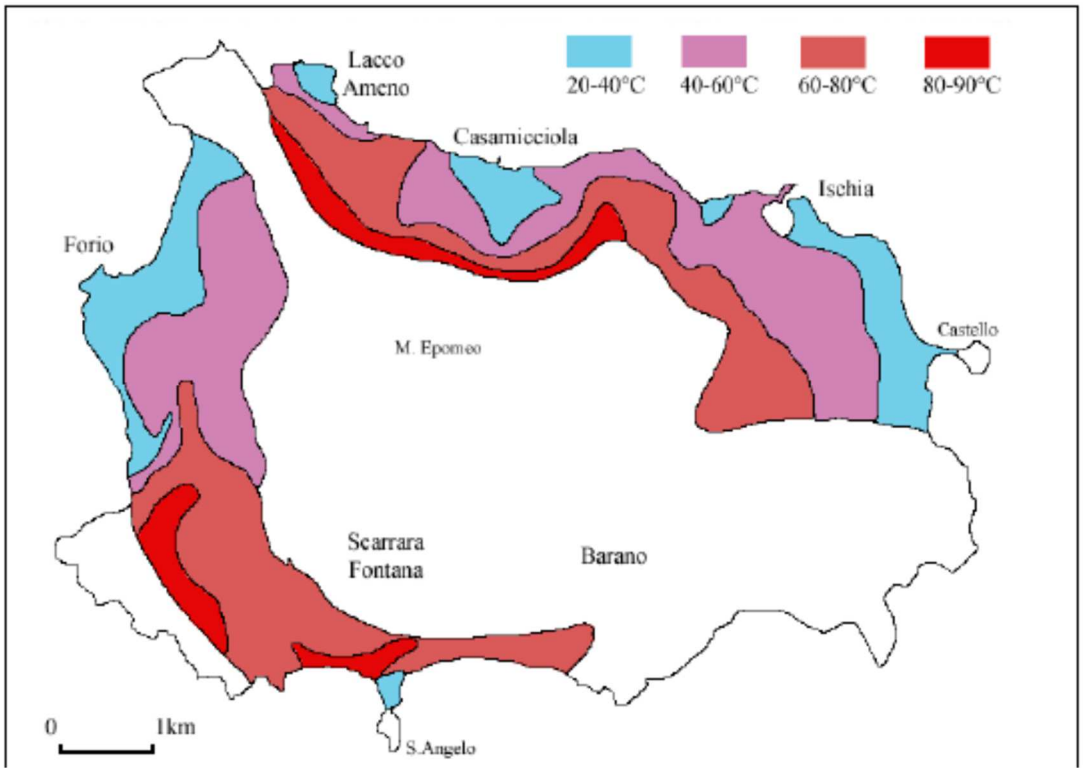



*Figura 34 - Isoterme in superficie ricavate dalle temperature delle sorgenti termali e delle fumarole.*

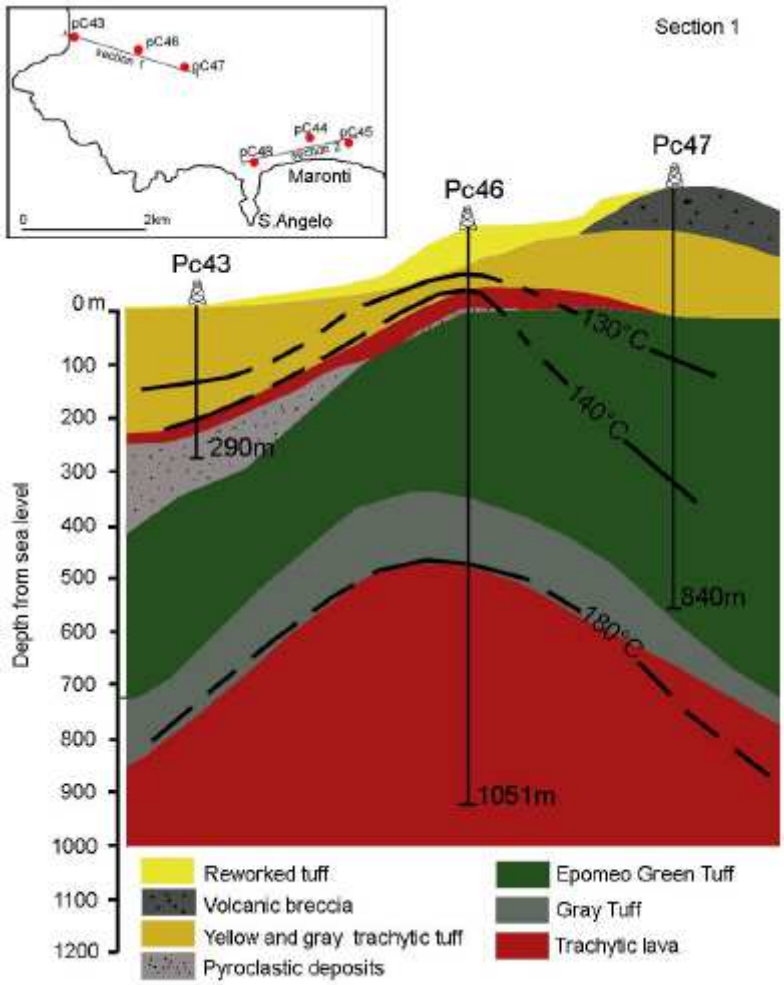



*Figura 35 - Risalita delle isoterme nel settore occidentale dell'isola dedotta dai dati di temperatura e stratigrafici. Il plume caldo potrebbe essere relazionato all'attività di doming, evidenziata dall'intrusione trachitica nel pozzo Ischia 3 (da Carlino et a., 2012).*

## 3.2 Assetto geomorfologico

L'isola d'Ischia copre un'area di circa 46 $km^2$ 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. 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.

L'assetto geomorfologico dell'isola è costituito da lineamenti che caratterizzano movimenti gravitativi, dovuti sia alla recente attività vulcanica che alla complessa storia tettonica. L'evento vulcano-tettonico che ha maggiormente controllato l'evoluzione geodinamica dell'isola ed i processi morfodinamici è costituito dal sollevamento dell'horst del Monte Epomeo. Il settore centrale dell'isola è quindi quello coinvolto nel processo deformativo, mentre circa la metà dell'isola è caratterizzata dalla presenza di depositi gravitativi, mudflow e debris avalanche, che evidenziano l'evoluzione geomofologica del Monte Epomeo in tempi relativamente recenti.

Tale attività gravitativa 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, Figura 36). 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). 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).

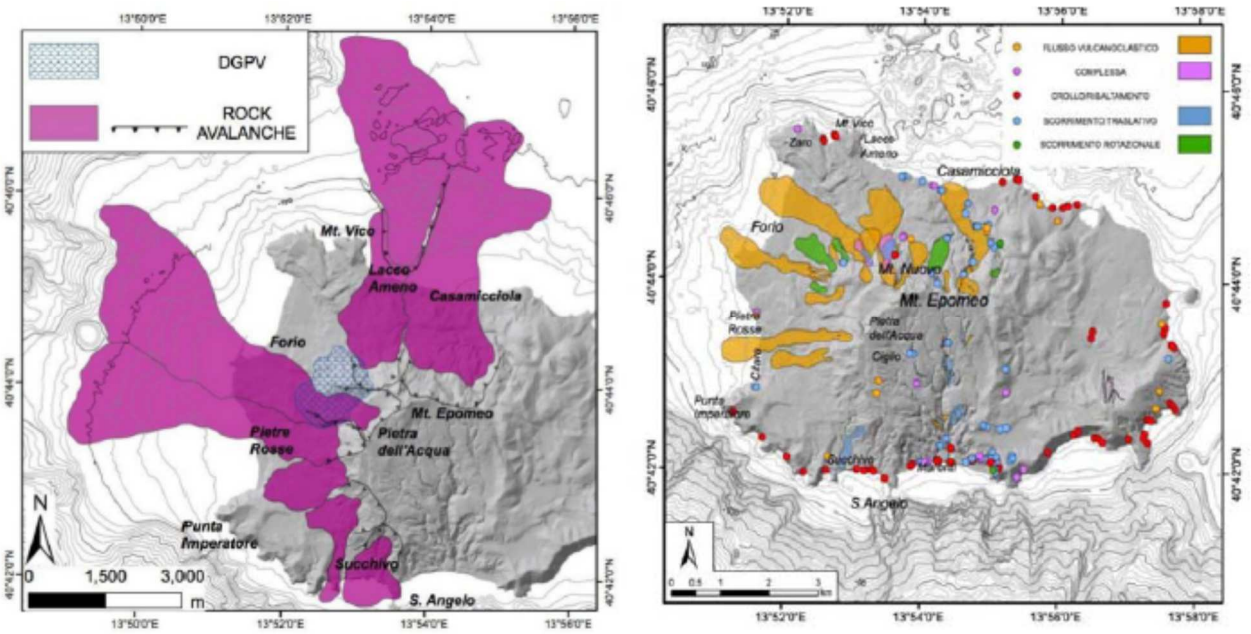



*Figura 36 - Distribuzione spaziale di (a sinistra) rock avalanche e della DGPV (deformazione gravitativa profonda di versante) di Monte Nuovo e (a destra) di frane impulsive superficiali (da CPV - TdL Ischia, 2016).*

Le linee di drenaggio e l'orografia superficiale enfatizzano il non-equilibro ipsometrico del profilo dell'isola, dove in alcuni settori, specie quello occidentale ed orientale, manca un ben definito sistema superficiale di linee di deflusso naturali (Figura 37).

I bacini imbriferi più rilevanti si segnalano a Nord di Casamicciola e di Lacco Ameno, a Ovest di Forio, Succhivo e Serrara e a Est di Ischia.

Per quanto riguarda Casamicciola, le acque piovane, scorrendo lungo le cave Buceto – Puzzilo, Leccie-Fasaniello e Celario- Sinigallia confluiscono in un unico alveo in località Piazza Bagni per poi sfociare nel porto di Casamicciola.

Il Bacino di Lacco Ameno, da Cava del Monaco si immette, invece, in Cava la Rita per poi proseguire verso il porto. Poco incisi gli alvei dal lato ovest di Forio mentre, il bacino di Serrara, presenta numerose aste più profonde che sfociano sulla spiaggia dei Maronti.

Il bacino più importante dell'intera isola è quello del Rio Corbore che, nato in zona Monte Vezzi attraversa tutto il territorio comunale e oltrepassati i Pilastri sfocia nella costa.

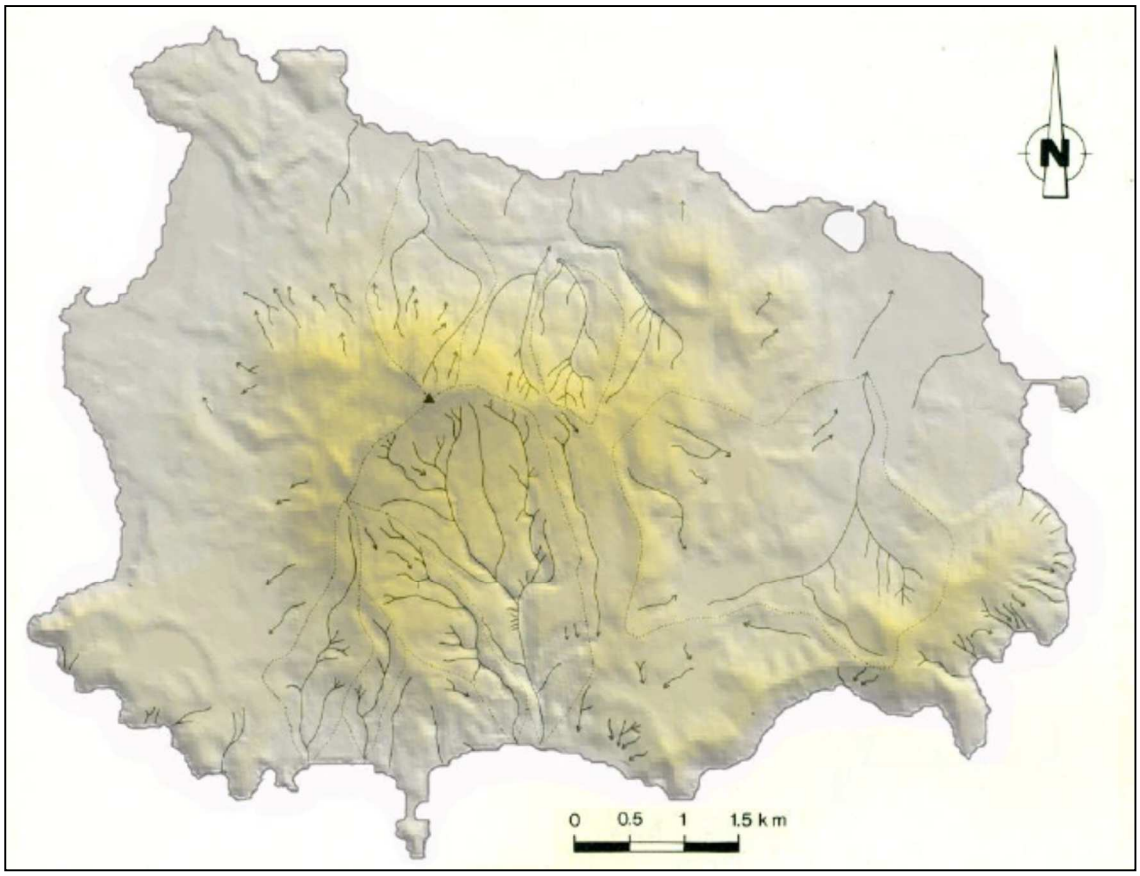



*Figura 37 – Principali linee di drenaggio superficiale di Ischia.*

La lunghezza media dei segmenti idrici non è mai superiore a 2 km, con un rapporto di biforcazione tra 2 e 5.7 ed una densità di drenaggio tra 0.47 a 2.09 km/km$^2$).

**Geomorfologia del territorio comunale di Forio**

Il territorio comunale si estende ai piedi del versante occidentale del Monte Epomeo, dalla quota di circa 780 m s.l.m., fino alla costa, e corrisponde all'intera porzione occidentale dell'isola. L'assetto morfologico del territorio comunale di Forio risulta quanto mai complesso e variegato, in quando condizionato da un'infinità di processi endogeni ed esogeni che hanno modificato lo stesso territorio nel corso dei tempi e che lo hanno portato alla sua conformazione attuale.
È possibile suddividere l'esteso territorio in alcuni settori ben definiti:

- ✓ A nord si individua il promontorio lavico dello Zaro;
- ✓ Al centro l'area costiera-pedemontana del centro di Forio a morfologia collinare;
- ✓ Ad occidente è bordato totalmente dal mare;
- ✓ Ad oriente si individua il versante occidentale del Monte Epomeo;
- ✓ A sud domina invece il campo vulcanico di Campotese-Panza.

L'imponente plateau vulcanico di Zaro è stato messo in posto nel quinto periodo di attività vulcanica dell'isola intorno tra i 5000 e gli 8000 anni fa. Il complesso lavico presenta spessori fino a 70/80

metri e risulta caratterizzato da una serie di fratture ad orientamento prevalente NW-SE e SW-NE. La costa risulta caratterizzata da alte falesie subverticali.

I rilievi del plateau sono caratterizzati dalla presenza di orli di scarpate morfologiche naturali con dislivelli compresi tra i 10m ed i 20 metri e superiori ai 20 metri (caratterizzate da pendenze elevate e dunque possibili amplificazioni del moto sismico per effetti topografici). Tutte le falesie che bordano il complesso lavico sono caratterizzate da instabilità di versante per fenomenologie da crollo. La presenza di aree a rischio crollo è diffusa su tutto l'areale, in prossimità delle aree a maggiore fratturazione. Durante i rilevi effettuati è stata individuata un'area interessata di recente da crolli nella compagine lavica in loc. Montevergine (Figura 40 e Figura 41).

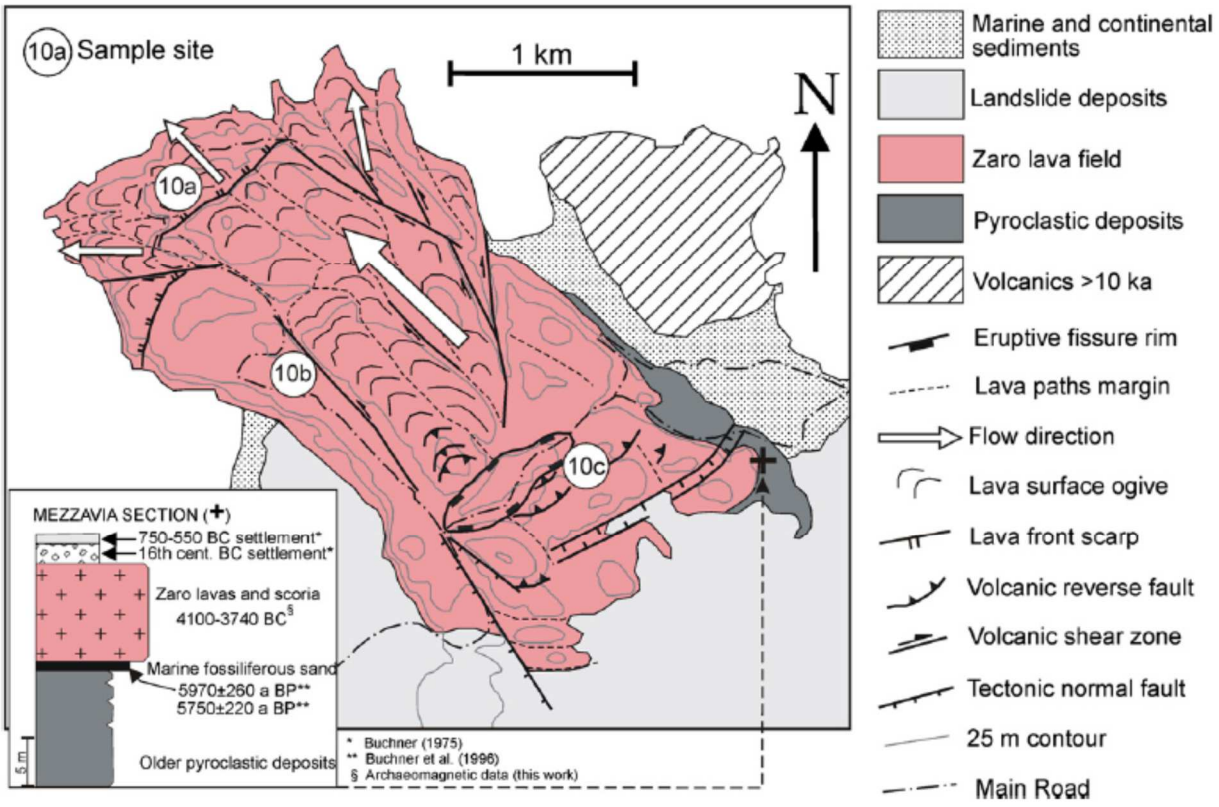



*Figura 38 - Carta geologica del complesso vulcanico dello Zaro (Da Vezzoli et. al., 2009).*

*Figura 39 - Lave dello Zaro, Membro della Sciavica ($ZRO_2$): località Punta Caruso*

*Figura 40 - Lave dello Zaro, Membro della Sciavica ($ZRO_2$): Frana da crollo in loc. Montevergine (coordinate del punto UTM WGS84 33N 4511881N - 404664E)*

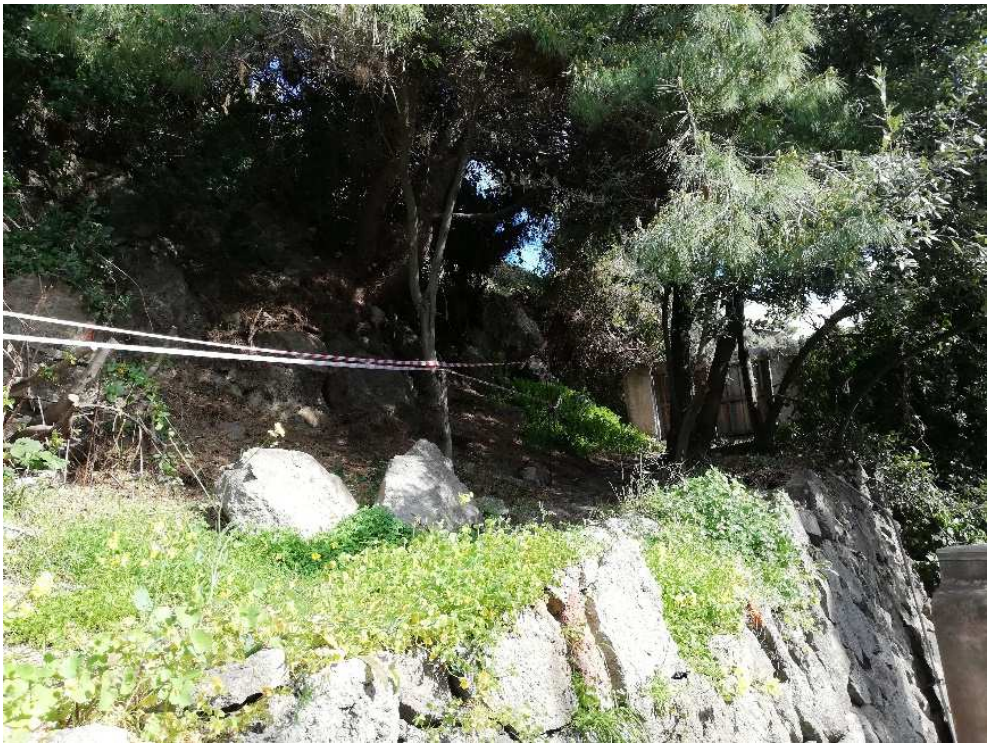


*Figura 41 - Lave dello Zaro, Membro della Sciavica ($ZRO_2$): Frana da crollo in loc. Montevergine (coordinate del punto UTM WGS84 33N 4511881N - 404664E)*

A conferma dell'elevata pericolosità da frana del promontorio dello Zaro si riporta lo stralcio della Tavola 466033 della Pericolosità da frana allegata al Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico vigente, che mostra ampie fasce a pericolosità elevata (R3 – colore arancio) e soprattutto molto elevata (R4 – colore rosso). Pertanto risulta evidente l'elevato rischio di frane da crollo sismoindotte per gran parte dell''area dello Zaro.

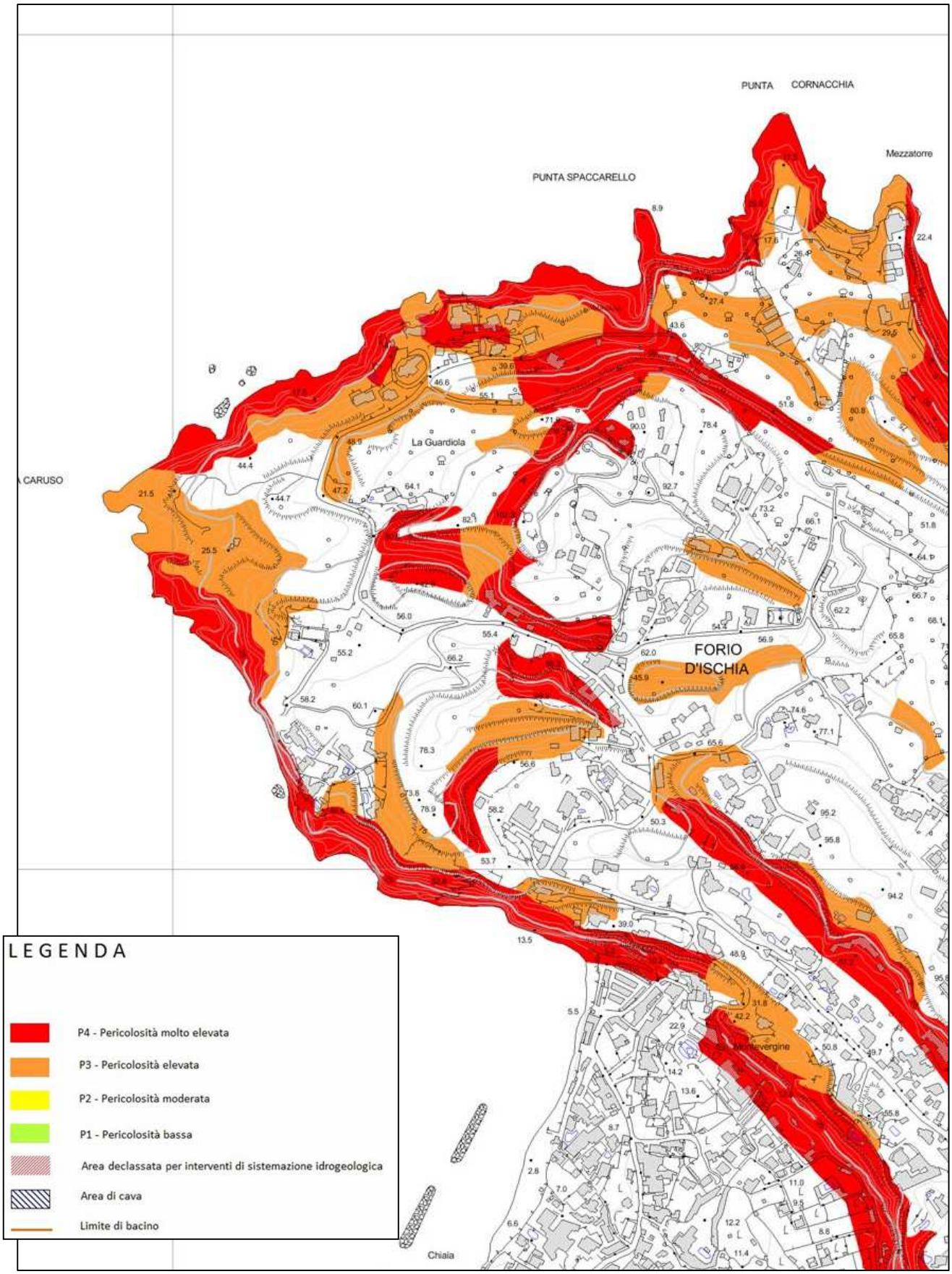



*Figura 42 - Stralcio Tavola 464033 della Carta della Pericolosità da frana del PSAI vigente.*

La porzione centrale del territorio comunale può essere suddivisa in una parte occidentale ed in una parte orientale.

La parte occidentale si presenta subcollinare con medio-bassi valori di pendenza. Tale morfologia è il risultato della messa in posto di depositi gravitativi grossolani sabbioso-ghiaiosi di debris flow, debris avalanche e lahar. In quest'area è inoltre possibile individuare la presenza di numerosi olistoliti tufacei del Tufo Verde, trasportati dagli stessi depositi gravitativi. Le seguenti Figura 1Figura 43 e Figura 44 mostrano chiaramente i vari depositi gravitativi che nel tempo si sono sovrapposti.

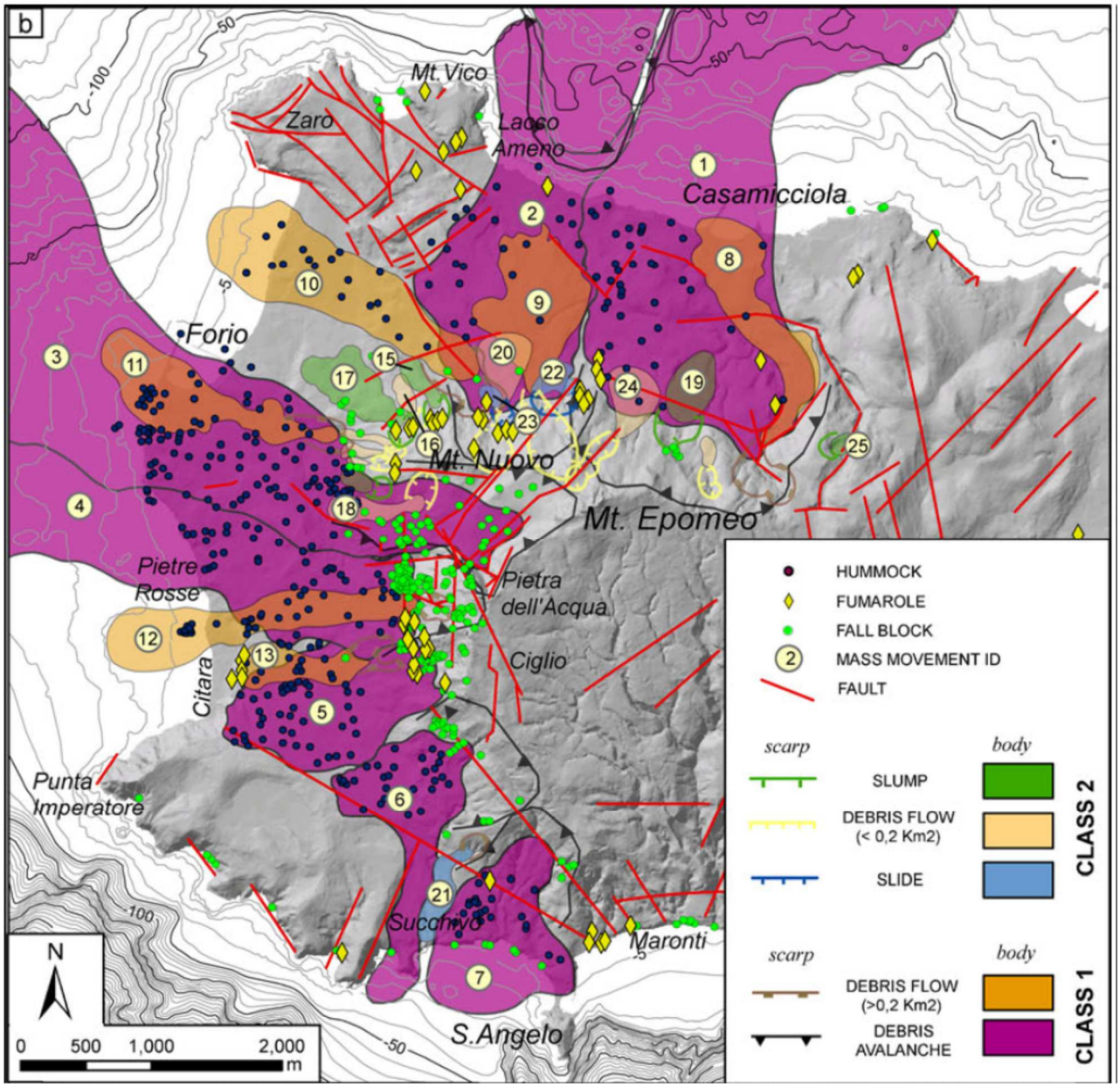



*Figura 43 - Mappa morfostrutturale del settore nord ed ovest dell'Isola d'Ischia (Da Della Seta et al., 2012).*

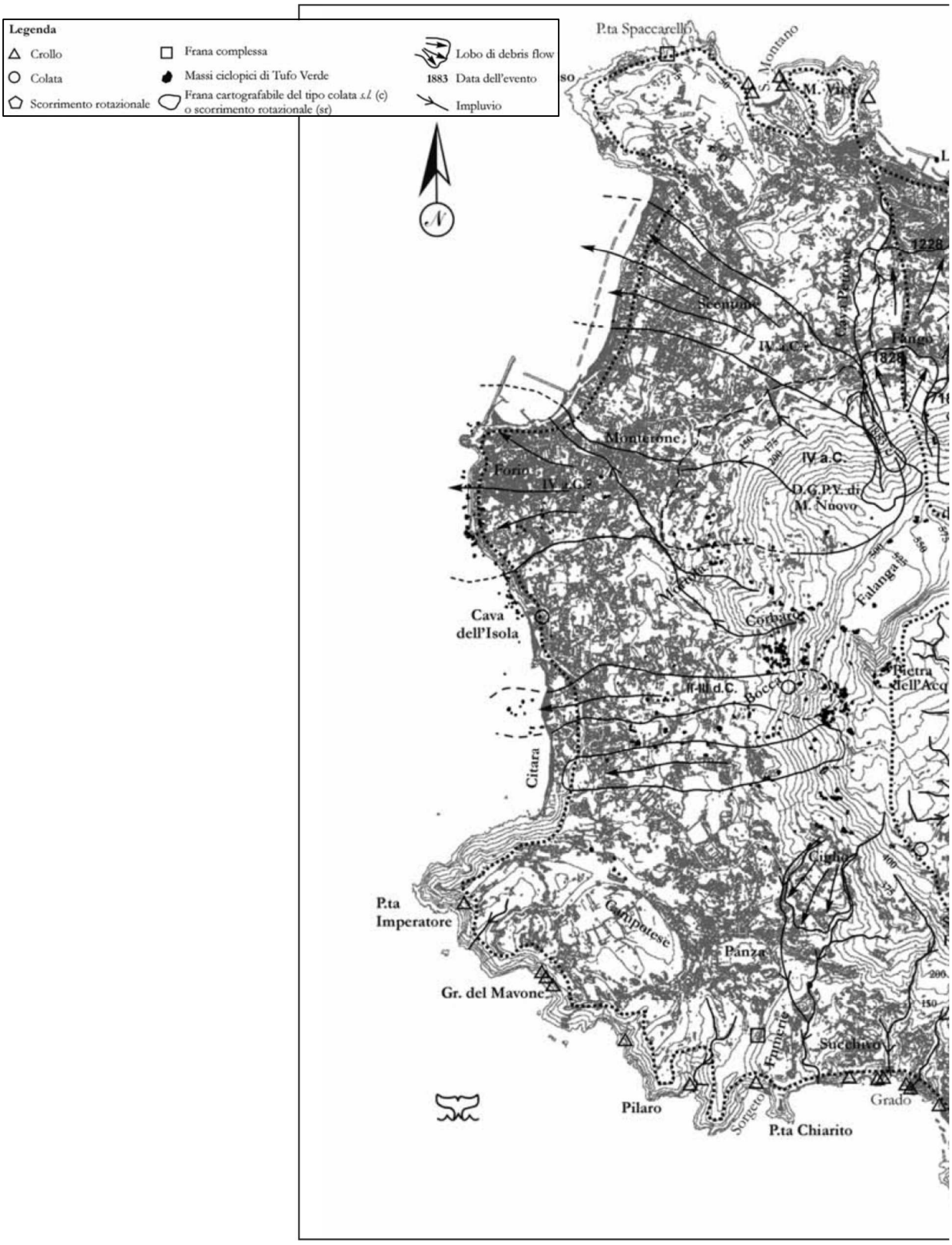



*Figura 44 - Carta degli ambiti fisiografici e delle frane dell'isola d'Ischia (da Del Prete e Del Mele, 2006).*

Lungo la costa è possibile individuare una serie di falesie (Punta del Soccorso, Cava dell'Isola) e di diverse paleofalesie, ovvero delle antiche linee di costa oggi cancellate dagli accumuli di materiale

da frana antica che hanno fatto traslare l'antica costa fino alla sua posizione attuale. Alcune di queste paleofalesie si possono apprezzare a monte della spiaggia di Citara, a valle delle località Siano e Pescina, a monte della località Baiola, in località Calosirto e a monte della località Montevergine. Oltre alle coste alte, il territorio di Forio è caratterizzato anche da tratti di costa bassa con spiagge più o meno estese la cui ampiezza è variabile di anno in anno in funzione degli effetti dovuti all'erosione marina che si esplica talvolta attraverso mareggiate di forte intensità. I maggiori tratti di spiaggia presenti a Forio sono quelli relativi alla spiaggia di Citara, quello di Cava dell'Isola, quella della Chiaia e quella di San Francesco. In questa porzione del territorio si segnalano pochi elementi morfologici potenzialmente soggetti ad amplificazione morfologiche. Si segnala la presenza di una valle sepolta stretta in loc. Baiola – San Francesco, e le scarpate/falesie/paleofalesie di Siano, Cava dell'Isola e soprattutto della spiaggia di Citara. La falesia di Cava dell'Isola risulta caratterizzata da un elevatissimo grado di pericolosità da colata (vedi Figura 45) e difatti, durante i rilievi di campagna svolti, è stato individuato e schedato un evento franoso recente (Figura 46).

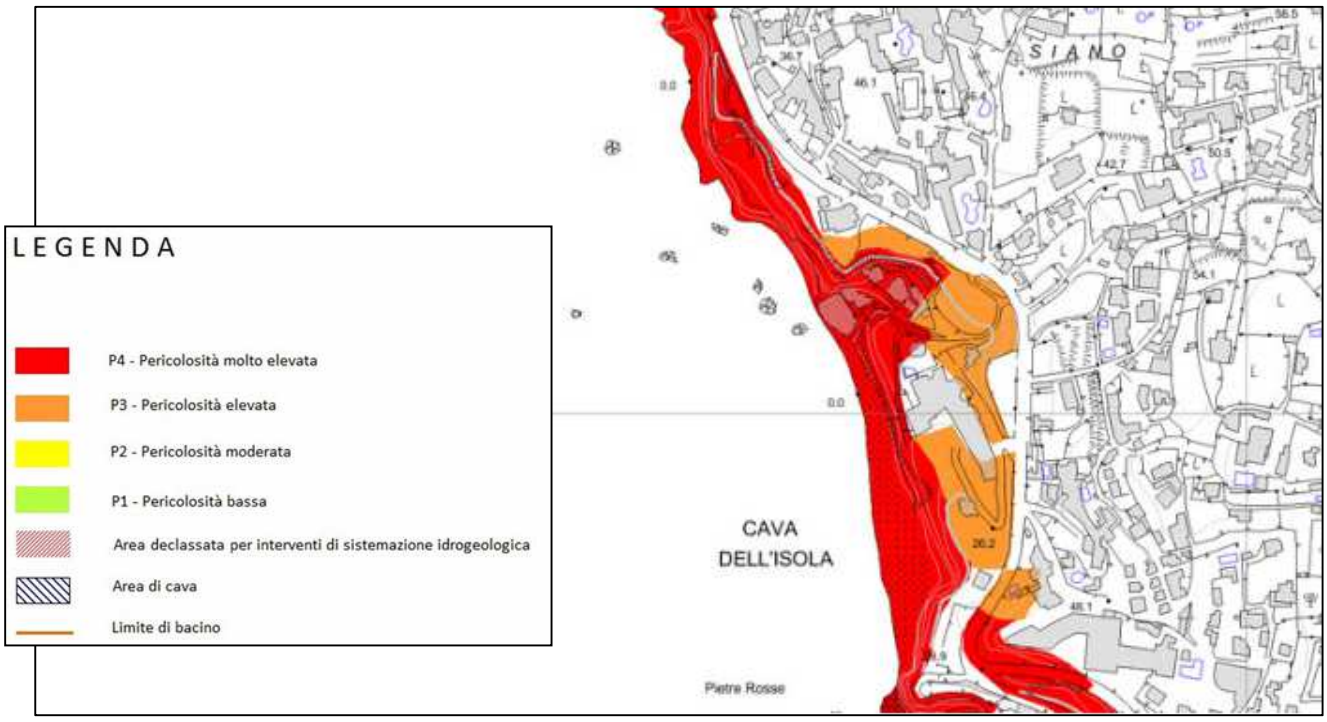



*Figura 45 - Stralcio Tavola 464074 della Carta della Pericolosità da frana del PSAI vigente.*

Anche la paleofalesia di Citara risulta caratterizzate da una fascia ad elevato rischio idrogeologico (Figura 47). Tutte queste aree sono state opportunamente segnalate sulla Carta Geologico – Tecnica come elementi morfologici potenzialmente soggetti ad amplificazioni sismici e/o ad effetti cosismici.

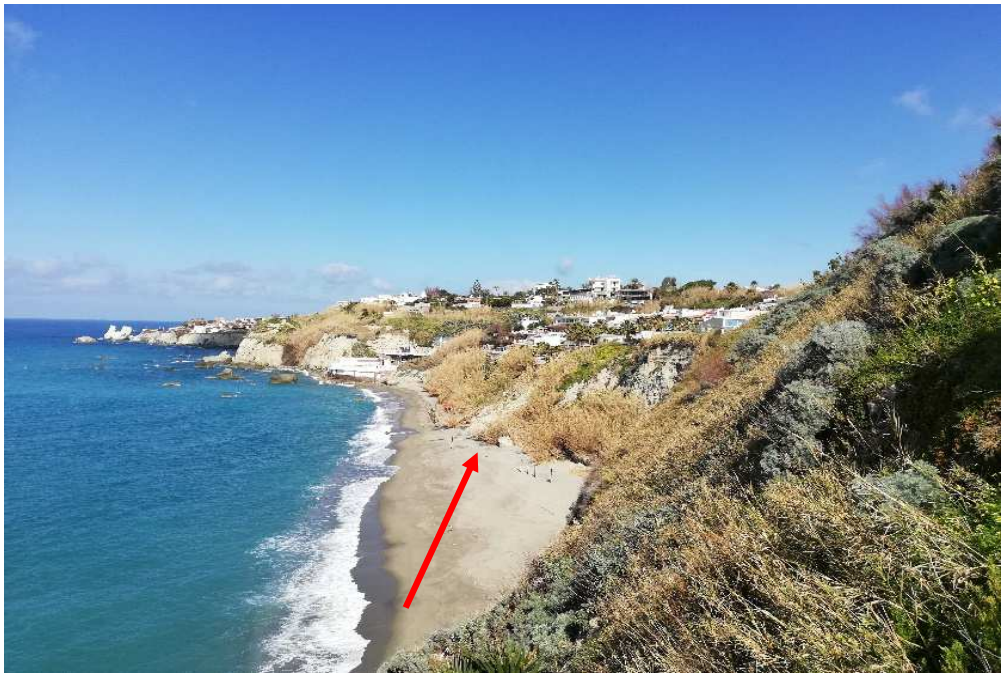


*Figura 46 - Tufi di Citara (TCT): Colata recente lungo la falesia di Cava dell'Isola.*

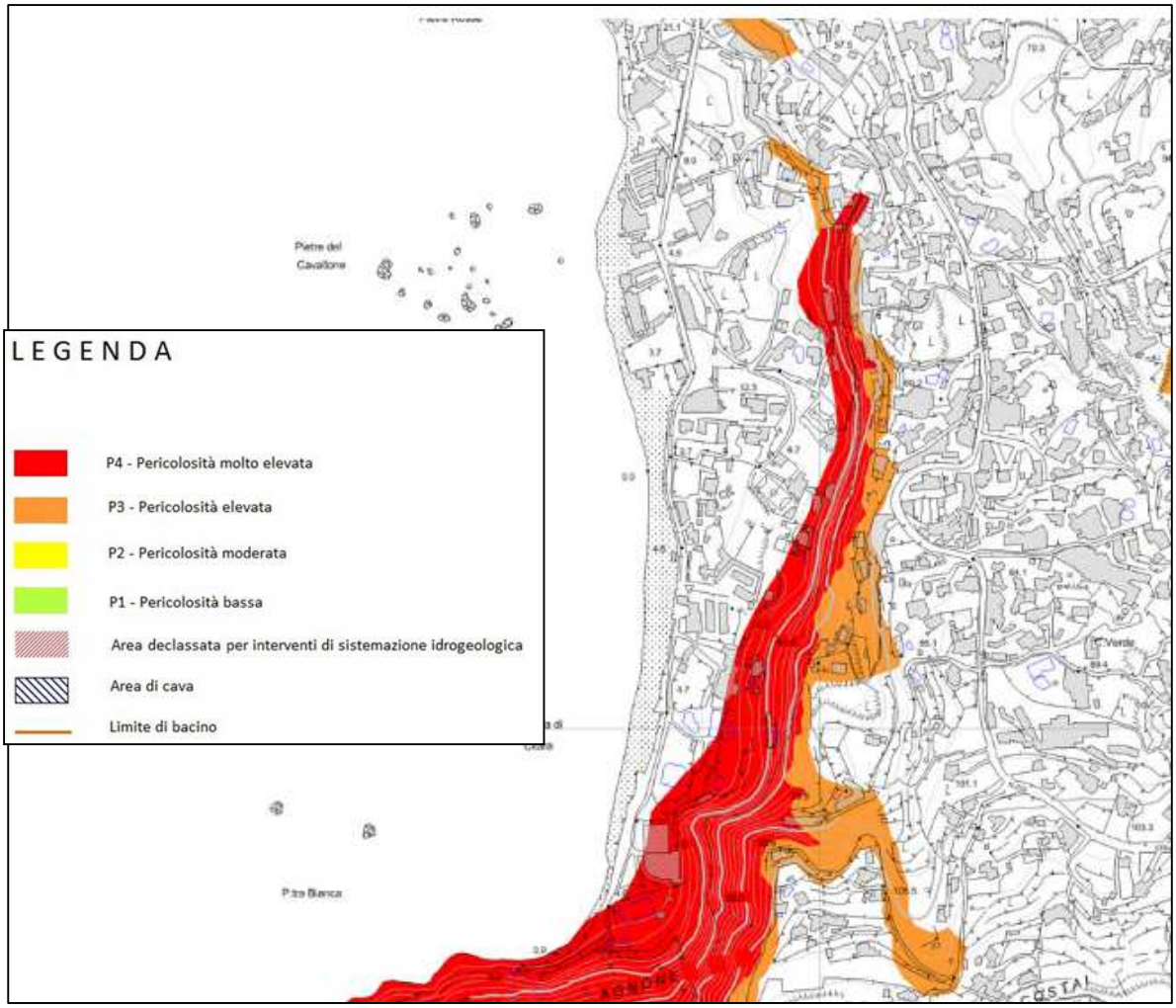



*Figura 47 - Stralcio Tavola 464073 della Carta della Pericolosità da frana del PSAI vigente.*

*Figura 48 - Paleofalesia di Citara interessata da diffusi fenomeni di dissesto.*

Il settore orientale del territorio comunale corrisponde all'acclive ed articolato versante ovest del Monte Epomeo ed alle sue falde. I fenomeni di risorgenza del Monte Epomeo uniti alle pervasive fratturazioni e alterazioni dei terreni sono responsabili delle condizioni di generale instabilità dei versanti, testimoniate dalle estese coperture di frane e paleo-frane e da grandi deformazioni gravitative profonde di versante, come nel caso di Monte Nuovo (Della Seta et al., 2015; Marmoni et al., 2017).

Lungo il versante del Monte Epomeo si possono osservare sia estese aree di accumuli di falde detritiche segnalate anche nella Carta Geologico – Tecnica redatta sia pareti subverticali in roccia tufacea da cui si possono innescarsi fenomeni da crollo, la cui espressione morfologica è stata riportata sulla carta Geologico - Tecnica mediante orli di scarpate morfologiche naturali con dislivelli compresi tra i 10m ed i 20 metri e superiori ai 20 metri (Figura 49). Alla base di tali pareti infatti corrono svariati lineamenti tettonici originatisi durante la surrezione del Monte Epomeo, quindi per queste aree le scarpate morfologiche sono corrispondenti a vere e proprie scarpate di faglia. A valle di tali pareti è possibile individuare numerosi olistoliti tufacei (blocchi di svariate dimensioni che possono raggiungere talvolta volumetrie anche di migliaia di metri cubi) che sono osservabili dalle aree pedemontane suddette fino a mare. La maggiore deposizione degli stessi blocchi la si denota lungo la fascia pedemontana compresa tra le località "Pietra Martone" e "Casa Coppa".

*Figura 49 - Unità del Tufo Verde del Monte Epomeo del Sintema del rifugio di San Nicola (TME): affioramento in loc.Monte Pietra.*

L'area del Monte Nuovo ubicata lungo il versante occidentale del Monte Epomeo, costituisce una deformazione gravitativa profonda di versante originatasi a seguito di un catastrofico evento vulcano-tettonico verificatosi durante le ultime fasi di sollevamento. Della Seta et alii hanno studiato in maniera dettagliata la deformazione gravitativa profonda.

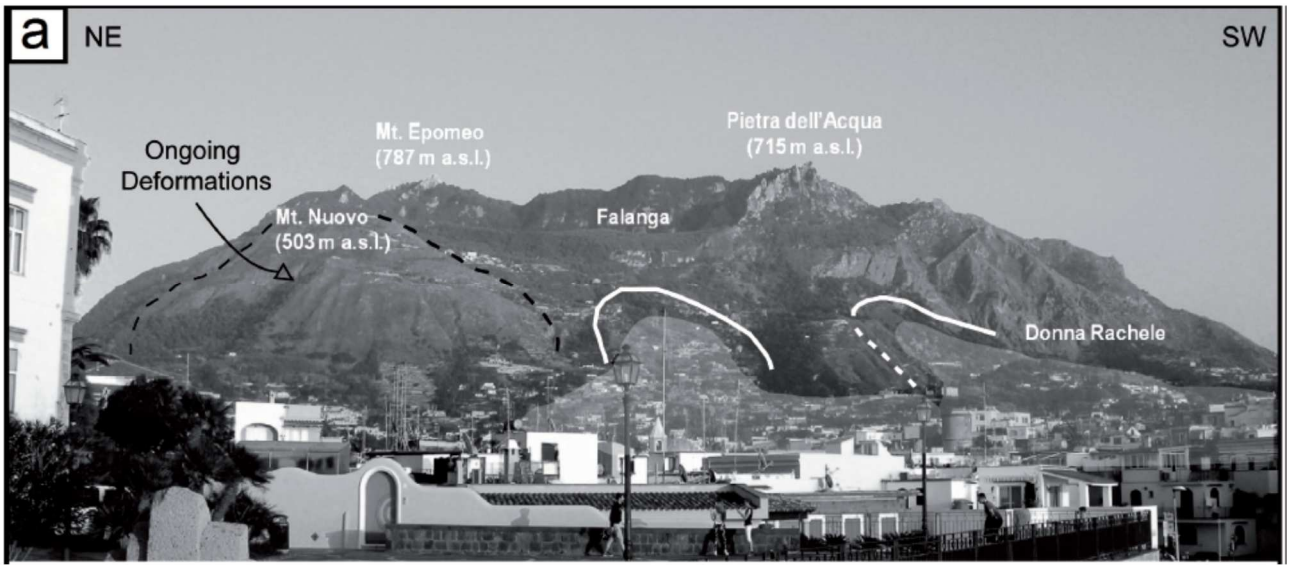



*Figura 50 - Vista panoramica del Monte Epomeo. Sulla sinistra l'area di Monte Nuovo (Da Della Seta et al., 2015).*

I risultati ottenuti sono di seguito descritti (Figura 51): "*Gli studi hanno messo in luce la complessità della deformazione gravitativa in atto, portando ad identificare la zona di taglio che guida l'instabilità gravitativa e consentendo l'attribuzione al fenomeno franoso di un meccanismo di scorrimento biplanare composito. In particolare, le misure di rumore sismico effettuate hanno apportato un utile contributo alla definizione del modello geologico, evidenziando un picco di risonanza a 0.8 Hz non direzionato e relazionabile alla risonanza di un ammasso a ridotta rigidezza (riferibile alla porzione interessata dall'instabilità gravitativa), con uno spessore pari a circa 250 m, sovrapposto ad un substrato rigido. Il modello proposto ha, inoltre, messo in luce la stretta relazione esistente tra le emissioni idrotermali e l'assetto stratigrafico e strutturale del versante di Monte Nuovo, evidenziando una concentrazione di emissioni fumaroliche in corrispondenza delle brecce basali, dove la circolazione di fluidi ha causato un'intensa alterazione, riconoscibile per la presenza di mineralizzazioni autigeniche secondarie, che rappresentano geotermometri in riferimento all'evento di alterazione idrotermale" (Della Seta et al., 2015).*

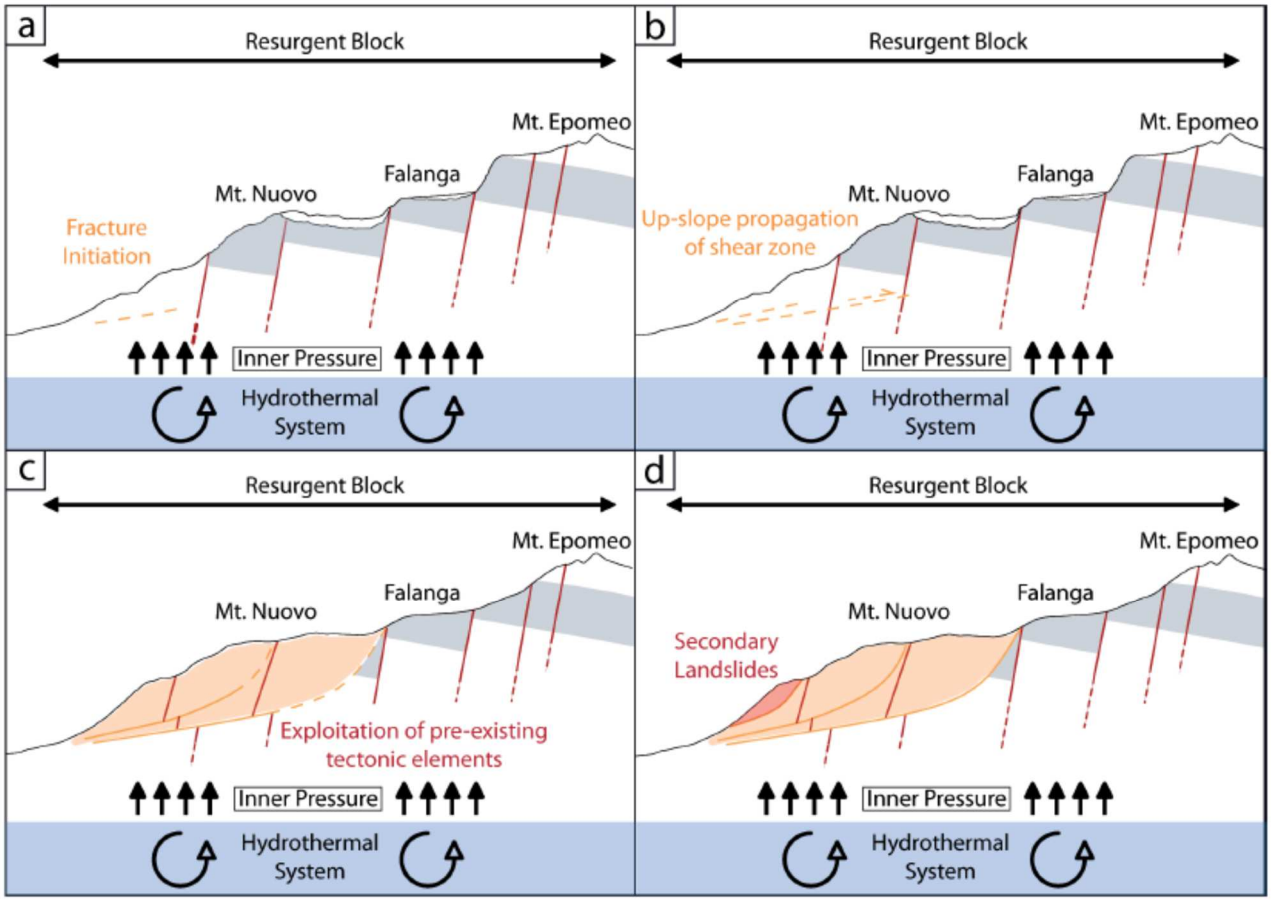



*Figura 51 - Modello evolutivo concettuale della deformazione di Monte Nuovo (da Della Seta et. alii, 2015).*

Le tavole 464071 e 464072 della Carta di Pericolosità da frana del PSAI vigente mostrano l'elevato grado di pericolosità idrogeologica dell'area del Monte Epomeo, che risulta perimetrata quasi interamente in fasce a pericolosità P3 e P4 (Figura 52). Tutto quanto detto evidenzia l'elevata possibilità di amplificazione sismica dell'area per effetti morfologici e topografici.

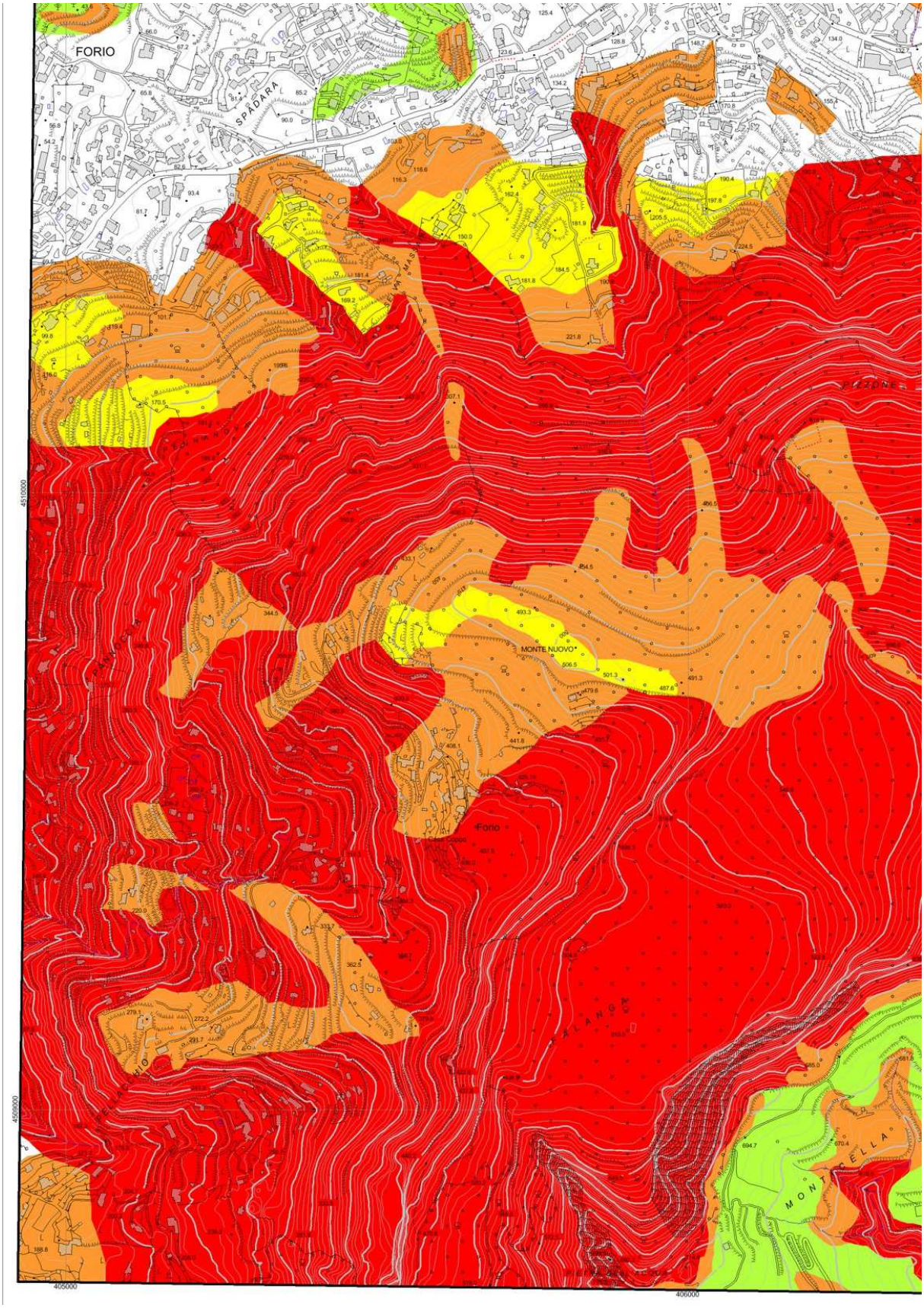



*Figura 52 - Stralcio Tavola 464074 della Carta della Pericolosità da frana del PSAI vigente.*

Infine a sud del comprensorio comunale si individua l'area collinare rilevata di Panza-Campotese (Figura 53), ascrivibile alla quarta fase di attività vulcanica, tra i 28.000 anni ed i 18.000 anni fa, è caratterizzata dalla presenza della successione di sono presenti tre mahar formatisi per effetto di una locale attività idro-magmatica riferibile a circa 18 ka (Contrada Capuano, Campotese e Panza - Figura 54).

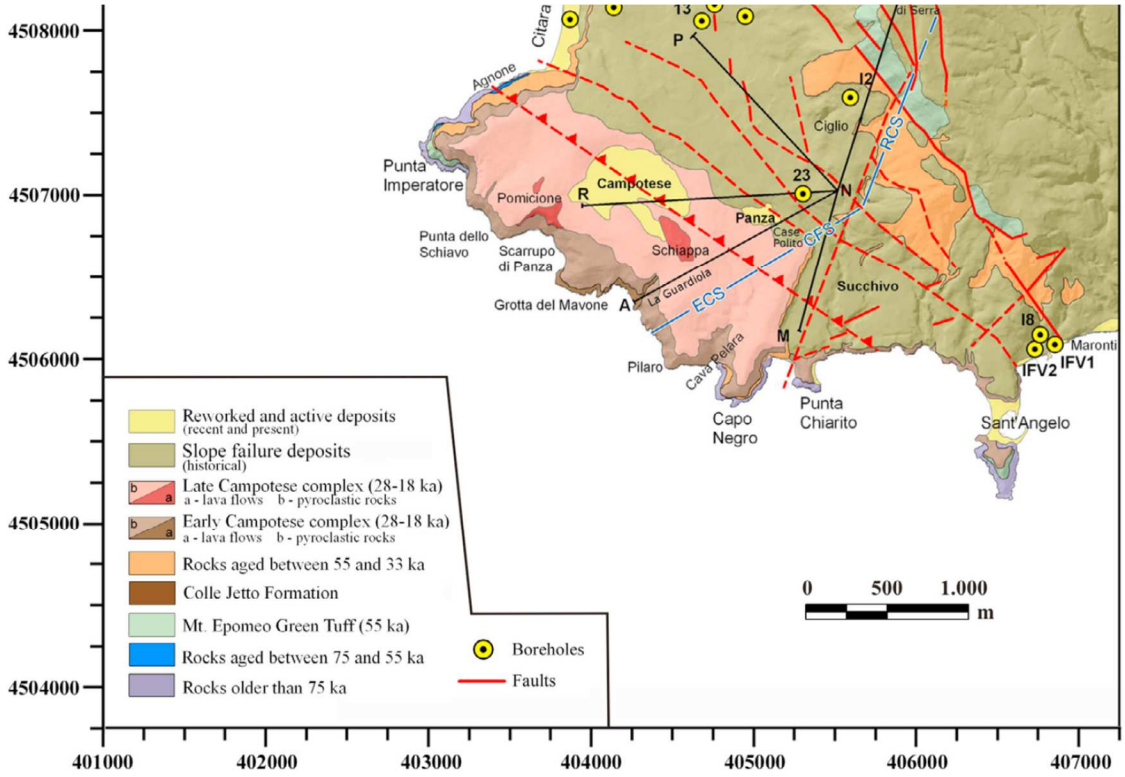



*Figura 53 – Mappa Geologica della porzione sud-ovest di Forio (da Napoli et. alii – 2011).*

*Figura 54 - Immagine 3d del settore meridionale dell'abitato, con indicazione dei mahar di Contrada Capuano, Campotese e Panza (da Google Earth.*

Anche nell'area di Campotese-Panza la fascia costiera risulta caratterizzata da alte falesie (tra Punta Imperatore e Punta Chiarito - Figura 55) dove alla base si individua le rocce laviche basali. Le falesie intagliate nelle piroclastiti, nei tufi e nelle lave basali risultano diffusamente caratterizzate da frane da crollo, come riportato nella Carta Inventario dei Fenomeni Franosi dell'IFFI in scala 1:25000 (Figura 56).

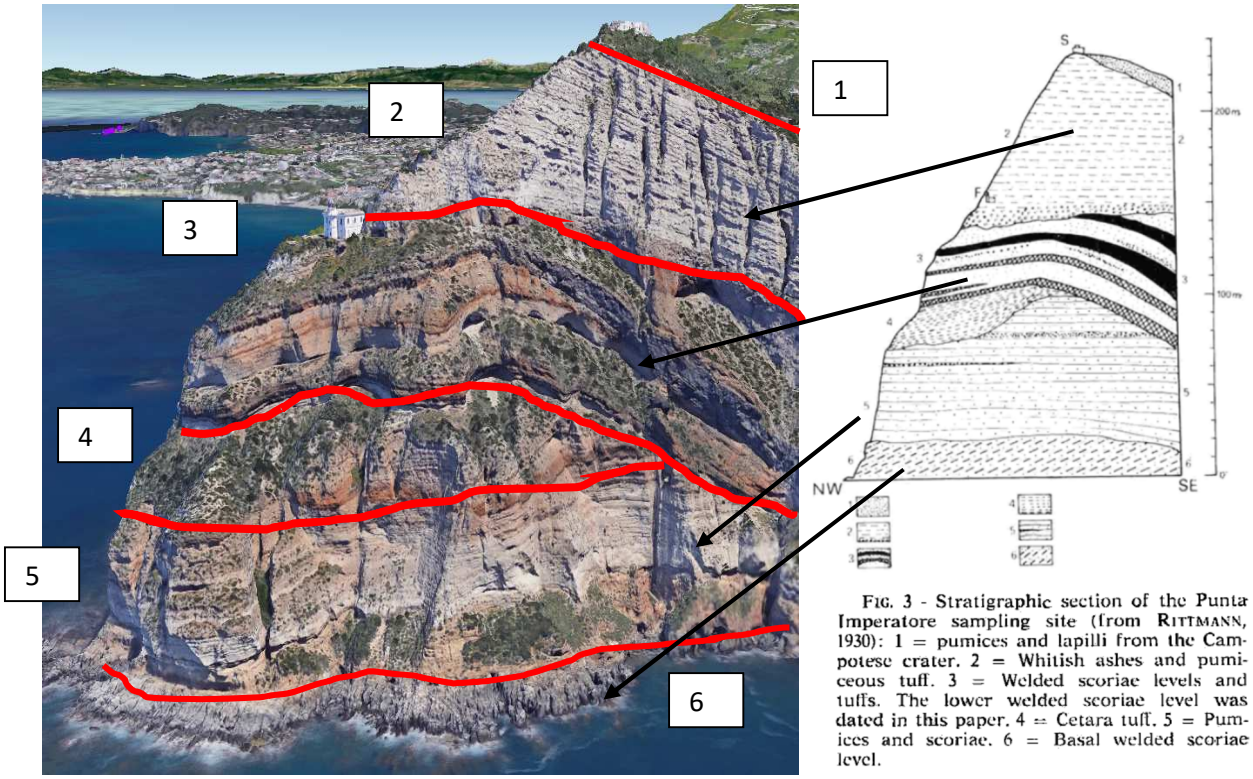



*Figura 55 - Successione di livelli piroclastici da sciolti ad addensati di Punta Imperatore (da Rittmann, 1930). 1) Pomici e lapilli del cratere di Campotese (Unità PPI), 2) Ceneri e pomici biancastre tufacee (Unità SUNa), 3) Livello di tufi e ceneri saldate (Unità SUNa), 4) Tufo di Citara (Unità TCT), 5) Livelli di pomici e scorie (Unità FGN), 6) Lave basali (Unità PIM). La foto a sinistra è tratta da Google Earth.*

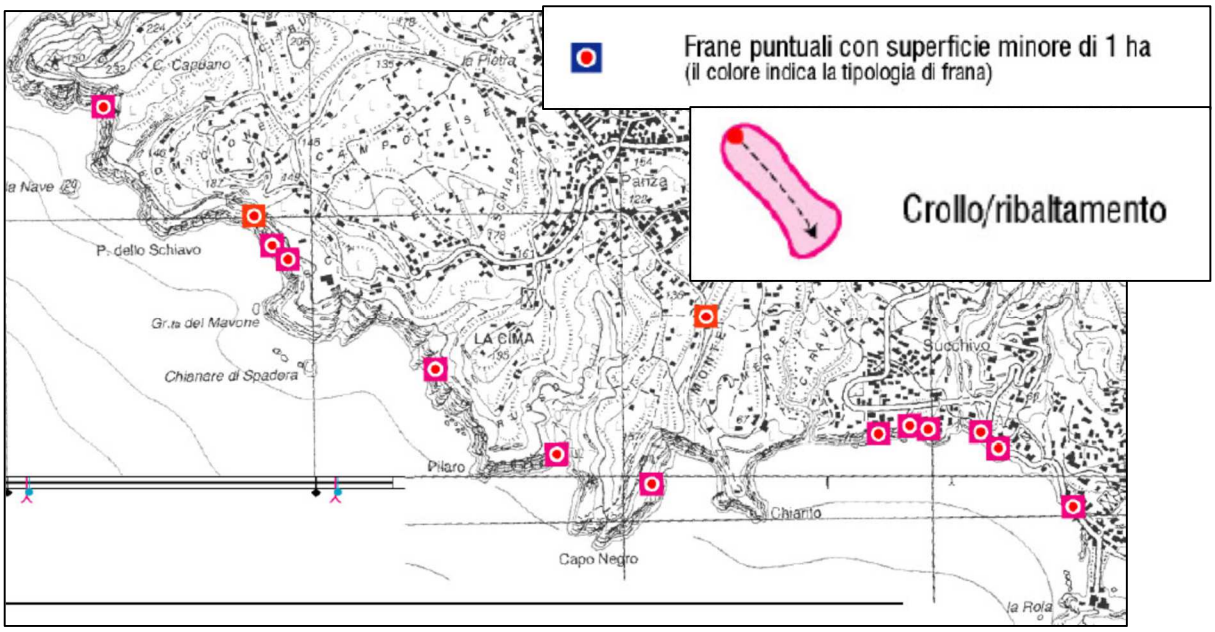



*Figura 56 - Stralcio Carta Inventario di fenomeni franosi in scala 1:25.000. Tav. 464.*

La Carta della Pericolosità da frana del PSAI riporta tutta la fascia costiera sottoposta a condizioni di rischio idrogeologico molto elevato (R4 - Figura 57).

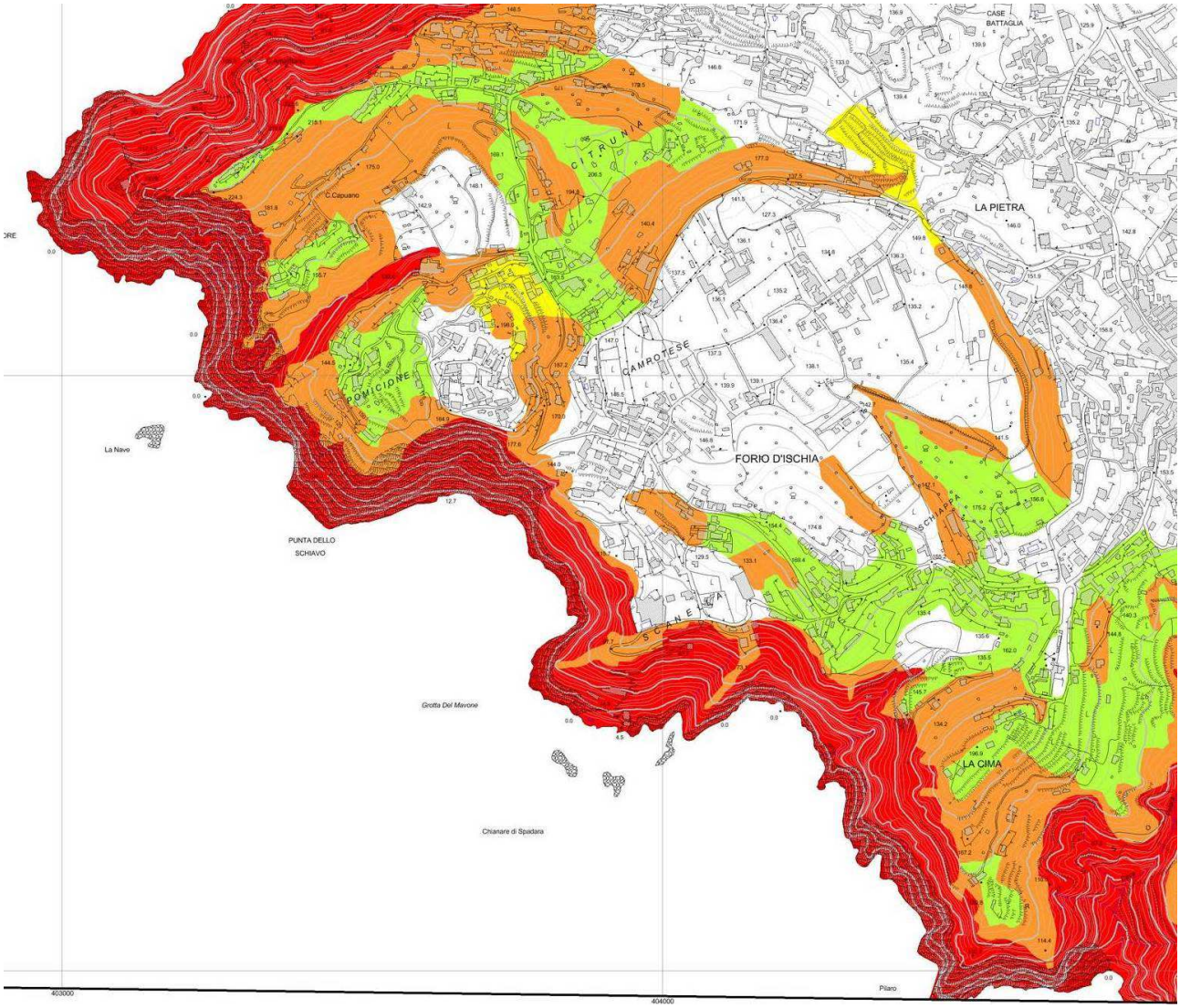



*Figura 57 - Stralcio Tavola 464074 della Carta della Pericolosità da frana del PSAI vigente.*

Nell'area di Campotese si evidenziano infine la presenza di orli di scarpate morfologiche naturali con dislivelli compresi tra i 10m ed i 20 metri e superiori ai 20 metri, creste, picchi isolati e cavità sepolte che possono causare possibili amplificazioni del moto sismico per effetti topografici e morfologici.

## 3.3 Assetto stratigrafico

Per la definizione dell'assetto stratigrafico delle principali unità affioranti sul territorio comunale di Forio si è fatto riferimento alle seguenti carte:

- Sbrana, A., Toccaceli, R.M. (2011) - Carta Geologica della Regione Campania alla scala 1:10.000. Foglio 464 Isola d'Ischia. Progetto CARG Campania, Assessorato Difesa del Suolo. Litografia artistica cartografica, Firenze. 216 pp + 1 carta (Figura 58 e Figura 59).
- Carta Geolitologica allegata allo studio "Primi interventi urgenti di protezione civile conseguenti all'evento sismico che ha interessato il territorio dei comuni di Casamicciola Terme, di Forio e di Lacco Ameno dell'Isola di Ischia il giorno 21 agosto 2017" (Allegato 1);
- Carta Geolitologica redatta per il Piano Urbanistico Comunale in scala 1:6000.

*Figura 58 – Carta Geologica della Regione Campania alla scala 1:10.000. Foglio 464 Isola d'Ischia. Progetto CARG Campania: porzione centro settentrionale dell'abitato.*

*Figura 59 - Carta Geologica della Regione Campania alla scala 1:10.000. Foglio 464 Isola d'Ischia. Progetto CARG Campania: porzione centro meridionale dell'abitato.*

Innanzitutto si riporta di seguito lo Schema dei rapporti stratigrafici tra le unità litostratigrafiche e le unità sintemiche dei depositi vulcanici ed epiclastici (da Foglio 464 Ischia, scala 1:10.000, Progetto CARG Regione Campania, 2011 - Figura 60) che permette di definire appunto i rapporti tra tutti i litotipi presenti sia in affioramento che nel sottosuolo del territorio comunale.

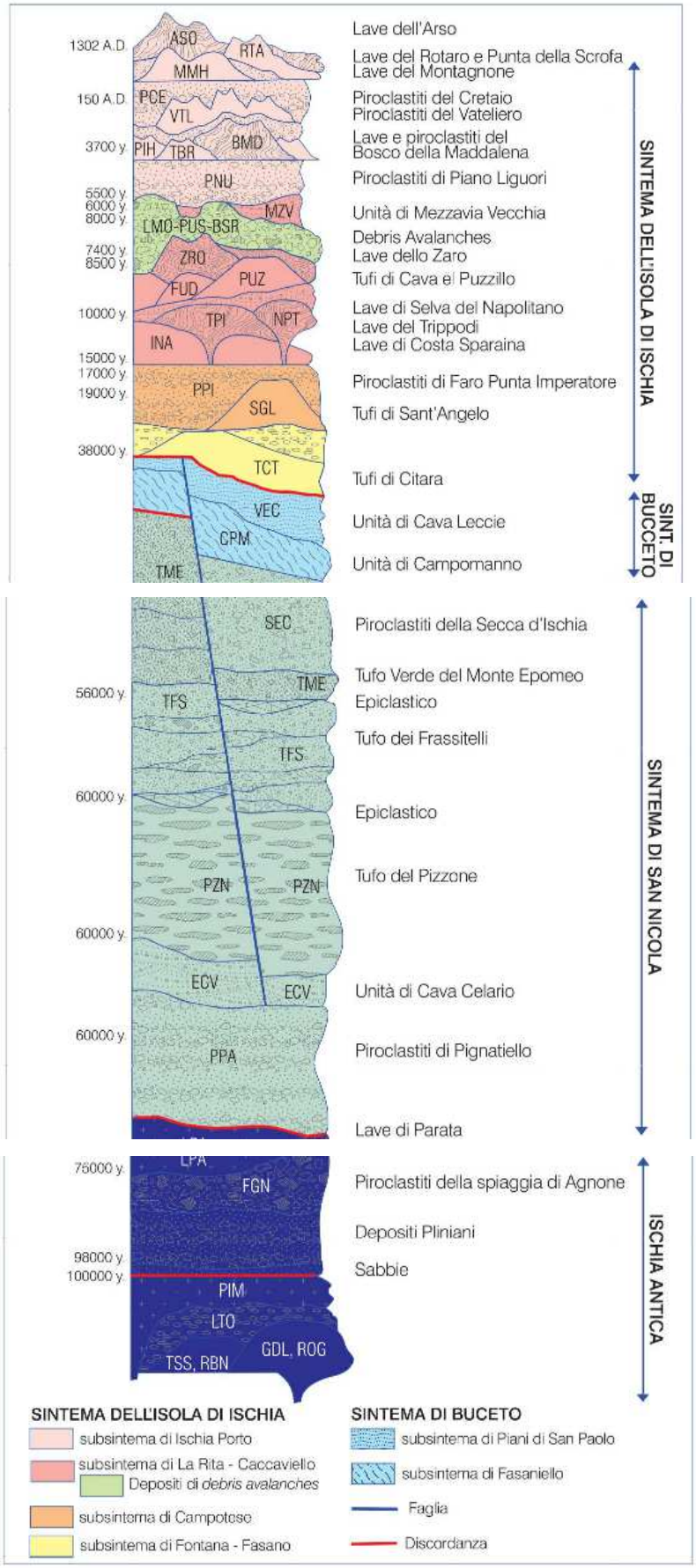



*Figura 60 - Schema dei rapporti stratigrafici tra le unità litostratigrafiche e le unità sintemiche dei depositi vulcanici ed epiclastici (da Foglio 464 Ischia, scala 1:10.000, Progetto CARG Regione Campania, 2011).*

Anche nel caso dell'assetto stratigrafico il territorio comunale può essere suddiviso in:

- area settentrionale (plateau di Zaro);
- area centro-occidentale (Forio e Citara);
- area centro-orientale (Monte Epomeo);
- area meridionale (Campotese).

A nord affiorano in prevalenza i termini lavici dello Zaro, generate da un flusso di lava molto viscoso di dimensioni notevoli e con spessore di circa 100 m. Caratterizzate da lava nera trachitica a blocchi, le lave di Zaro sono associate ad un deposito basale massivo di brecce piroclastiche, ricche in matrice cineritica grossolana di circa 20-25 m di spessore, contenente scorie trachitiche a testimonianza di un'eruzione esplosiva iniziale del centro eruttivo di Zaro cosi definiti nel CARG:

- ZRO1 - Lave dello Zaro, Membro di Punta Caruso – Lava nera trachitica, a blocchi contenente abbondanti inclusi mafici shoshonitici dello spessore di circa 80-100m.
- ZRO 2- Lave dello Zaro, Membro della Sciavica – Depositi massivi di brecce piroclastiche ricche in matrice cineritica grossolana dello spessore di circa 20-25m, contenenti scorie trachitiche dense molto porfiriche e sanidino, lapilli pomicei e inclusi mafici.

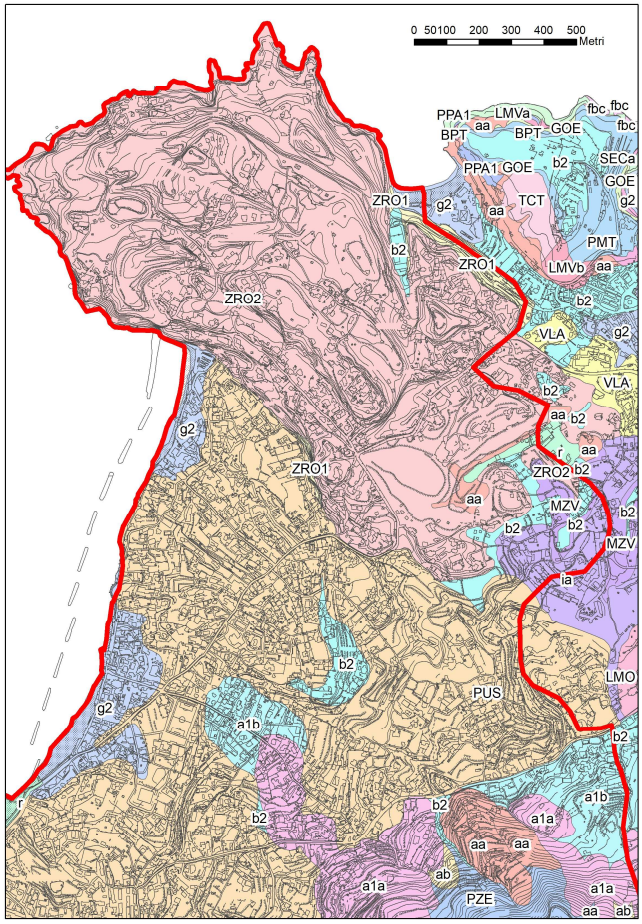



*Figura 61 - Unità litostratigrafiche presenti nella porzione centro settentrionale dell'abitato (ridisegnate da Sbrana et al., 2018).*

*Figura 62 Unità delle Lave dello Zaro: limite tra le lave nere trachitiche basali del membro di Punta Caruso (unità $ZRO_1$) e le sovrastanti brecce piroclastiche (membro della Sciavica, $ZRO_2$), esposto lungo il promontorio dello Zaro (spiaggia di San Francesco).*

*Figura 63 - Lave dello Zaro, Membro della Sciavica ($ZRO_2$), affioramento lungo via Calise.*

In località Punta Caruso è presente inoltre la discarica comunale, con spessori massimi pari anche a 20 metri.

*Figura 64 - Lave dello Zaro, Membro della Sciavica ($ZRO_2$): località Punta Caruso.*

*Figura 65 - Punta Caruso - Depositi di alterazione presenti al tetto delle lave trachitiche dello Zaro (Unità $ZRO_2$).*

Nella porzione centro-occidentale del territorio comunale affiora in maniera diffusa l'Unità di Punta del Soccorso (PUS) costituta da depositi epiclastici eterometrici formati da blocchi e megablocchi delle unità tufacee del sintema del Rifugio di San Nicola. Si tratta di depositi di debris avalanche del collasso gravitativo dei settori occidentali del monte Epomeo. L'Unità comprende facies ricche in matrice derivanti dal processo di disfacimento e fratturazione di blocchi e megablocchi. I depositi di Punta del Soccorso presentano evidenze nella parte esposta, lungo le falesie litorali, di elaborazione in ambiente marino. Sondaggi nell'area di Forio-S. Francesco evidenziano che questi depositi poggiano su sabbie marine che ricoprono i tufi gialli di Citara. All'interno dei depositi epiclastici è possibile individuare i grossi blocchi del Tufo Verde del Monte Epomeo. Verso mare affiorano i depositi sabbiosi della spiaggia di San Francesco.

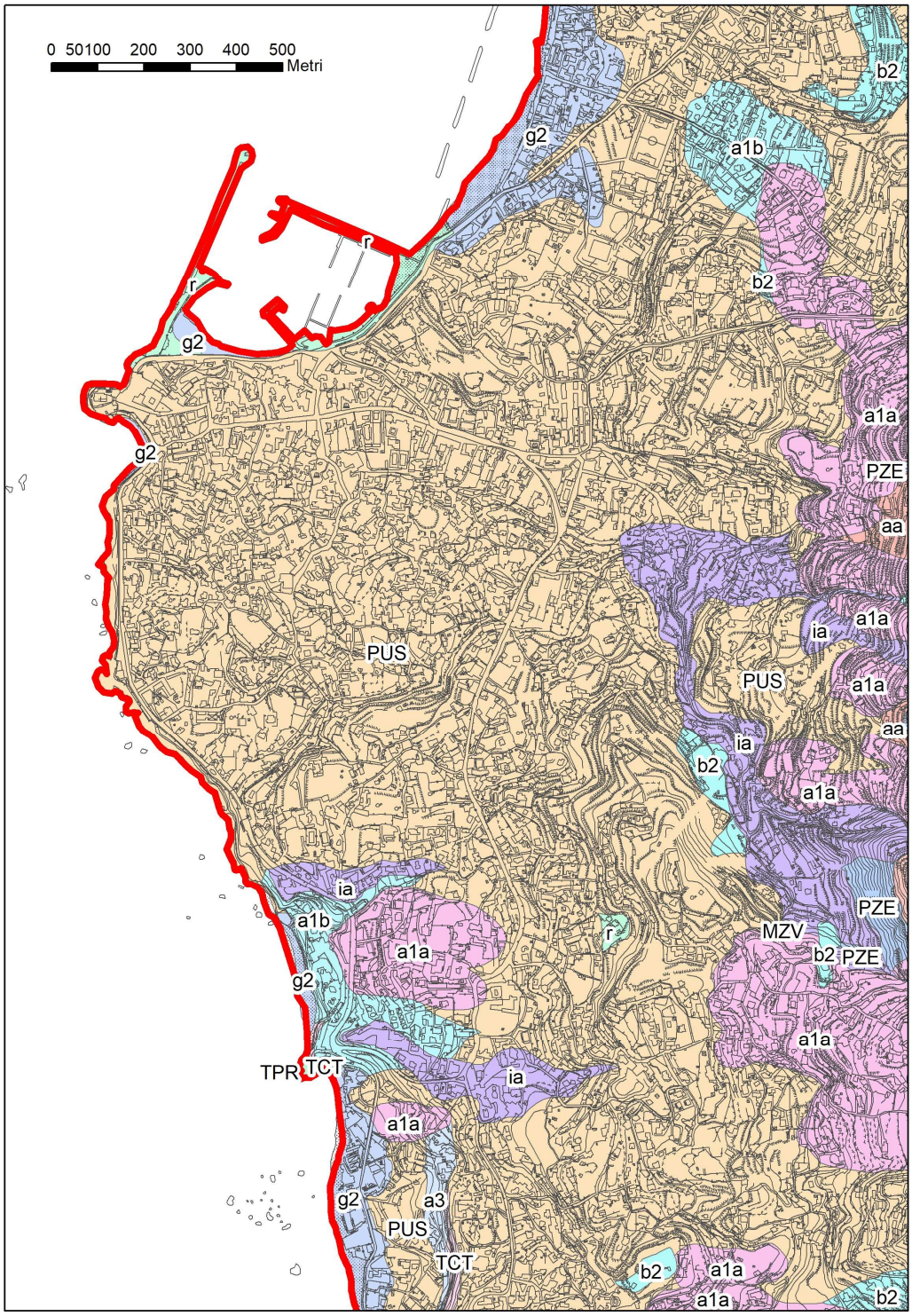



*Figura 66 - Unità litostratigrafiche presenti nel settore centrale dell'abitato (ridisegnate da Sbrana et al.., 2018).*

*Figura 67 - Unità di Punta del Soccorso (PUS): affioramento in parete esposta in prossimità del Municipio di Forio.*

*Figura 68 - Unità di Punta del Soccorso (PUS): Megablocco tufaceo (olistolite) inglobato all'interno di una parete di un edificio in loc. Monterone.*

Più a sud, nell'area di Citara, si denota l'affioramento lungo la parete della paleofalesia un'alternanza di strati medi e sottili di tufi ricchi in lapilli pomicei e livelli di tufi cineritici ricchi in lapilli accrezionali, biancastri-giallastri definiti come Tufi di Citara (Figura 69). A valle della paleofalesia si rinvengono i depositi sabbiosi della spiaggia di Citara (Figura 71). In loc. Cava dell'Isola – Pietre Rossa affiorano diffusamente accumuli gravitativi di versante e depositi di frana.

*Figura 69 -Unità dei Tufi di Citara (TCT): depositi stratificati a laminazione piano parallela, affioranti al piede della falesia inattiva ad est della spiaggia di Citara.*

*Figura 70 – Unità dei Tufi di Citara (TCT). Affioramento in loc. Pietre Rosse.*

*Figura 71 - Unità $g_2$: Depositi di spiaggia attuali e recenti costituiti da elementi eterometrici di sabbie medio fini e grossolane – spiaggia di Citara.*

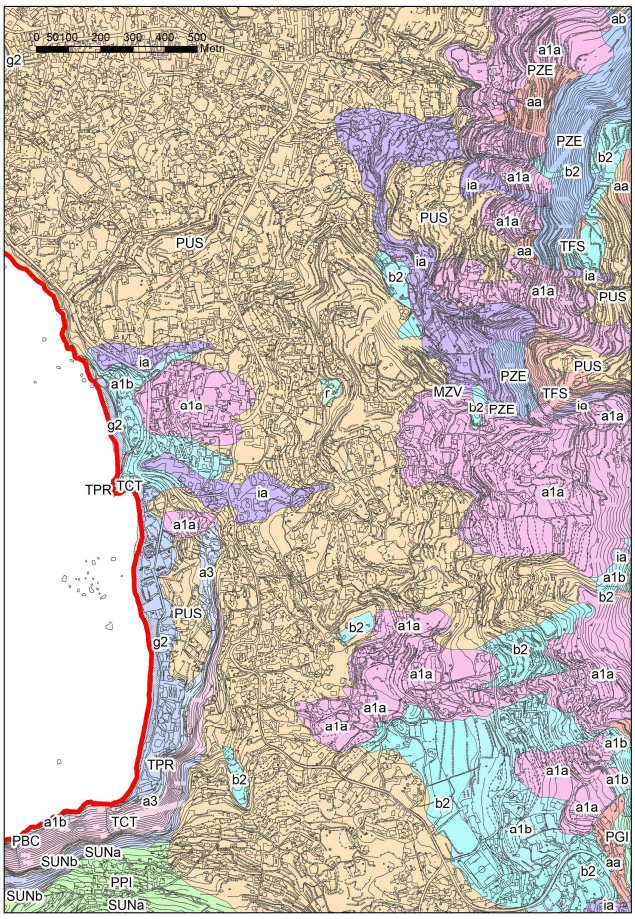



*Figura 72 - Unità litostratigrafiche presenti nel settore centrale dell'abitato (ridisegnate da Sbrana et al., 2018)*

Nella zona centro-orientale affiorano in maniera diffusa i depositi di versante eterometrici da minuti a grossolani (Figura 73), in matrice prevalentemente limo-argillosa e sabbiosa o clasto sostenuti e coltri eluvio colluviali costituite da limi sabbiosi e argillosi con scheletro detritico eterometrico da minuto a localmente grossolano. Si individuano inoltre i tufi massivi del Monte Epomeo (Figura 74), costituiti da tufi massivi di colore da verde chiaro, costituiti da lapilli e bombe pomicee e scoriacee trachitiche, porfiriche a sanidino centimetrico e biotite, subordinati clasti litici minuti e abbondanti cristalli di alcali feldspati centimetrici e biotite immersi in matrice cineritica e micropomicea, e i tufi del Pizzone, tufi massivi da fortemente saldati a saldati a tessitura eutaxitica, di colore grigio chiaro-verdastro chiaro costituiti da fiamme talora scoriacee fortemente porfiriche a sanidino di composizione trachitica, lapilli pomicei.

In quest'area affiorano nella zona delle Fumarole di Donna Rachele dei corpi lavici (Figura 75) attribuiti da Vezzoli (1988) alle Lave di Rione Bocca (133 ka), stratigraficamente anteriori al Tufo Verde del Monte Epomeo; tali corpi sono attribuiti da Sbrana & Toccaceli (2011) a una intrusione ipoabissale della Unità di Vagnulo-VNU, successiva al Tufo Verde del Monte Epomeo (60-55 ka).

*Figura 73 - Depositi di versante affioranti alle falde del Monte Epomeo (unità aa).*

*Figura 74 – Unità del Tufo Verde del Monte Epomeo (TME) in affioramento. Foto tratta dallo studio geologico allegato al PUC.*

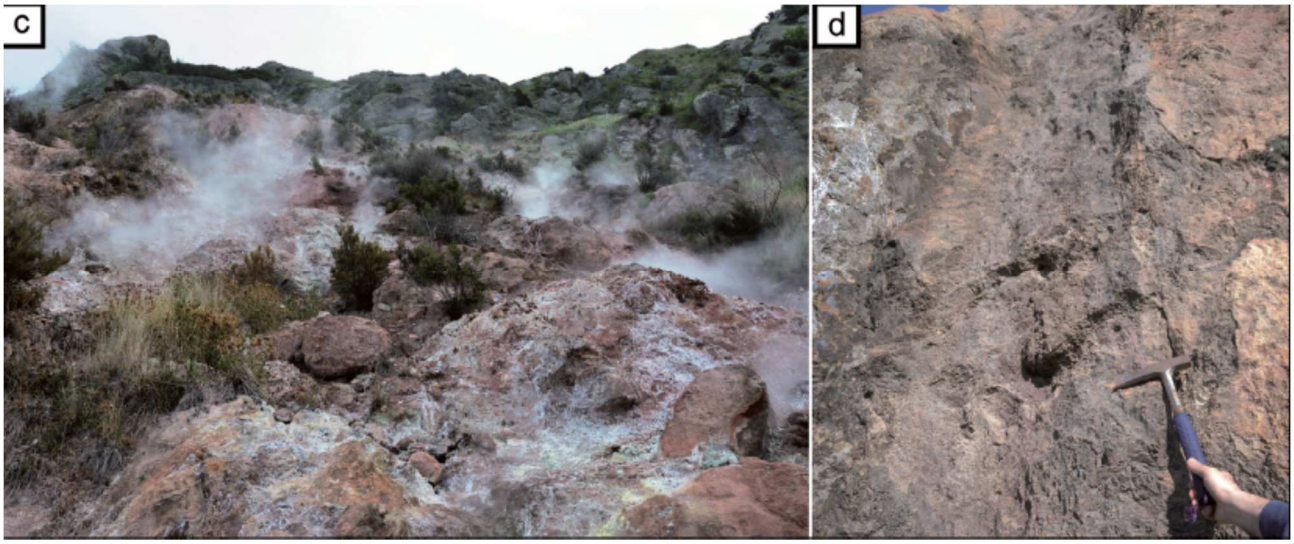



*Figura 75 - Unità di Vagnulo-VNU. (c) Fumarole di Donna Rachele, (d) Lave Trachitiche di Rione Bocca (Foto tratta da Della Seta et al. 2015).*

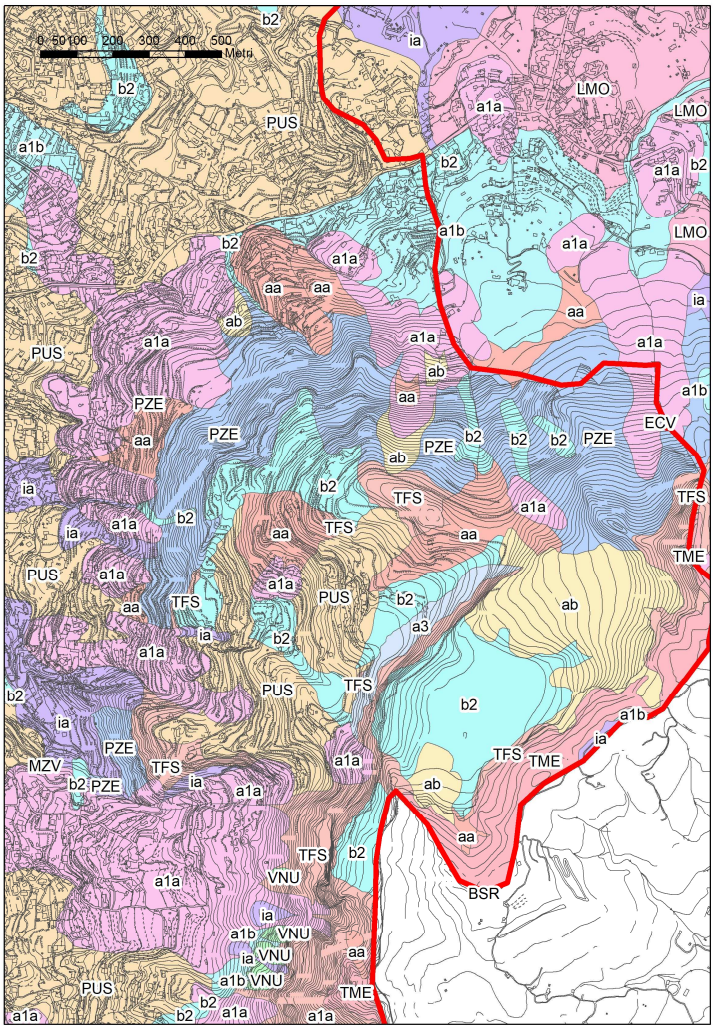



*Figura 76 - Unità litostratigrafiche presenti nel settore centro-orientale dell'abitato (ridisegnate da Sbrana et al., 2018).*

L'area meridionale di Panza – Campotese risulta significativamente differente dalle altre, con affioramenti di termini piroclastici primari (continue alternanze di livelli di ceneri da fini a grossolane, lapilli pomicei, litici e sabbie grossolane) che rappresentano i depositi piroclastici in giacitura primaria messi in posto durante l'attività vulcanica dell'area, e le lave trachitiche a geometria tabulare appartenenti al Sintema di Ischia Antica (Lave di Punta Imperatore e le Lave di Punta Chiarito-LCH, con età comprese tra 150 e 75 ka) e affioramenti lavici più recenti (ad esempio le lave del Pomicione).

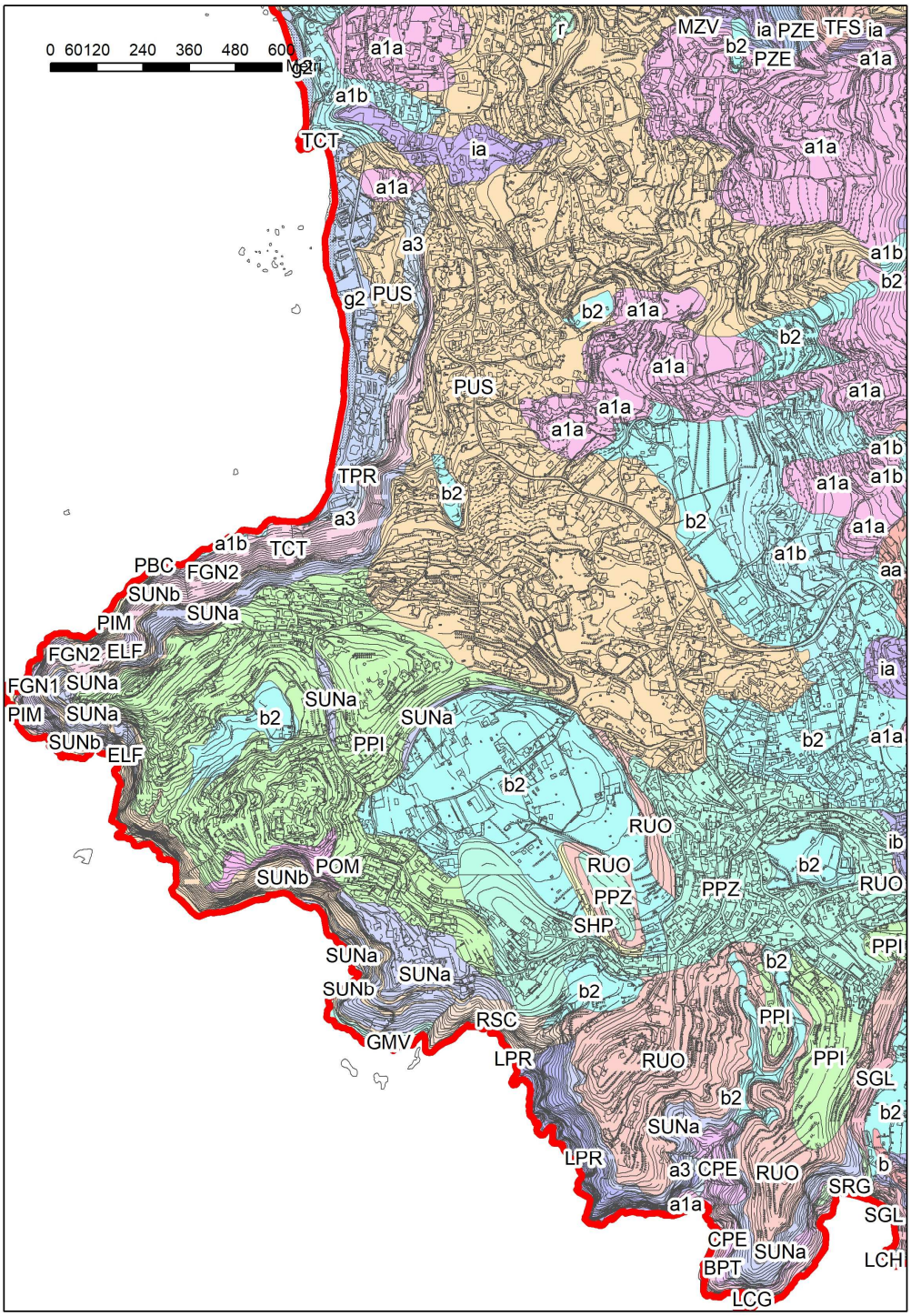



*Figura 77 - Unità litostratigrafiche presenti nel settore meridionale dell'abitato (ridisegnate da Sbrana et al., 2018).*

*Figura 78 - Piroclastiti dello Sgarrupo di Panza (SUN) affioramento lungo via Sorgeto.*

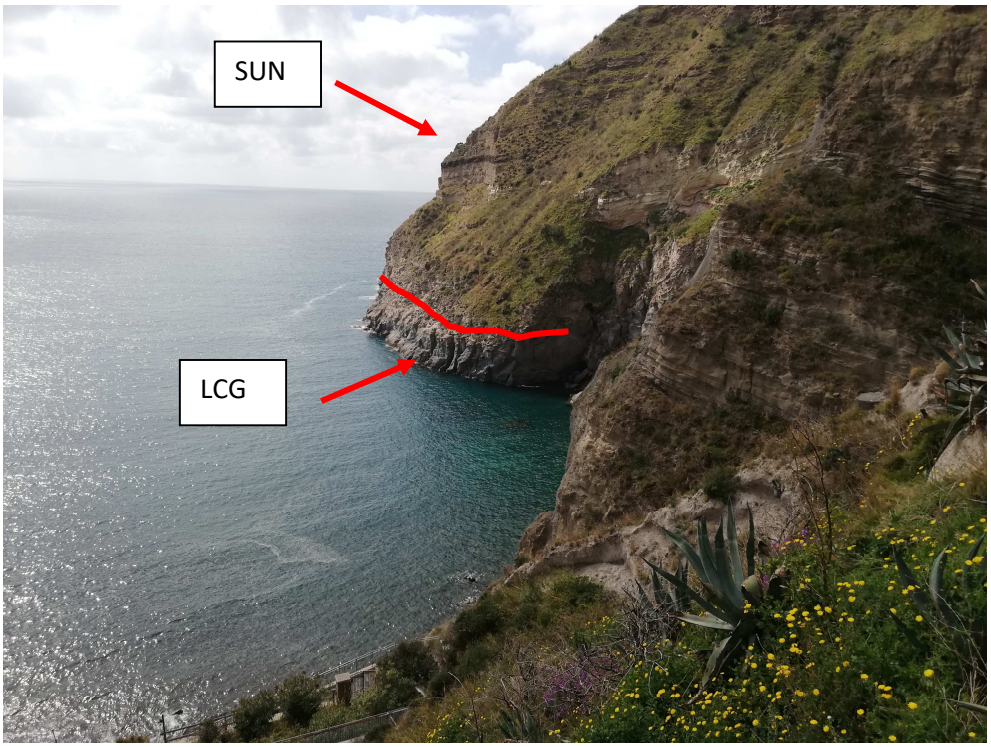



*Figura 79 - Lave di Capo Negro (LCG): tetto dell'unità esposto alla base dell'omonima falesia, ricoperta dall'unità delle Piroclastiti dello Sgarrupo di Panza (SUN).*

*Figura 80 – Piroclastiti di Russo (RUO). Depositi stratificati da grossolani a fini, affioranti lungo via Sorgeto.*

Di seguito si riepilogano tutti i depositi affioranti su tutto il territorio comunale suddivisi per codice Carg.

*Tabella 6 - Riepilogo depositi presenti nel territorio comunale di Forio.*

| Codice CARG | Descrizione |
|---|---|
| a1a | Accumuli gravitativi da frana di materiale eterogeneo ed eterometrico in matrice argillosa-sabbiosa e sabbiosa-limosa, poco addensati, grossolani, a struttura caotica |
| a1b | Depositi di antiche frane eterogenei a struttura da massiva a caotica composti prevalentemente da sabbie limose e argille, con scheletro detritico grossolano fino a dimensioni di blocchi, poco addensati |
| a3 | Detrito di falda – Depositi eterogenei ed eterometrici costituiti da clasti spigolosi di tufi, tufi saldati e lave, generalmente privi di matrice, non cementati, accumulati per gravità al piede di scarpate. |
| aa | Depositi di versante eterometrici da minuti a grossolani, in matrice prevalentemente limo-argillosa e sabbiosa o clasto sostenuti. I depositi si presentano moderatamente addensati e/o debolmente coesivi in ragione della componente argillosa. Si presentano con struttura massiva o stratificati |
| b | Depositi alluvionali eterogenei ed eterometrici sabbioso-limosi e argillosi, con scheletro detritico eterometrico da minuto a blocchi |
| b2 | Coltre eluvio colluviale costituita da limi sabbiosi e argillosi con scheletro detritico etero metrico da minuto a localmente grossolano, pedogenizzati al tetto |
| BPT | Breccia de il Porticello – Brecce piroclastiche prive di matrice cineritica, formate da lapilli e bombe pomicee, porfiriche a sanidino di colore da grigio a biancastro, a composizione trachitica, e da abbondanti litici di lave, lave idromineralizzate rosso-aranciate, tufi, sieniti. |
| CPE | Piroclastiti di Cava Pelara – Alternanza di strati plurimetrici di scorie saldate nerastre, di brecce ricche in bombe pomicee e scoriacee, clasti ossidianacei e lave, livelli di lapilli scoriacei di colore rossastro a composizione trachitica. |

| Codice CARG | Descrizione |
|---|---|
| FGN1 / FGN2 | Piroclastiti della Spiaggia di Agnone – alla base livelli di pomici pliniane con paleosuoli seguiti da breccia piroclastica arricchita in litici formata da lapilli e bombe pomicee trachitiche, fortemente porfirici a sanidino e biotite, blocchi lavici, lave idromineralizzate. |
| g2 | Depositi di spiaggia attuali e recenti costituiti da elementi etero metrici di sabbie medio fini e grossolane, a luoghi da ghiaie e ciottoli localmente inglobanti blocchi. Includono anche depositi limosi e argillosi di ambiente di retro spiaggia |
| GMV | Lave di Grotta del Mavone - Lave di Grotta del Mavone – Lave grigie fortemente porfiriche con cristalli centimetrici di sanidino, caratterizzati da inclusi cristallini subsferici formati da sanidino e biotite a composizione latitica. |
| h1 | Discariche, terreni di discarica e di re-interro |
| h3 | Opere di difesa costiera costituiti da blocchi e massi etero metrici fino alle dimensioni di qualche metro cubo, di natura lavica e calcarea |
| Ia | Depositi di origine mista debris flow e/o torrentizio costituiti da detriti da incoerenti a debolmente litificati, da massivi ricchi in matrice sabbiosa e limosa, a strutturati costituiti da sabbie grossolane, sabbie limose e ciottoli etero metrici, fino a blocchi di tufi, tufi saldati ed epiclastici localmente con lapilli pomicei e/o grossi blocchi lavici. |
| Ib | Depositi di origine mista debris flow e/o torrentizio costituiti da colate detritiche e fangose, di colore verdastro, da clasto sostenute a matrice sostenuti, formati da clasti di tufo verde, epiclastiti, tufi gialli e piroclastiti, strutturati. Poco addensati. |
| LCH | Lave di Punta Charito – Lave massive trachitiche grigie dello spessore di 50m del duomo di Punta Chiarito, fortemente fratturate, fagliate verso l'interno dell'isola. |
| LCG | Lave di Capo Negro – Lava di colore grigio, trachitica, porfitrica a sanidino e biotite |
| LPR | Lave del Pilaro – Lave trachitiche scoriacee nere alla base passanti a colate laviche massive di colore grigio scuro, interessate da un sistema di jointing pervasivo. Spessore circa 100m. Attività del duomo del Pilaro. |
| MZV | Unità di Mezzavia Vecchia - Successione marino-continentale di piana costiera. Include depositi alluvionali, costituiti da sabbie e argille sabbiose, terreni detritici caotici e depositi palustri intercalati a livelli piroclastici pomicei, scoriacei e cineritici. L'unità comprende sedimenti marini di spiaggia fossiliferi, attualmente sollevati a circa 55 m. slm. |
| PIM | Lave di Punta Imperatore – Lave trachitiche scoriacee, massive, grigie dello spessore di 5-30m. Sono modellate da una superficie erosiva sub-orizzontale marina a + 3 m s.l.m. ricoperta da lenti di sabbie marine al di sopra delle quali è presente un paleosuolo che le separa da depositi piroclastici |
| POM | Lave del Pomicione – Lave trachitiche massive di colore grigio chiaro del duomo-colate del Pomicione |
| PPI | Piroclastiti di Faro Punta Imperatore – Depositi stratificati di colore biancastro tendente al grigio, formati da alternanze di strati medi e sottili di lapilli e bombe pomicei, litici lavici e ossidiane e di livelli cineritici biancastri vescicolati e pisolitici a composizione trachitica. |
| PPZ | Piroclastiti di Panza – Cineriti stratificate, da fini a grossolane, con stratificazione da piano parallela a incrociata. Depositi di caduta e di correnti di densità piroclastica (surge) legati all'attività esplosiva dell'anello di cenere di Panza. |
| PUS | Unità di Punta del Soccorso - depositi epiclastici eterometrici formati da blocchi e megablocchi delle unità tufacee del sintema del Rifugio di San Nicola; strutture ad hummrock caratterizzano l'area di Forio. Si estendono nell'off-shore occidentale dell'isola per circa 4-5km. Si tratta di depositi di debris avalanche del collasso gravitativo dei settori occidentali del monte Epomeo. L'Unità comprende facies ricche in matrice derivanti dal processo di disfacimento e fratturazione di blocchi e megablocchi. I depositi di Punta del Soccorso presentano evidenze nella parte esposta, lungo le falesie litorali, di elaborazione in ambiente marino. Sondaggi nell'area di Forio-S. Francesco evidenziano che questi depositi poggiano su sabbie marine che ricoprono i tufi gialli di Citara. |

| Codice CARG | Descrizione |
|---|---|
| PZE | Tufo del Pizzone - Tufi massivi da fortemente saldati a saldati a tessitura eutaxitica, di colore grigio chiaro-verdastro chiaro costituiti da fiamme talora scoriacee fortemente porfiriche a sanidino di composizione trachitica, lapilli pomicei. Deposito di flusso piroclastico sedimentato in ambiente sottomarino. |
| r | Terreni di riporto |
| RSC | Lave del Rosicariello - Lava trachitica di colore grigio che forma la tozza e spessa colata (circa 100m) del duomo del Rosicariello |
| RUO | Piroclastiti di Russo – Successione di banchi da metrici a plurimetrici di lapilli pomicei ben classati di colore grigio biancastro, debolmente porfirici a sanidino, clasto-sostenuti, con subordinati livelli cineritici a composizione trachitica. |
| SGL | Tufi di Sant'Angelo – Alla base tufo breccia massivo ricco in litici in matrice cineritca e pomicea grossolana scarsamente consolidato. Seguono Tufi cineritico – pomicei di colore grigio giallastro litificati con strutture incrociate duniformi e frequenti impronte di impatto. Chiude un'alternanza di tufi stratificati piano-paralleli costituiti da livelli clasto-sostenuti. |
| SHP | Scorie saldate della Schiappa - Scorie saldate della Schiappa – Banchi di scorie saldate di colore nero alternate e passanti lateralmente a livelli di brecce pomicee grigie. Spessore intorno a 25 metri, Attività di fontana di lava lungo fratture lineari |
| SUC | Unità di Succhivo – Alla base depositi epiclastici di debris flow massivi, matrice-sostenuti, di colore prevalentemente verde scuro e verde chiaro grigiastro, composti prevalentemente da frammenti di Tufo Verde eterometrici, cineriti epiclastiche biancastre, pomici e frammenti lavici. |
| SUNa / SUNb | Piroclastiti dello Sgarrupo di Panza – L'unità comprende depositi di scorie saldate e brecce pomicee ed è suddivisa in due litofacies. Brecce di colore dal grigio nero al rossastro formate da bombe scoriacee e pomicee trachitiche e lapilli pomicei da massivi a grossolanamente stratificati contenenti litici lavici e tufacei (SUNb). Banchi di caduta decametrici di scorie trachitiche porfiriche a sanidino densamente saldate, passanti lateralmente a livelli di scorie saldate e potenzialmente saldate (SUNa). |
| TCT | Tufi di Citara – Alternanza di strati medi e sottili di tufi ricchi in lapilli pomicei e livelli di tufi cineritici ricchi in lapilli accrezionali, biancastri-giallastri. Verso la base strati di lapilli pomicei. Localmente si sviluppano slumping plurimetrici. Livelli a struttura incrociata di correnti di densità piroclastiche (surge). Composizione trachitica |
| TFS | Tufo del Frassitelli – Tufi cineritici giallastri e giallo-verdastri, idromineralizzati, massivi, contenti pomici e fiamme, scorie convolute ed appiattite, litici, lavici, tufi e sieniti. Si riconoscono almeno cinque unità di flusso di spessore pluridecametrico con alla base livelli lentiformi plurimetrici di brecce massive ricche in litici lavici. |
| TME | Tufo Verde del Monte Epomeo del Sintema del rifugio di San Nicola, dato da tufi massivi di colore da verde chiaro, costituiti da lapilli e bombe pomicee e scoriacee trachitiche, porfiriche a sanidino centimetrico e biotite, subordinati clasti litici minuti e abbondanti cristalli di alcali feldspati centimetrici e biotite immersi in matrice cineritica e micropomicea. Alla base dell'unità sono presenti livelli saldati e brecce ricche di litici. Il deposito piroclastico è idrotermalizzato in maniera pervasiva. Le pomici e la matrice cineritica originaria sono sostituite da un'associazione di minerali idrotermali di neoformazione di alta temperatura. Verso l'alto la granulometria del deposito tende a diminuire e la colorazione tende al giallo ocra. Lo spessore è di 200m circa. |
| VNU | Unità di Vagnulo - Corpi subvulcanici da spiniformi a tabulari, microcristallini, con rari fenocristalli di sanidino, a composizione trachitica. |
| ZRO1 | Lave dello Zaro, Membro di Punta Caruso – Lava nera trachitica, a blocchi contente abbondanti inclusi mafici shoshonitici dello spessore di circa 80-100m. |
| ZRO2 | Lave dello Zaro, Membro della Sciavica – Depositi massivi di brecce piroclastiche ricche in matrice cineritica grossolana dello spessore di circa 20-25m, contenenti scorie trachitiche dense molto porfiriche e sanidino, lapilli pomicei e inclusi mafici. |

## 3.4 Elementi tettonici (Faglie attive e capaci e potenzialmente attive e capaci)

L'assetto tettonico generale dell'Isola d'Ischia è stato già descritto nel Capitolo 3.1.
Le faglie con orientamento NE-SO e NO-SE (Acocello e Funiciello – 1999 - Figura 81) sono diffuse su tutta l'isola, sia ai bordi che in prossimità dell'Horst di Monte Epomeo, la continuazione delle suddette strutture verso mare è stata ricostruita dagli autori, pertanto le stesse sono verosimilmente correlabili ai sistemi regionali responsabili dell'estensione Plio-Quaternaria dei margini della Piana Campana.
Al contrario i sistemi di faglie con orientazione N-S e subordinatamente E-O si individuano esclusivamente ai bordi del blocco risorgente del Monte Epomeo, e dunque le stesse sono verosimilmente indotte dalla stessa risorgenza.
In particolare per il territorio comunale di Forio le faglie di importanza regionale presentano orientazione NO-SE e dislocano a nord il blocco del plateau di Zaro, mentre a sud la faglia rialza il complesso di Campotese a discapito dall'area di Forio. Localmente è possibile individuare altre faglie ad orientazione NO-SE che determinano l'individuazione del graben di Forio – Citara, suddiviso localmente dal piccolo host di Pietre Rosse (vedi Carte Geologico – Tecniche e Sezioni).
I sistemi di faglie ad orientazione circa NE-SO, N-S e NNO-SSE dislocano invece il blocco dell'Horst del Monte Epomeo contribuendo anche a determinare la significativa presenza di instabilità gravitative anche profonde (come ad esempio la DPGV di Monte Nuovo originatosi a seguito di un catastrofico evento vulcano-tettonico verificatosi durante le ultime fasi di sollevamento).

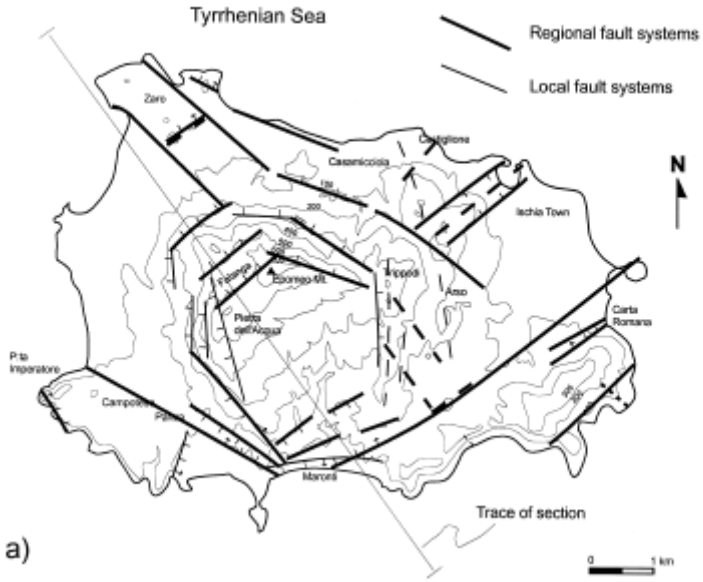



*Figura 81 - Mappa strutturale dell'isola d'Ischia (da Acocello e Funiciello 1999).*

È stata inoltre verificata l'assenza di faglie capaci nel territorio oggetto di studio consultando il catalogo delle faglie capaci ITHACA "ITaly HAzard from CApable faults" disponibile online dal sito internet della S.G.I.. http://sgi2.isprambiente.it/ithacaweb/viewer (Figura 82).

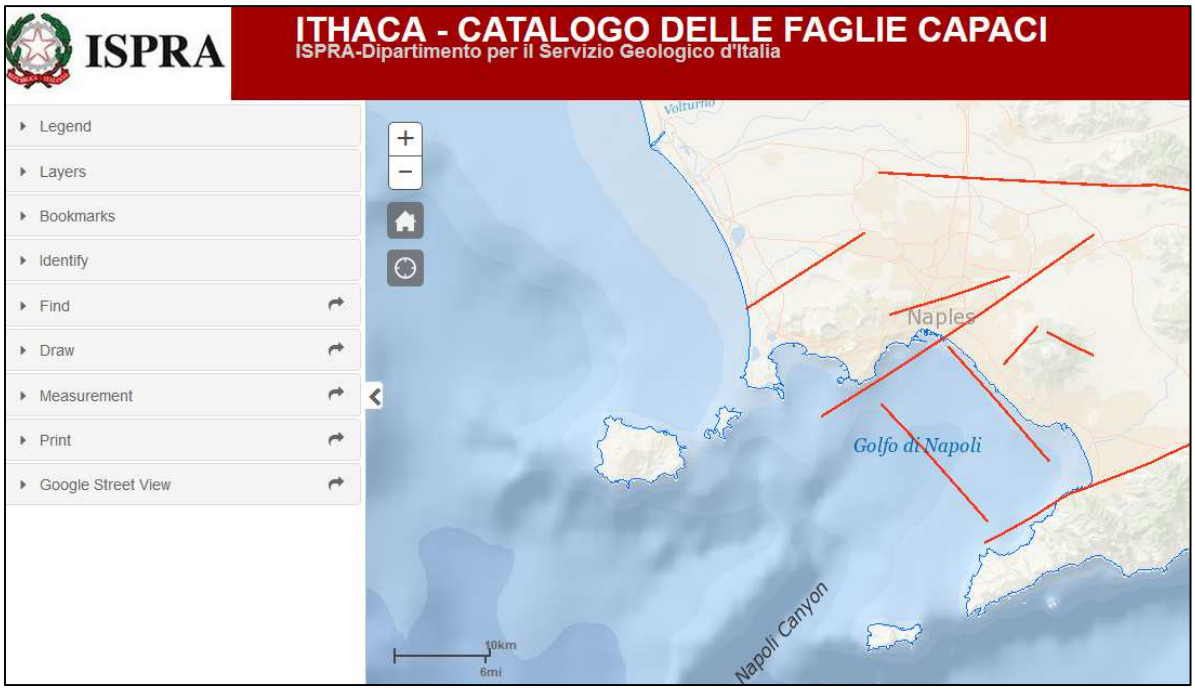



*Figura 82 - Faglie attive e capaci, da [http://sgi2.isprambiente.it/ithacaweb/viewer/.](http://sgi2.isprambiente.it/ithacaweb/viewer/)*

## 3.5 Considerazioni finali sull'architettura stratigrafica e sull'assetto morfologico e strutturale

La struttura del territorio comunale di Forio è fortemente condizionata da tre fattori prevalenti:

1) Il vulcanismo ischitano, con la messa in posto dei depositi lavici/piroclastici di Zaro e Campotese-Panza e dei depositi ignimbritici dei Tufi del Monte Epomeo e del Tufo di Citara ed in funzione dell'evoluzione vulcano tettonica dell'Isola, con il sollevamento del blocco centrale ed il ribassamento del blocco laterale;
2) Il sistema di faglie che consentono di suddividere il territorio in aree ben definite:
    a. Zaro;
    b. Forio – Citara;
    c. Monte Epomeo;
    d. Campotese – Panza;
3) I diffusi fenomeni di debris avalanche, debris flow e lahar relativi ai continui collassi del Monte Epomeo e che costituiscono la genesi dei terreni di copertura di graben parte dell'area centrale del territorio comunale (Figura 83).

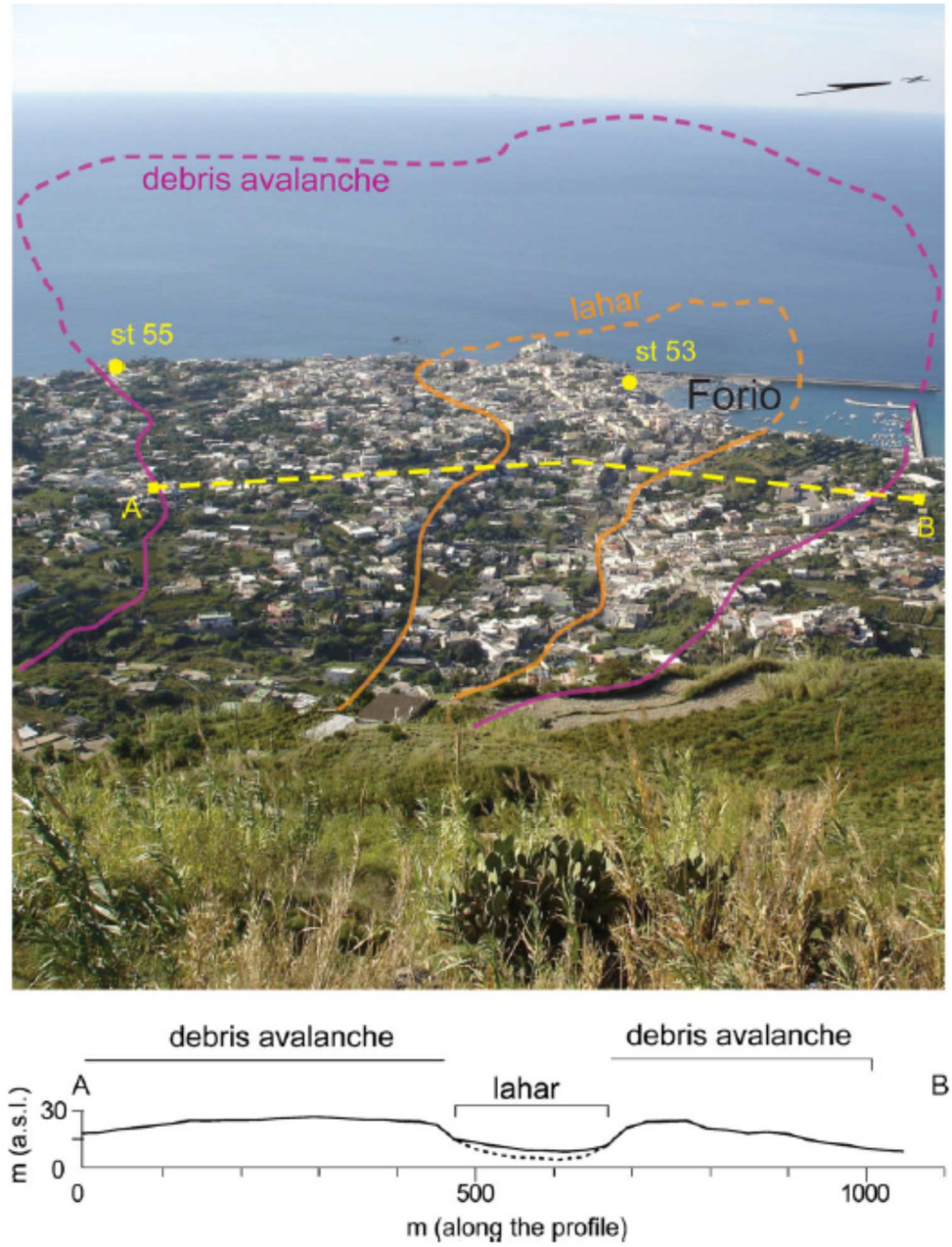



*Figura 83 - Deposito di lahar che ricopre i depositi di debris avalanche nel centro di Forio - Della Seta et al. 2015*

Le criticità individuate sono da ricondurre anzitutto ai possibili effetti di amplificazione indotti dalla presenza di condizioni morfologiche e topografiche relativi alla presenza di falesie, paleofalesie, scarpate e versanti con dislivelli e pendenze importanti ed alla possibilità di effetti cosismici legati alla possibilità che si verifichino frane sismoindotte, in particolar modo per la presenza della deformazione gravitativa profonda di versante di Monte Nuovo. A tal proposito Del Prete e Mele (2006) riportano i seguenti fenomeni da frana che secondo le fonti da loro consultate associano i fenomeni gravitativi ad eventi sismici:

*Tabella 7 - Eventi franosi storici per il comune di Forio correlabili a terremoti (da Del Prete e Mele – 2006).*

| N. | Località | Data | Tipologia | Cause | Depositi coinvolti |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Mt. Nuovo - Monterone | IV sec. a.C. | D.G.P.V. e colate detritiche | Terremoto - eruzione | Tufo Verde e depositi di età successiva |
| 2 | Bocca di Serra - Citara | II – III sec. d.C. | scorrimento traslativo evolvente a colata | Terremoto | Tufo Verde e depositi Detritici |
| 3 | Versanti settentrionale e nord occidentale Mt. Epomeo | 28 luglio 1883 | Molte piccole colate e crolli | Terremoto | Tufo Verde, depositi detritici e di Colle Jetto alterati |

Altra criticità riscontrata è la presenza di contatti sia stratigrafici che strutturali tra unità geologiche a differente rigidezza. In particolar modo le differenze maggiori sono legate alla presenza delle unità laviche compatte della zona di Campotese – Panza e di Zaro che a luoghi sono direttamene mantellate dalle unità piroclastici sciolte. Inoltre il complesso di faglie determina un sistema a host e graben che a luoghi permette di mettere a contatto litotipi con caratteristiche differenti.
A significative profondità (superiori ai 100m dal p.c.) è possibile denotare la presenza di depositi a comportamento non omogeno, in funzione della presenza della circolazione di fluidi ad elevata temperatura tipici dell'isola d'Ischia. In tali punti i depositi tufacei possono presentare un significativo decadimento delle proprietà sismiche e geomeccaniche.
Nella piana di Forio si individuano pure diversi livelli idrici (falde acquifere) con superficie piezometrica suborizzontale.

## 4. Dati geotecnici e geofisici

Lo studio di Microzonazione Sismica di livello 3 svolto per il Comune di Forio è stato redatto considerando:

- I dati bibliografici forniti dall'Amministrazione Comunale;
- I dati della campagna d'indagini geofisiche relativa al progetto "Primi interventi urgenti di protezione civile conseguenti all'evento sismico che ha interessato il territorio dei comuni di Casamicciola Terme, di Forio e di Lacco Ameno dell'Isola di Ischia il giorno 21 agosto 2017" svolta nei mesi di Ottobre e Novembre 2017 dal gruppo di Lavoro INGV;
- Dati individuati nelle pubblicazioni scientifiche consultate;
- Indagini prodotte ex-novo

Le indagini considerate sono state complessivamente 219, di cui 189 siti puntuali e 30 siti lineari, sparse sull'intero territorio comunale.
I dati geologico-tecnici raccolti ed archiviati nel presente studio comprendono:

- n. 18 sondaggi a carotaggio continuo, di cui 8 con prelievo di campioni;
- n. 4 sondaggi a distruzione di nucleo;

- n. 124 stazioni di microtremore a stazione singola (HVSR);
- n. 3 array sismico (ESAC_SPAC);
- n. 8 prove penetrometriche dinamiche pesanti (DP);
- n. 5 prove sismiche in foro Down-Hole (DH);
- n. 11 profili sismici a rifrazione (SR);
- n. 19 prospezioni sismiche MASW;
- n. 1 sondaggi a carotaggio continuo per una lunghezza complessiva di 60 metri dal p.c., con prelievo di 4 campioni indisturbati e prove penetrometriche in foro (SPT);
- n. 1 prova sismica in foro Down-Hole fino alla profondità di 50 m dal p.c..

## 4.1 Dati pregressi

La prima fase di lavoro è stata caratterizzata dalla raccolta e dall'analisi di tutti i dati disponibili sul territorio comunale finalizzati alla costruzione stratigrafica, attribuzione dei parametri geotecnici ai litotipi presenti ed in particolare allo scopo di definire il modello geologico del sottosuolo del territorio oggetto di studio.

Le indagini pregresse considerate, derivanti dal P.R.G. e dalle relazioni geologiche fornite dall'Amministrazione comunale, si riferiscono alle seguenti prove geognostiche e geofisiche:

a. Studio geologico allegato al PRG (anno 2000), a cui sono allegati n.8 stratigrafie di sondaggi a carotaggio continuo con prove SPT, n.4 DH in foro di sondaggio, n° 20 prove di laboratorio su campioni indisturbati, n° 11 stendimenti di sismica a rifrazione;
b. N° 2 sondaggi geognostici a carotaggio continuo, n° 17 prove di laboratorio, n° 2 sondaggi geognostici a distruzione di nucleo eseguiti per studi geologici precedenti al PRG;
c. N° 2 pozzi profondi eseguiti per scopi geotermici (anno 1989);
d. N° 3 prove DPSH e n° 1 prova sismica MASW eseguite per lo studio geologico – tecnico per il progetto di ripristino della sentieristica collinare del tronco viario "Selva della Quercia" e strade limitrofe (anno 2012);
e. N. 1 sondaggio geognostico a carotaggio continuo, n. 1 prova penetrometrica dinamica DPSH e n. 1 prospezione sismica MASW eseguiti per lo studio geologico – tecnico del progetto di recupero e valorizzazione del molo peschereccio interno al molo turistico (anno 2015);
f. N. 1 prova penetrometrica dinamica DPSH e n. 1 prospezione sismica HVSR eseguite per lo studio geologico – tecnico dei lavori di riqualificazione del Piazzale di Citara (anno 2016);
g. N. 2 prove penetrometriche dinamiche DPSH e n. 1 prospezione sismica HVSR eseguite per lo studio geologico – tecnico per il progetto di recupero e valorizzazione del lungomare della spiaggia di Citara (anno 2016);
h. N. 2 sondaggi (pozzi SAFEN) estratti dalla Rivista AMRA "Ambiente Rischio Comunicazione" di luglio 2016

i. N. 1 Sondaggio geognostico a carotaggio continuo con campioni indisturbati e prove SPT in foro, n. 3 prove penetrometriche dinamiche DPSH e n. 1 prospezione sismica MASW eseguiti per la verifica sismica del plesso scolastico D'Abundo;
j. N. 1 Sondaggio geognostico a carotaggio continuo eseguito per il plesso scolastico D'Abundo;
k. N. 1 Sondaggio geognostico a carotaggio continuo, n. 2 prove penetrometriche dinamiche DPSH per la verifica sismica del plesso scolastico Balsofiore;
l. N. 1 Sondaggio geognostico a carotaggio continuo, n. 3 prove penetrometriche dinamiche DPSH e n. 1 prospezione sismica MASW per la verifica sismica del plesso scolastico Santa Caterina;
m. N. 1 DH eseguita per la realizzazione di un parcheggio Interrato - anno 2005;
n. N. 1 Sondaggio geognostico a carotaggio continuo con prelievo di n° 2 campioni indisturbati e n. 1 prospezione sismica MASW per la verifica sismica del plesso scolastico Avallone;
o. N. 1 MASW in via Punta Chiarito;
p. N. 1 MASW in via Matteo Verde;
q. N. 1 MASW in via San Francesco;
r. N. 10 HVSR effettuate per la pubblicazione "High-resolution geological model of the gravitational deformation affecting the western slope of Mt. Epomeo (Ischia)" di Della Seta et alii, 2015.

Per lo studio *"Primi interventi urgenti di protezione civile conseguenti all'evento sismico che ha interessato il territorio dei comuni di Casamicciola Terme, di Forio e di Lacco Ameno dell'Isola di Ischia il giorno 21 agosto 2017"* sono state effettuate un numero importante di indagini geofisiche nei mesi di Ottobre e Novembre 2017 dal gruppo di Lavoro nei territori comunali interessati.
In particolare per Forio sono state eseguite:

1. n. 89 indagini HVSR utilizzando stazioni sismiche temporanee.

Tutte le informazioni disponibili in merito alle suddette indagini sono archiviate nel database CdI_Tabelle nella cartella Forio_41/Indagini.

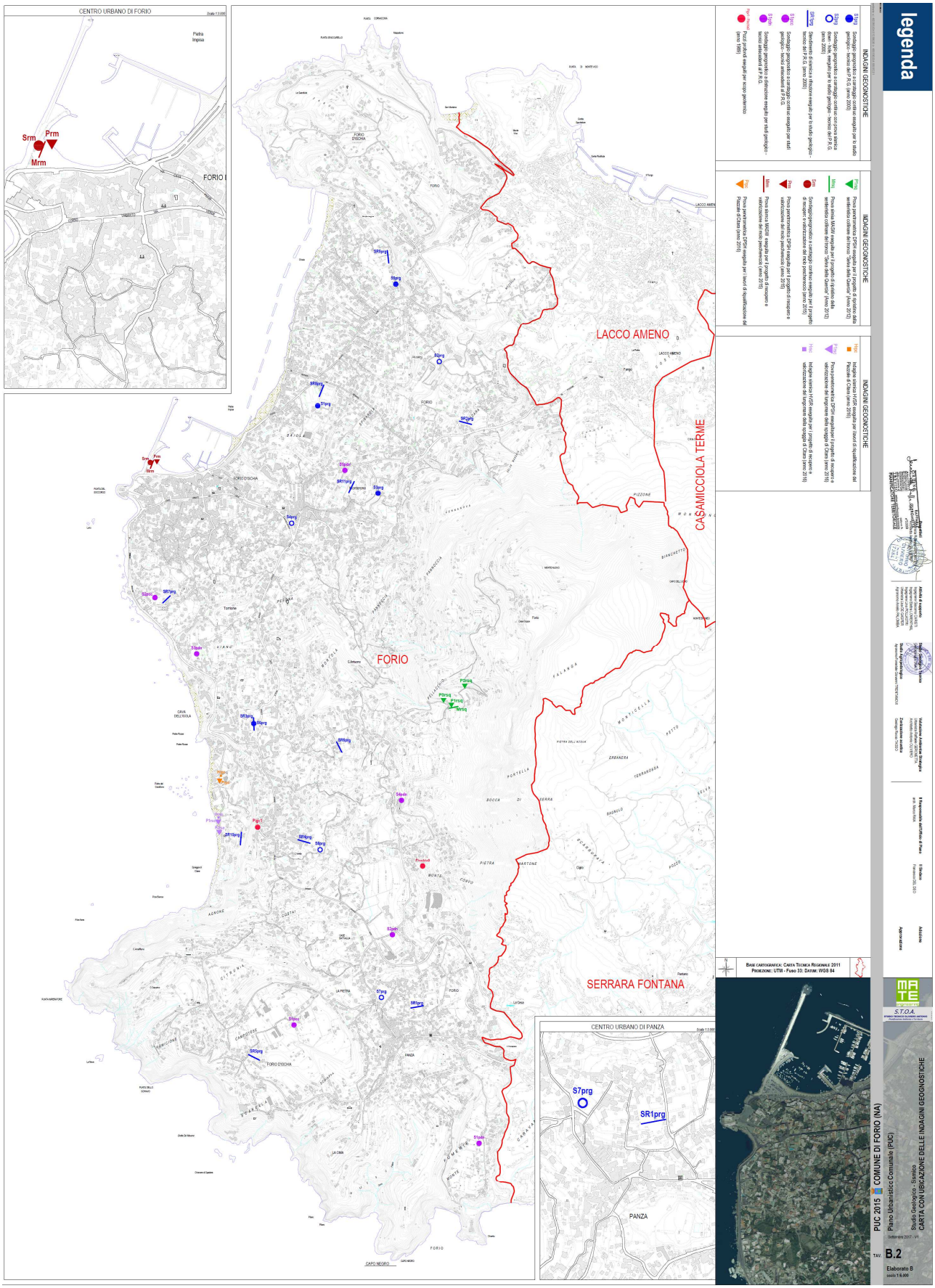



*Figura 84 - Tavola con ubicazione delle indagini bibliografiche tratta dal PUC.*

## 4.2 Dati acquisiti ex-novo

Negli I.C.M.S. è riportato che la finalità delle indagini geotecniche negli studi di Microzonazione Sismica è pervenire alla conoscenza dettagliata dello stato del sito e dei terreni presenti nell'area prima, durante e dopo il terremoto di riferimento attraverso lo studio delle condizioni naturali del terreno in sito mediante sondaggi, prove geotecniche di tipo corrente (CPT, SPT, DMT, ecc…) e prove dinamiche (CH, DH, SASW, MASW, ecc...) e mediante la riproduzione in laboratorio delle condizioni di sollecitazione e deformazione più prossime a quelle che possono aversi in occasione del terremoto di riferimento.
Sono quindi indagini estremamente mirate, che devono contribuire a definire tutte le caratteristiche morfologiche, stratigrafiche, idrogeologiche, e che, soprattutto, devono identificare il comportamento dinamico dei vari terreni presenti nel sito, assegnando dei valori ai parametri dinamici indispensabili per la valutazione della risposta del sito mediante modelli analitici e numerici.
Il programma delle indagini geotecniche va perciò commisurato, oltre che al problema sismico e geotecnico, anche ai codici di calcolo che verranno impiegati nelle analisi numeriche (Microzonazione Sismica di livello superiore al 1°) e sarà differente per i diversi problemi (analisi della risposta sismica locale, stima del potenziale di liquefazione, analisi della stabilità dei pendii, valutazione dei cedimenti) e per i livelli di approfondimento degli studi di Microzonazione Sismica.

La campagna di indagini specifica per le attività di Microzonazione Sismica di Terzo Livello (campagna di indagini di tipo geognostico e geofisico), preventivamente concordata con il Centro per la Microzonazione Sismica con il CNR-IGAG, è consistita nell'esecuzione di:

- ✓ N° 1 sondaggio a carotaggio continuo, con prelievo di campioni indisturbati per analisi di laboratorio, esecuzione di prove SPT in foro ed attrezzato con tubazione in PVC per l'esecuzione di prospezione geofisica tipo Down-Hole;
- ✓ n° 11 prospezioni sismiche superficiali M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves ovvero Analisi Multicanale delle onde Superficiali di Rayleigh);
- ✓ n° 25 indagini di sismica passiva a stazione singola HVSR (microtremore ambientale);
- ✓ n° 3 array sismici bidimensionali, effettuati dal gruppo di lavoro del Centro MS.

*Tabella 8 - Riepilogo nuove indagini.*

| Numero | Sigla | Descrizione |
|---|---|---|
| **1** | **S** | Sondaggio a carotaggio continuo spinto alla profondità di 60 m |
| **1** | **DH** | Prospezioni sismiche in foro di tipo *Down Hole fino alla profondità di 50 m* |
| **5** | **SPT** | Prove penetrometriche SPT in foro lungo il sondaggio |
| **4** | **SC** | Prelievo di 4 campioni indisturbati |
| **25** | **HVSR** | Stazioni di microtremore a stazione singola (HVSR) |

| Numero | Sigla | Descrizione |
|---|---|---|
| **11** | **MASW** | Prospezioni sismiche tipo MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) |
| **3** | **ESAC_SPAC** | Array sismico |

Le indagini di tipo geognostico e geofisico sono state da noi eseguite rispettando le indicazioni dei ''Protocolli di acquisizione dati ed elaborazione relativi alle attività di Microzonazione di Livello III.." volte a:

- evidenziare possibili criticità;
- delineare procedure rispettose dello "stato dell'arte" e ridurre possibili margini di errore nella pianificazione delle indagini e nella esecuzione ed interpretazione delle misure;
- ottimizzare il coordinamento complessivo delle attività con l'obiettivo di garantire un buon livello di omogeneità dei risultati ottenuti.

Lo scopo di queste indagini è stato quello di ricostruire il profilo di velocità delle onde S all'interno delle diverse MOPS e quindi di definire i valori di Vs da attribuire ai diversi corpi geologici presenti (sismostratigrafia). Inoltre le prospezioni di tipo geofisico eseguite hanno contribuito al completamento ed alla validazione del modello geologico soprattutto per quanto riguarda le geometrie sepolte dei corpi geologici individuati.

Tutte le prove pregresse e nuove, di tipo geognostico, geofisico e geotecnico, sono riportate negli shape files relativi alla carta delle indagini e illustrate nell'allegato cartografico "Carta delle Indagini" in scala 1:5.000.
Tutte le informazioni disponibili in merito alle suddette indagini sono archiviate nel database CdI_Tabelle nella cartella Forio_41/Indagini.

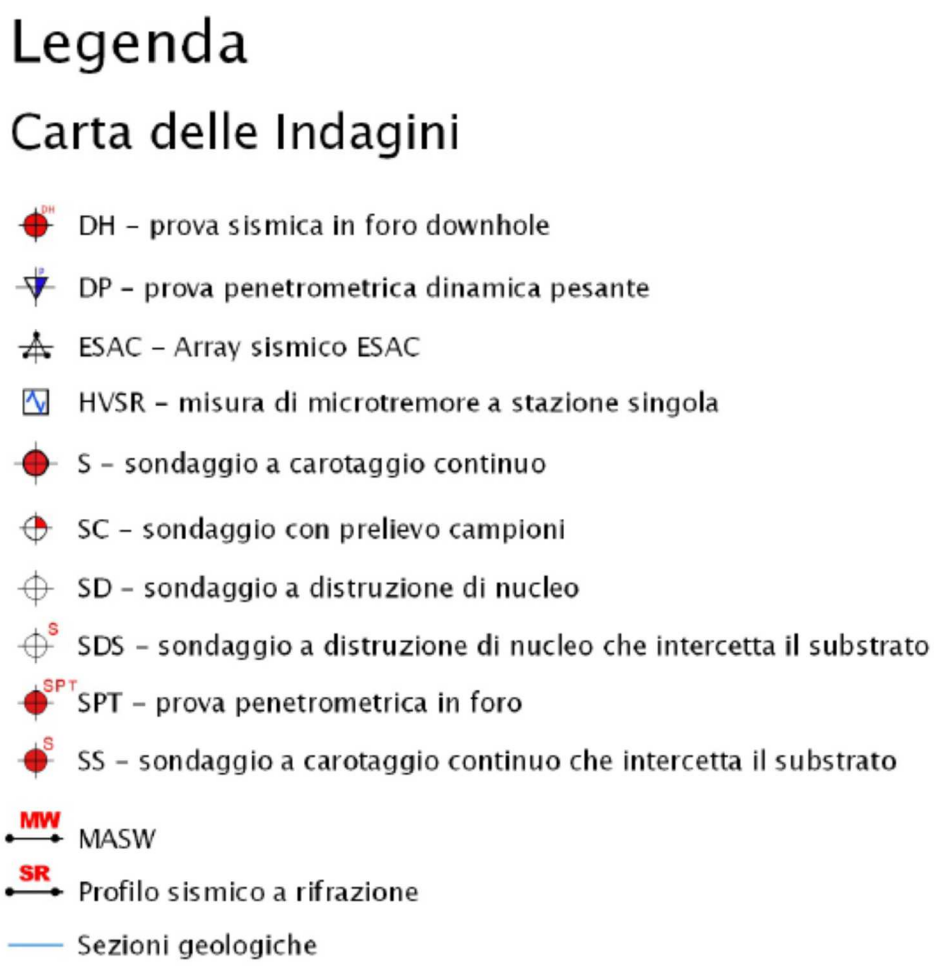



*Figura 85 – Legenda della ''Carta delle Indagini'' eseguita per lo studio di MS3.*

**Sondaggi geognostici a carotaggio continuo**

Lo scopo fondamentale delle indagini geognostiche per la Microzonazione Sismica (MS) è la ricostruzione di un Modello Geologico del sottosuolo che faccia da riferimento a tutte le elaborazioni successive, definendo i vincoli essenziali alla caratterizzazione in prospettiva sismica.

Per il presente studio, di concerto con il gruppo di lavoro del Centro MS, è stato eseguito un solo sondaggio geognostico a carotaggio continuo allestito per l'esecuzione di una prova sismica in foro di tipo Down-Hole, spinto fino alla profondità di 60m dal p.c. e condizionato per prova DH fino alla profondità di 50 metri dal p.c.. Il sondaggio più profondo è stato effettuato a sostituzione di n. 2 sondaggi spinti fino alla profondità di 35m dal p.c. (cfr. Protocolli) con l'obiettivo di caratterizzare il numero massimo di litotipi, lungo due delle sezioni geologico- tecniche realizzate (sezioni AA' e DD).

Lo stesso è stato effettuato presso il Palazzetto dello Sport alla via Casale in loc. Baiola (Coordinate del punto nel sistema di coordinate geografico UTM-WGS84: Latitudine 40.739815° - Longitudine 13.866924°) in modo da caratterizzare in maniera adeguata l'area di MS di III livello del centro di Forio, tenendo conto della logistica necessaria all'esecuzione dell'indagine, ivi compresa la sicurezza degli operatori, oltre in ottemperanza alla Legge regionale n. 8 del 29 luglio 2008 "Disciplina della ricerca ed utilizzazione delle acque minerali e termali, delle risorse geotermiche e delle acque di sorgente" e successive modificazioni (LL.RR. 3/2017 e 10/2017) e Regolamenti n. 10/2010 e n. 12/2011.

*Figura 86 – Fase di esecuzione sondaggio DH1.*

*Figura 87 - Fase di esecuzione sondaggio DH1.*

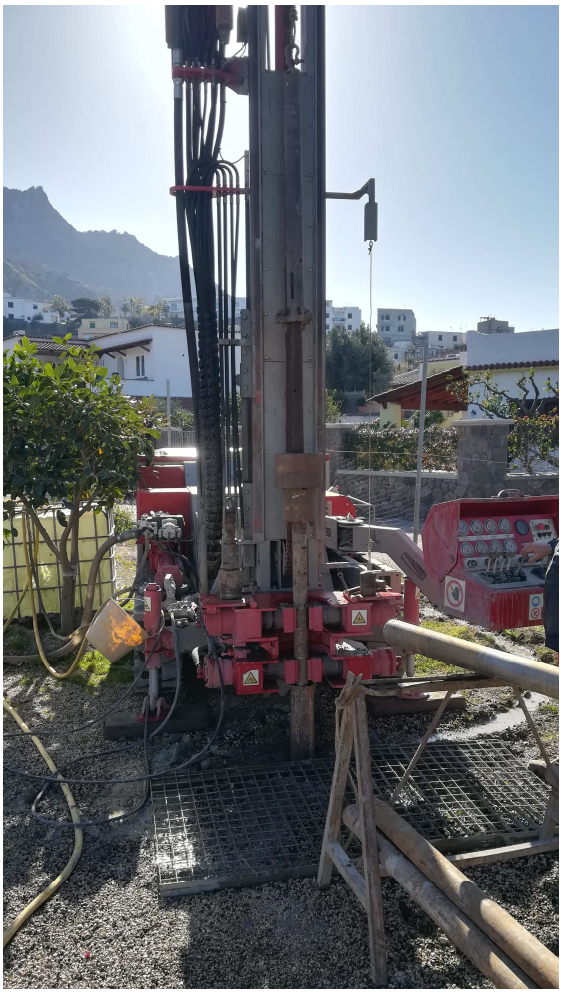


*Figura 88 - Fase di esecuzione sondaggio DH1.*

La stratigrafia dettagliata del sondaggio geognostico a c.c. eseguito è di seguito riportata e con maggior dettaglio grafico allegata alla presente relazione illustrativa.

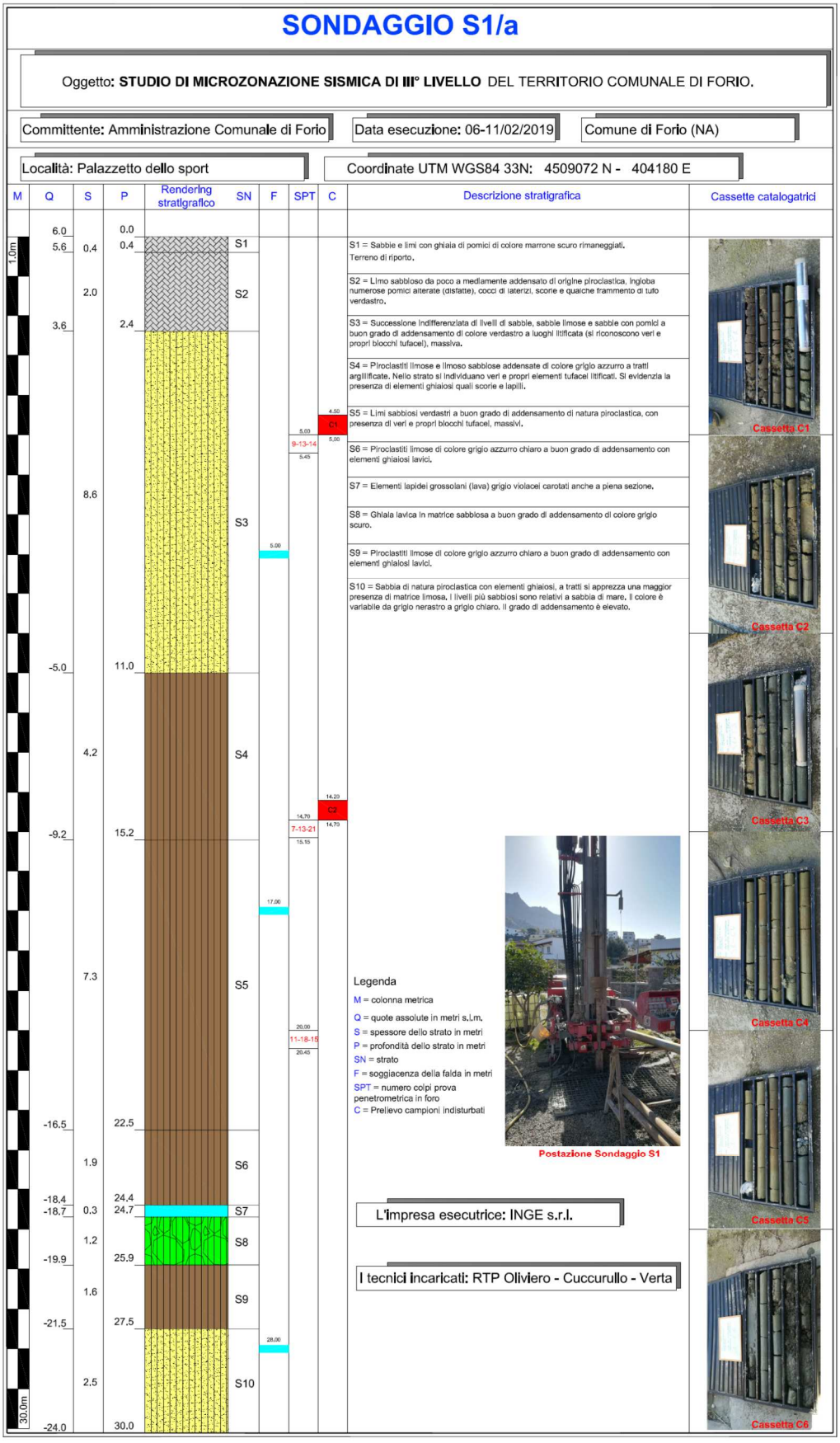



*Figura 89 - Stratigrafia Sondaggio S1/a.*

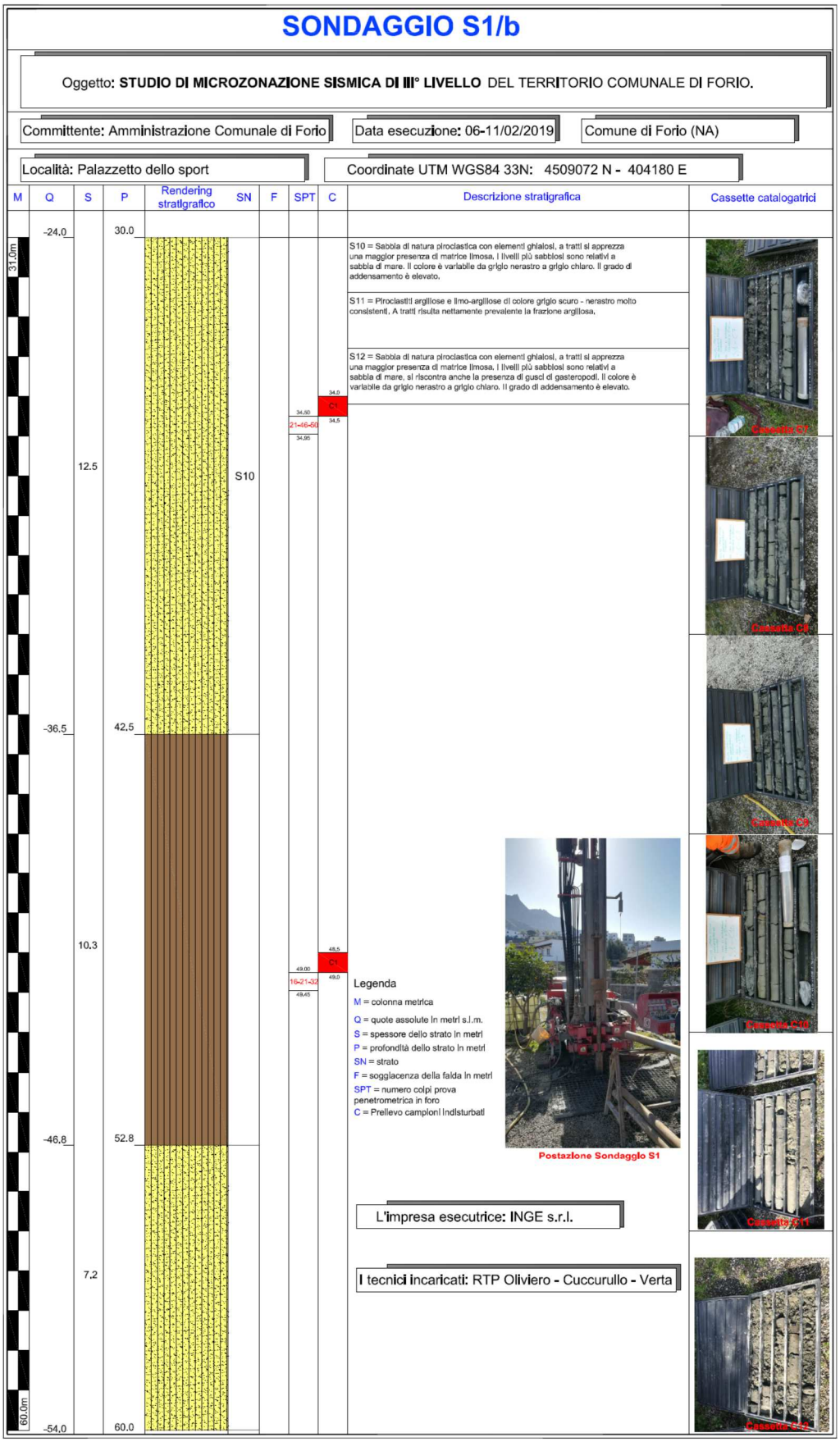



*Figura 90 - Stratigrafia Sondaggio S1/a.*

I lavori di indagini geognostica sono stati realizzati con personale, modalità operative e attrezzature conformi alle prescrizioni contenute nei protocolli suddetti, dalla ditta INGE srl. Ogni variazione dai suddetti protocolli è stata preventivamente concordata e approvata dai responsabili per l'Unità Operativa di competenza (IUO).

Le modalità operative delle indagini in sito di tipo geognostico sono state conformi alle "Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche" A.G.I., 1977.

I sondaggi hanno avuto lo scopo di fornire una campionatura completa dei litotipi attraversati, al fine di ricostruire la successione degli strati, di effettuare il prelievo di campioni indisturbati sottoposti ad analisi geotecniche di laboratorio, di eseguire prove SPT e di effettuare la posa in opera delle tubazioni per le prospezioni sismiche DH.

La perforazione è stata eseguita a carotaggio continuo con attrezzature idonee ad eseguire sondaggi a rotazione impiegando carotieri semplici o doppi scelti a secondo la natura litologica dei terreni incontrati.

La profondità del sondaggio (-60 m dal piano campagna), è stata raggiunta come concordato con il gruppo di lavoro Centro MS. La perforazione ha avuto inizio il 06/02/2019 ed è terminata il giorno 08/02/2019. Le attività di messa in opera del tubo in pvc per l'esecuzione della prospezione down-hole in foro ed il relativo condizionamento sono iniziate in data 11/02/2019 e terminate in data 12/02/2019.

Durante la perforazione sono state intercettate n. 3 livelli di falda acquifera:

- La prima alla profondità di -8m dal p.c.;
- La seconda alla profondità di -17m dal p.c.;
- La terza alla profondità di -28m dal p.c..

*Prelievo, conservazione e trasporto dei campioni*

È stato eseguito il prelievo di n. 4 campioni indisturbati, secondo le raccomandazioni fornite dai Protocolli.

*Tabella 9 - Prospetto riassuntivo e descrizione dei campioni prelevati.*

| Sondaggio | Campione | Profondità (m) | Descrizione Campione – da analisi laboratorio UNINA-DICEA |
|---|---|---|---|
| S1 | C1 | 4,50 – 5,00 | Sabbia limosa con presenza di elementi litici tufacei. |
| S1 | C2 | 14,20 - 14,70 | Piroclastite argillificata. Presenti elementi litici tufacei |
| S1 | C3 | 34,00 – 34,50 | Sabbia cineritica – Parte superiore sabbia fine cineritica; parte centrale (zona addensata) cementata; parte inferiore sabbiosa più grossolana- Struttura pisolitica. |
| S1 | C4 | 48,50 – 49,00 | Argilla con limo, consistenza medio-alta, omogeneo. Striature nerastre, possibile presenza di sostanza organica. Presenza di concrezioni calcaree. |

*Figura 91 – Fustella campione DH1C3*

I campioni del tipo ‘’indisturbato’’ sono stati prelevati con campionatori a pistone, a pressione o a rotazione con doppia parete e scarpa avanzata, a seconda del tipo di terreno. Per il campionamento e il mantenimento dei campioni sono state utilizzate fustelle metalliche nuove. Le fustelle contenenti i campioni sono state sigillate alle due estremità con appositi tappi a tenuta, bloccati da nastri adesivi, accompagnati da una etichetta applicata al contenitore, non degradabile, in cui sono stati indicati: Comune, località, affidatario, ditta esecutrice, numero identificativo del campione, profondità di prelievo, orientamento e data di prelievo.

*Cassette catalogatrici*

Le cassette per la conservazione del materiale estratto durante il carotaggio sono state approntate in cantiere prima dell’inizio dei lavori. Ogni cassetta, dotata di 5 scomparti interni della lunghezza di 1 m ciascuno e munite di coperchio, è stata segnata sull'esterno del coperchio con il numero d'ordine del sondaggio e con le quote di prelievo cui il contenuto ha fatto riferimento. Le cassette sono state stoccate all’interno dello stesso Palazzetto dello Sport al termine dell’attività di analisi stratigrafica. Le cassette sono state fotografate secondo le modalità specificate nel paragrafo 5.6 dei protocolli e sono di seguito illustrate.

*Figura 92 - Sondaggio DH1 Cassetta C1.*

*Figura 93 - Sondaggio DH1 Cassetta C2.*

*Figura 94 - Sondaggio DH1 Cassetta C3.*

*Figura 95 - Sondaggio DH1 Cassetta C4.*

*Figura 96 - Sondaggio DH1 Cassetta C5.*

*Figura 97 - Sondaggio DH1 Cassetta C6.*

*Figura 98 - Sondaggio DH1 Cassetta C7.*

*Figura 99 - Sondaggio DH1 Cassetta C8.*

*Figura 100 - Sondaggio DH1 Cassetta C9.*

*Figura 101 - Sondaggio DH1 Cassetta C10.*

*Figura 102 - Sondaggio DH1 Cassetta C11.*

*Figura 103 - Sondaggio DH1 Cassetta C12.*

*Prove penetrometriche dinamiche SPT (Standard Penetration Test)*

Le prove sono state eseguite ai sensi delle normative e specifiche di riferimento delle:

1. ISSMFE Technical Committee (1988) - Standard Penetration Test (SPT): International Reference Test Procedure;
2. Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche, Associazione Geotecnica Italiana (AGI) 1977.

Le strumentazioni utilizzate, pertanto, sono state le standard, date da un tubo campionatore Raymond, in acciaio indurito, apribile longitudinalmente, di diametro esterno 51 ± 1 mm, diametro interno 35 ± 1 mm e lunghezza minima (esclusa la scarpa tagliente terminale) di 457 mm.

Le aste di perforazione, con peso non superiore a 10 kg per metro lineare, prima di ogni prova sono state ben avvitate in corrispondenza dei giunti e con flessione totale della batteria pronta per la prova < 1‰.

È stato utilizzato un dispositivo di battitura, con peso totale non superiore a 115 kg, dotato di una testa di battuta in acciaio, che prima di ogni prova è stato strettamente avvitato all'estremità della batteria di aste. Al maglio è stata assicurata una corsa in caduta libera di 760 ± 10 mm, con attriti trascurabili. Le tre fasi di penetrazione di 15 cm ciascuna sono state eseguite, annotando il numero di colpi.

Prima di ogni prova il fondo foro è stato opportunamente pulito e sostanzialmente indisturbato alla quota di prova, senza un apprezzabile gradiente idraulico verso l'alto. Il rivestimento metallico provvisorio del foro, se utilizzato, non è stato mai infisso al di sotto della profondità di prova.

Dopo la pulizia, la quota del fondo foro è stata controllata con apposito scandaglio confrontandola con quella raggiunta con la manovra di perforazione.

Ogni prova è stata eseguita infiggendo a percussione a fondo foro il campionatore per tre tratti consecutivi, ciascuno di 15 cm, annotando separatamente il numero di colpi necessario per la penetrazione in ciascun tratto. L'indice della prova, $N_{SPT}$, è dato dalla somma del numero di colpi relativo agli ultimi due tratti (ovvero necessari all'infissione negli ultimi 30 cm). L'infissione nel primo tratto è stata arrestata in ogni caso dopo 50 colpi. Si identifica la condizione di rifiuto quando nei due tratti successivi si ha un avanzamento minore o uguale di 30 cm con un numero di colpi pari 100. In tal caso è stata annotata la lunghezza di infissione (in cm) corrispondente ai 100 colpi. La frequenza di battitura in tutte le fasi della prova non è stata mai superiore a 30 colpi al minuto.

Al termine delle operazioni di infissione si è proceduto ad estrarre ed aprire il campionatore, misurare e descrivere il campione prelevato, trascurando l'eventuale parte alta costituita da detriti, e quindi sigillarlo in un contenitore cilindrico a tenuta d'aria.

*Tabella 10 - Dati da prove SPT.*

| Sondaggio | S.P.T. | Profondità in m. dal p.c. | Numero di colpi | $N_{SPT}$ |
|---|---|---|---|---|
| DH1 | 1 | 5.00÷5.45 | 9-13-14 | 27 |
| DH1 | 2 | 14.70÷15.15 | 7-13-21 | 34 |
| DH1 | 3 | 20.00÷20.45 | 11-18-15 | 33 |
| DH1 | 4 | 34.50÷35.95 | 21-46-50 | 96/RIF |
| DH1 | 5 | 49.00÷49.45 | 16-21-32 | 53 |

*Posa in opera di tubi per prospezioni sismiche DH*

L'esecuzione della prospezione sismica DH ha richiesto la preparazione di un foro di sondaggio, rivestito da tubazione metallica provvisoria, di diametro sufficiente a permettere l'installazione nel foro di un tubo in PVC munito di cannetta laterale per eseguire la cementazione dello stesso procedendo da fondo foro verso la superficie e spinto fino alla profondità di 50m dal p.c..

Il rivestimento metallico provvisorio, di un unico diametro in modo che il foro abbia diametro costante per tutta l'altezza, è stato estratto per sfilamento, senza l'aiuto della rotazione.
È stato inserito un tubo di rivestimento definitivo a sezione circolare, in PVC atossico con spessore ≥ 4 mm e diametro interno maggiore o uguale di 79 mm (3'' nominali), costituito da spezzoni con lunghezza di 3 metri, dotati di filettatura maschio/femmina per l'assemblaggio, munito di tappo di testa e fondo foro.
Tutte le operazioni di posa in opera della tubazione e relativa cementazione è stata eseguita in accordo con le modalità descritte nei protocolli. Il foro opportunamente cementato, è stato in seguito chiuso con opportuno chiusino carrabile in acciaio.

*Prospezioni geofisiche*
Ai fini dello studio di MS di III Livello, in funzione delle conoscenze pregresse dell'area di interesse e delle sue caratteristiche geologiche, è stata programmata ed eseguita, in varie fasi, una intensa campagna di indagini sismiche così articolata:

- ✓ n° 11 prospezioni sismiche superficiali M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves ovvero Analisi Multicanale delle onde Superficiali di Rayleigh);
- ✓ n° 25indagini di sismica passiva a stazione singola HVSR (microtremore ambientale);
- ✓ n° 3 array sismici bidimensionali, effettuati dal gruppo di lavoro del Centro MS.

*Indagini geofisiche del tipo HVSR*
La campagna di indagini sismiche HVSR è consistita in n.25 acquisizioni di microtremori a stazione singola.
Di queste, 22 sono state effettuate lungo gli stendimenti di sismica Masw, in particolare in corrispondenza del primo e dell'ultimo geofono, per tentare di aumentare la risoluzione spettrale in favore delle basse frequenze ed aumentare quindi la profondità di indagine.
Per l'ubicazione di tutte le indagini sismiche si rimanda all'allegato "Carta delle ubicazioni".

*Figura 104 - Acquisizione di sismica passiva*

La tecnica del rapporto spettrale HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) consente di stimare l'effetto di sito, legato ad una copertura sedimentaria, a partire da registrazioni di rumore sismico a singola stazione secondo tre componenti ortogonali. Il rapporto spettrale HVSR mostra un picco in corrispondenza della frequenza fondamentale di sito.

Tale metodologia assume che il campo d'onda dei microtremori sia costituito da onde di volume e di superficie che si propagano in un singolo strato soffice su semispazio e che la presenza di questo strato sia la causa dell'amplificazione di sito (Nakamura 1989).

Le ipotesi su cui si basa la tecnica di Nakamura sono:

- i microtremori sono generati da sorgenti locali e non da sorgenti profonde;
- le sorgenti di microtremori in superficie non influenzano i microtremori alla base;
- la componente verticale del moto non risente di effetti di amplificazione locale.

Sulla base di tali ipotesi, il rapporto tra le componenti verticali del moto in superficie ed alla base contiene solo termini delle sorgenti locali As (w) e delle sorgenti alla base AB (w), ed è pari a:

$$R_v(\omega) = \frac{V_S(\omega)}{V_B(\omega)} = \frac{A_S(\omega)}{A_B(\omega)}$$

mentre il rapporto fra l' ampiezza dello spettro della componente orizzontale del moto in superficie Hs e alla base dello strato Hb, contiene anche il termine di amplificazione di sito in superficie S (w), oltre che il termine sorgente, e può essere espresso nel seguente modo:

$$R_h(\omega) = \frac{H_S(\omega)}{H_B(\omega)} = \frac{A_S(\omega)S_S(\omega)}{A_B(\omega)}$$

Per rimuovere l'effetto di sorgente dai segnali, Nakamura divide i due rapporti R fra loro, ottenendo così la seguente espressione per la funzione di trasferimento di sito:

$$\frac{R_h(\omega)}{R_v(\omega)} = S_S(\omega) = \frac{H_S(\omega)}{H_B(\omega)} \cdot \frac{V_B(\omega)}{V_S(\omega)}$$

Ipotizzando, infine, che alla base dei sedimenti l'ampiezza spettrale della componente verticale e di quella orizzontale siano uguali, il fattore di amplificazione del moto orizzontale in superficie potrà essere valutato direttamente nel seguente modo:

$$S(\omega) = \frac{H_S(\omega)}{V_S(\omega)}$$

Le varie ipotesi sono state verificate sperimentalmente dallo stesso Nakamura con misure di microtremori in superficie ed in pozzo. Le stesse assunzioni sono state verificate anche numericamente da altri autori, confrontando i risultati ottenuti con modelli di propagazione di onde di Rayleigh, modelli di propagazione 1D di onde S e con modelli di generazione sintetica di rumore. Le conclusioni a cui sono giunti i suddetti studi sono che il picco visibile nei rapporti HVSR ottenuti con il rumore simulato è indipendente dalle caratteristiche della sorgente del rumore ed è invece fortemente dipendente dalla stratigrafia del terreno.

Nel caso in cui il campo d'onda sia prevalentemente costituito da onde superficiali di Rayleigh, la funzione HVSR calcolata fornisce una buona stima della funzione di ellitticità del modo fondamentale di oscillazione dell'onda di Rayleigh (Nogoshi and Igaraschi 1970, Fah et al., 2001, Fah et al., 2003, Nunziata 2007, De Nisco e Nunziata, 2009). Essa viene utilizzata per stimare il picco di ellitticità che si verifica in corrispondenza della frequenza fondamentale di sito F0.

Operativamente la funzione HVSR viene definita a partire da serie temporali superiori a 10 min, acquisite secondo le tre componenti del moto. Le registrazioni di rumore sismico vengono sottoposte ad operazioni di rimozione della media, di detrending e di filtraggio in un'oppurtuna banda di frequenze di interesse. Successivamente vengono suddivise in finestre temporali regolari, applicando ad esse una funzione di tapering per minimizzare gli effetti di troncamento della serie temporale. Per ciascuna finestra vengono calcolate le trasformate di Fourier, in un'oppurtuna banda di frequenze, applicando agli spettri di ampiezza definiti, una funzione di smoothing. Per ogni singola finesra temporale viene calcolata una funzione spettrale HVSR come rapporto tra la media aritmetica o del modulo degli spettri delle componenti orizzontali e quello della componente verticale. Successivamente i singoli rapporti spettrali sono mediati sull'intero intervallo temporale, definendo una funzione media HVSR, caratteristica del sito d'indagine.

Nella sottostante tabelle sono riepilogate le caratteristiche principali di ciascuna acquisizione di rumore sismico.

*Tabella 11 - Riepilogo caratteristiche della fase di acquisizione.*

| N° | *Prospezione sismica* | *Indirizzo* | *Tempo complessivo di acquisizione (min)* | *Frequenza di campionamento Fs Hz* | *Coordinate geografiche UTM* | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | *Latitudine Longitudine* | *Latitudine Longitudine* |
| 1 | HVSR n.1 | Loc. Campotese | 40 | 100 | 40.709144 13.865565 | 40.708586 13.866048 |
| 2 | HVSR n.2 | Cimitero Panza | 40 | 100 | 40.704626 13.871125 | 40.703989 13.870749 |
| 3 | HVSR n.3 | Campo Sportivo Forio | 40 | 100 | 40,742729 13,868263 | 40,741949 13,867927 |
| 4 | HVSR n.4 | Chiaia – San Francesco | 40 | 100 | 40,751493 13,868765 | 40,751010 13,869093 |
| 5 | HVSR n.5 | Punta Caruso – La Guardiola | 40 | 100 | 40,758140 13,865228 | 40,758452 13,866071 |
| 6 | HVSR n.6 | via Baiola | 40 | 100 | 40.738499 13.869798 | 40.738618 13.870668 |
| 7 | HVSR n.7 | Campo Sportivo di Panza | 40 | 100 | 40.713549 13.872778 | 40.713183 13.873170 |
| 8 | HVSR n.8 | Citara – Capo Verde | 40 | 100 | 40.718666 13.866880 | 40.718112 13.866256 |
| 9 | HVSR n.9 | San Francesco | 40 | 100 | 40.742270 13.866545 | 40.742360 13.865678 |
| 10 | HVSR n.10 | Cimitero di Forio | 40 | 100 | 40.731198 13.856683 | 40.731777 13.856787 |

| N° | *Prospezione sismica* | *Indirizzo* | *Tempo complessivo di acquisizione (min)* | *Frequenza di campionamento Fs Hz* | *Coordinate geografiche UTM* | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | *Latitudine Longitudine* | *Latitudine Longitudine* |
| 11 | HVSR n.11 | Zaro | 40 | 100 | 40.751030 13.876529 | 40.751432 13.877195 |
| 12 | HVSR n.12 | Palazzetto dello sport | 40 | 100 | 40.739903 | 13.866801 |
| 13 | HVSR n.13 | Siano | 40 | 100 | 40.727003 | 13.865341 |
| 14 | HVSR n.14 | Mezzavia | 40 | 100 | 40.747189 | 13.880631 |

L'indagine è stata condotta mediante l'utilizzo del sismografo triassiale "Geobox" della Sara Instruments, finalizzato alla rilevazione di vibrazioni naturali e artificiali. La terna di velocimetri ortogonali tra loro (un velocimetro verticale e due orizzontali linearizzati ad 1Hz) è stata posizionata correttamente (tramite bolla sferica e piedini regolabili) sul piano di calpestio (terreno). La stessa terna è stata orientata con il Nord.

Prima di procedere alla registrazione è stata posta la massima attenzione nel garantire un buon accoppiamento dello strumento di misura (velocimetro tri-direzionale) con il terreno, alle condizioni ambientali durante la misura e al possibile influsso di sorgenti di disturbo. La durata complessiva di ogni registrazioni è stata di 40 min con una frequenza di campionamento di 120 Hz

Steps eseguiti

La determinazione della curva HVSR in sito ha previsto, pertanto, i seguenti steps:

1. Misura delle tre componenti x, y, x del moto in un punto sulla superficie libera del suolo per una durata di 40 min. e una frequenza di campionamento pari a 120 Hz;
2. lisciamento degli spettri su finestre mobili con passo dipendente dalla frequenza (Konno-Ohmachi con b=40, finestre triangolari con ampiezza pari al 5% della frequenza centrale), la rimozione dei transienti è stata effettuata con cautela valutando il loro eventuale impatto sui risultati dell'analisi;
3. Definizione degli N intervalli o finestre temporali stazionari entro cui calcolare le curve HVSR;
4. Calcolo delle trasformate di Fourier delle tre componenti x, y, z del moto;
5. Operazione di smoothing degli spettri di Fourier;
6. Somma delle due componenti orizzontali x e y;
7. Calcolo delle curve HVSR come rapporto spettrale tra la componente orizzontale H e la componente verticale V negli N intervalli temporali stazionari;
8. Calcolo della curva HVSR media tra le N curve HVSR.

Infine, i risultati ottenuti sono stati verificati secondo i criteri di ammissibilità del progetto SESAME. Il significato dei criteri di ammissibilità dei risultati è riportato di seguito.

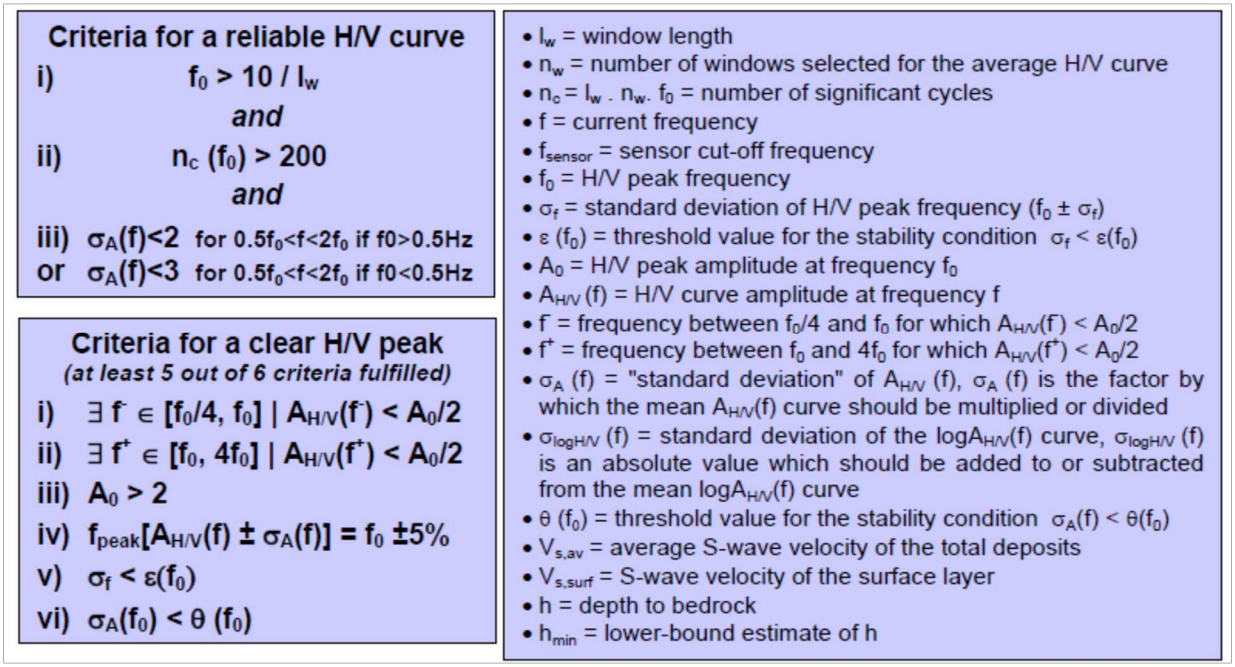



*Figura 105 - DIAGRAMS FOR INTERPRETATION OF H/V RESULTS da SESAME GUIDELINES FOR THE IMPLEMENTATION OF THE H/V SPECTRAL RATIO TECHNIQUE ON AMBIENT VIBRATIONS December 2004*

Condizioni di Reliability della curva HVSR:

1. In corrispondenza della frequenza del picco di interesse, vi siano almeno 10 cicli significativi in ogni finestra temporale individuata nel segnale registrato
2. È necessario utilizzare un grande numero di finestre temporali e di cicli, almeno 200 cicli
3. Il livello di scattering, cioè di dispersione delle curve HVSR ottenute nelle diverse finestre temporali deve essere moderato, altrimenti potrebbe essere un sintomo di un rumore ambientale fortemente non-stazionario, che influenza la forma della curva HVSR in maniera non ripetibile.

Le condizioni 1) e 2) confermano che la durata del segnale registrato sia sufficientemente estesa, la condizione 3) assicura che la curva HVSR misurata sia di buona qualità e poco dispersa.

Condizioni di Clearity del picco massimo:

- Condizioni sull'Ampiezza:

4. Esiste una frequenza f-, compresa tra f0/4 e f0, tale che A0 / AH/V (f-) > 2;
5. Esiste un'altra frequenza f+, compresa tra f0 e 4. f0, tale che A0 / AH/V (f+) > 2
6. Deve essere A0 > 2;

Le condizioni 4) e 5) confermano che il picco sia sufficientemente isolato sia a sinistra (condizione 4), sia a destra (condizione 5) del picco. La condizione 6) assicura che il picco sia sufficientemente elevato e questo dipende dall'entità del contrasto di rigidezza tra gli strati.

Condizioni sulla Stabilità della curva HVSR:

7. Il picco dovrebbe comparire alla stessa frequenza (entro il ± 5%) nelle curve H/V corrispondenti alla media + e- lo standard deviation;
8. Lo scarto quadratico medio σf deve essere inferiore ad un valore limite (f) dipendente dalla frequenza come riportato nella tabella dei criteri Sesame;
9. Deve essere σA (f0) inferiore ad un valore limite θ(f) dipendente dalla frequenza come riportato in tabella dei criteri Sesame.

Le condizioni 7), 8) e 9) confermano che la curva HVSR misurata sia stabile, cioè di buona qualità e poco dispersa.

L'elaborazione dei dati è stata eseguita mediante il software Geopsy (Wathelet M., 2008).
L'inversione è stata effettuata con l'algoritmo Dinver (Wathelet, M., D. Jongmans, and M. Ohrnberger 2004).
Inversione della frequenza di picco della funzione HVSR.
L'algoritmo di inversione utilizzato nel presente lavoro è quello proposto da Wathelet (2008). Esso si basa sull'approccio non lineare degli "intorni" (neighbourhood algorithm) proposto da Sambridge (1999) ed adattato dal precedente autore nella formulazione di problemi inversi relativi alle proprietà delle onde superficiali di Rayleigh.
Tale algoritmo, che rappresenta un'ottimizzazione del metodo di inversione di tipo Monte Carlo, propone una partizione dello spazio dei parametri in celle nelle quali ricadono solo i modelli con una discrepanza accettabile tra valori teorici e dati sperimentali. L'algoritmo di calcolo prevede la generazione random di n modelli, uniformemente distribuiti nelle celle, per i quali una funzione di misfit viene calcolata. La cella in cui ricade il modello con minore misfit viene successivamente suddivisa in m nuove celle per le quali n nuovi modelli vengono generati. Il processo di calcolo ha termine nel momento in cui viene raggiunta la condizione di misfit definita a priori e per la quale saranno soluzione del problema inverso n modelli di velocità delle onde di taglio.
Nel presente lavoro i dati sperimentali del problema inverso sono la frequenza di picco di ellitticità del modo fondamentale di oscillazione dell'Onda di Rayleigh, definita dalla funzione HVSR. Il criterio di scelta del modello di Vs rappresentativo del set di soluzioni ottenuto è quello con il minimo misfit. L'inversione è stata effettuata tenendo conto anche delle risultanze dei sondaggi geognostici a disposizione per l'area in esame.
*Prospezioni sismiche MASW*
Sono state effettuate n°11 prospezioni sismiche M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves ovvero Analisi Multicanale delle onde Superficiali di Rayleigh) per la redazione della relazione di

indagini sismiche M.A.S.W. finalizzate alla microzonazione sismica di III livello, al fine di definire le caratteristiche sismostratigrafiche dei litotipi e classificare sismicamente il suolo.

*Figura 106 - Fase di esecuzione di prospezione sismica masw.*

La tecnica MASW (Multi channel Analysis of Surface Waves) prevede l'acquisizione sincrona di onde superficiali di Rayleigh, secondo profili sismici lineari, costititi da geofoni verticali a bassa frequenza (≤ 4,5 Hz) con spaziatura compresa tra 1 – 3 m. La sorgente sismica è posta all'esterno dello stendimento ad una distanza tale da favorire il riconoscimento dei diversi modi di oscillazione dell'onda di Rayleigh. Maggiore è il numero di canali acquisiti, maggiore risoluzione avrà lo spettro di fase elaborato. A tal fine le linee sismiche per rilievi di tipo MASW devono essere costituite da almeno 24 canali.

La tecnica consente di estrarre la curva di dispersione delle veloctà di fase del modo fondamentale di oscillazione dell'onda di Rayleigh, elaborando una funzione tridimensionale, (spettro di velocità di fase), mediante una trasformazione integrale (phase shift – Park et al., 1998; Park et al., 1999).

La curva di dispersione sperimentale così estratta viene utilizzata per un processo di inversione che fornisce come risultato finale il profilo verticale di Vs.

La risoluzione del problema inverso implica la parametrizzazione del modello di sottosuolo assunto, che viene di norma schematizzato come un mezzo elastico a strati piano-paralleli, omogenei ed isotropi, nel quale l'eterogeneità è rappresentata dalla differenziazione delle caratteristiche meccaniche degli strati. Il processo di inversione è iterativo e termina quando viene individuato un insieme di parametri di modello che renda lo scarto tra curva sperimentale e teorica, accettabile.

Strumentazione utilizzata

Le indagini sono state condotte mediante l'utilizzo di sismografo M.A.E. A6000-S 24 bit 24 canali, realizzato appositamente per eseguire indagini di prospezione sismica convenzionali (rifrazione, riflessione) e non convenzionali [Re.Mi. (Refraction Microtremor); M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves); S.A.S.W. (Spectral Analysis of Surface Waves)].

L'elevata dinamica (24 bit di risoluzione) unita alla notevole memoria per l'acquisizione, ne consente l'utilizzo per tecniche di indagine di tipo non convenzionale. Tali indagini risultano particolarmente

adatte in aree fortemente antropizzate (aree urbane e industriali) con notevole presenza di rumore di fondo (noise). La gestione dell'apparecchiatura è notevolmente semplificata dall'interfaccia grafica e dall'interazione con essa tramite il sistema di puntamento touch-screen, che consente di eseguire tutte le operazioni toccando con un pennino gli oggetti interessati direttamente sullo schermo. L'ambiente operativo dello strumento è quello di Microsoft Windows XP embedded.
La sorgente sismica è costituita da un impatto transiente verticale (maglio dal peso di 8kg che batte su una piastra circolare in alluminio). Come trigger/starter è stato utilizzato un geofono verticale Geospace a 14Hz, posto in prossimità della piastra.
L'array è costituito da 24 geofoni spaziati 2,5 m. Sono state effettuate diverse battute, sia ad inizio che a fine stendimento con offset di 7,5 m.
Quando la battuta sulla superficie della piastra non risultava netta o veniva colpita due volte erroneamente, la prova veniva ripetuta. Il picking della curva di dispersione è stato effettuato con il programma Pickwin95 SeisImager, mentre l'inversione della curva è stata effettuata con il succitato software Dinver per la determinazione della sismostratigrafia del sottosuolo.

Le acquisizioni dei segnali, di lunghezza temporale T=2.048s, sono state effettuate con passo di campionamento dt=0.5ms. La frequenza di campionamento è data da: fcampionamento=1/dt=2000Hz. La frequenza massima dei segnali, ovvero la frequenza di Nyquist, è data da: fNyquist =1/2dt=1000Hz. La frequenza minima dei segnali è data da: fmin=1/T=0.488Hz. Gli elaborati relativi alle prove effettuate sono riportati nelle Monografie allegate al presente studio.

*Prospezioni sismiche Down-hole*
Lo scopo della prova Downhole è determinare la velocità di propagazione delle onde di compressione (onde P) e di taglio (onde SH), calcolando il tempo, ad esse necessario, per raggiungere il geofono ricevitore, posto all'interno del foro di sondaggio, dalla sorgente, posta sul piano campagna a distanza nota dal foro.
Le assunzioni che stanno alla base della metodologia sono che il volume di terreno interessato dall'indagine sia a strati orizzontali e che all'interno di ciascuno strato il comportamento sia elastico, omogeneo ed isotropo.
La prova consiste nel produrre in superficie sollecitazioni verticali, per la generazione di onde di compressione P ed orizzontali, per la generazione di onde di taglio polarizzate nel piano orizzontale SH e nel registrare i tempi di arrivo del treno d'onde ad un sistema di ricezione composto, nel caso specifico, da una doppia terna di sensori (1 verticale e 2 orizzontali) distanziati di 1 m, ancorato nel foro di sondaggio a profondità nota (Figura 107).

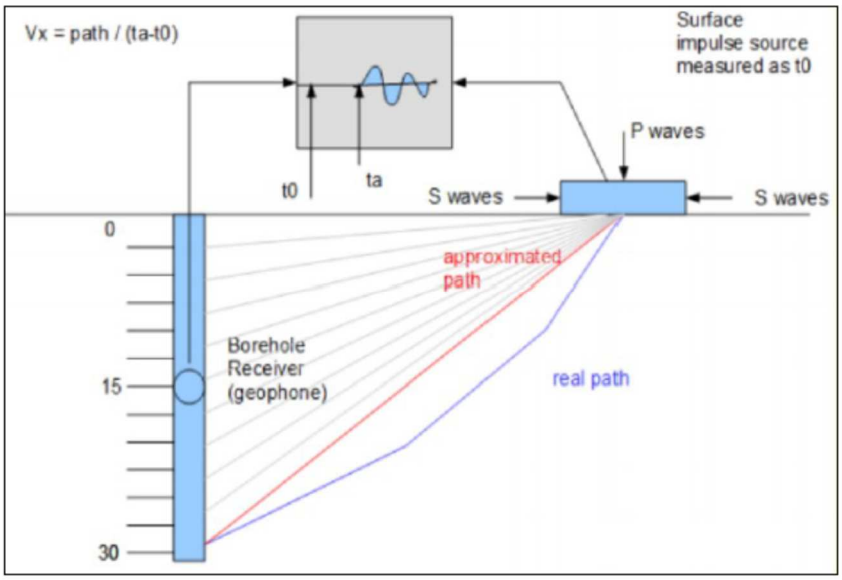



*Figura 107 - Rappresentazione schematica di un'indagine sismica downhole*

Conosciuta la distanza tra la sorgente ed i ricevitori e determinato il tempo di propagazione è possibile stimare in maniera accurata la distribuzione delle velocità delle onde P ed SH in corrispondenza della verticale di misura.

Per generare le onde di compressione è stata utilizzata una massa battente da 8 Kg agente perpendicolarmente al terreno mentre per le onde di taglio è stato utilizzato, come sorgente, un parallelepipedo di dimensioni tali da permettere le battute sui lati opposti in modo da esaltare gli arrivi delle onde di taglio e minimizzare le onde di compressione. Tale dispositivo è stato zavorrato al terreno utilizzando il peso di un automobile in modo da migliorarne l'aderenza e ridurre al minimo la dispersione dell'energia prodotta.

Per una corretta determinazione dei tempi di arrivo è stato utilizzato un geofono starter verticale per le onde di compressione ed uno orizzontale per le onde di taglio e sono state effettuate 3 battute per le onde P, 3 per le SH destra e 3 per le SH sinistra, per ciascuna profondità.

L'interdistanza di misura è stata di 1 m e la sorgente è stata posizionata a 2 m di distanza dal boccaforo.

Il passo di campionamento utilizzato è stato di 0,125 millisecondi mentre la durata delle acquisizioni è stata di 1 secondo. Non è stato applicato nessuno tipo di filtro in fase di processing dei dati in quanto la qualità dei sismogrammi è risultata buona ed i primi arrivi chiari. Le onde SH, in fase di acquisizione sono state sovrapposte ed invertite nella polarità per ciascuna profondità in modo da agevolare la lettura dei tempi in fase di analisi.

Il metodo utilizzato per l'elaborazione è stato il metodo intervallo.

*Figura 108 – Ubicazione DH1-S1.*

**RISULTATI DH1**

| Offset scoppio [m] | Numero di ricezioni | Posizione primo geofono [m] | Interdistanza [m] |
|---|---|---|---|
| 2 | 50 | 2 | 1 |

*Figura 109 - Parametri di acquisizione DH-S1.*

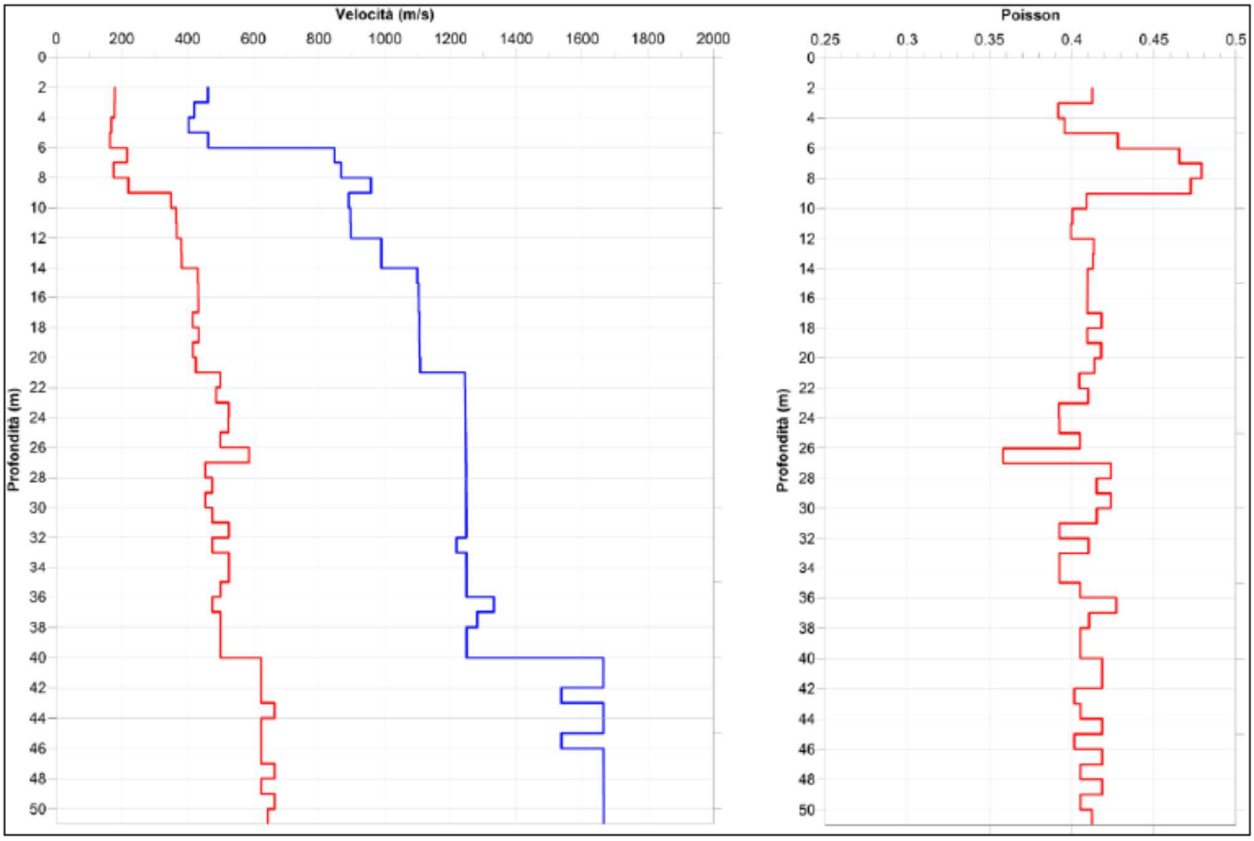



*Figura 110 - Variazioni con la profondità delle velocità delle onde di compressione, delle onde di taglio e del coefficiente di Poisson.*

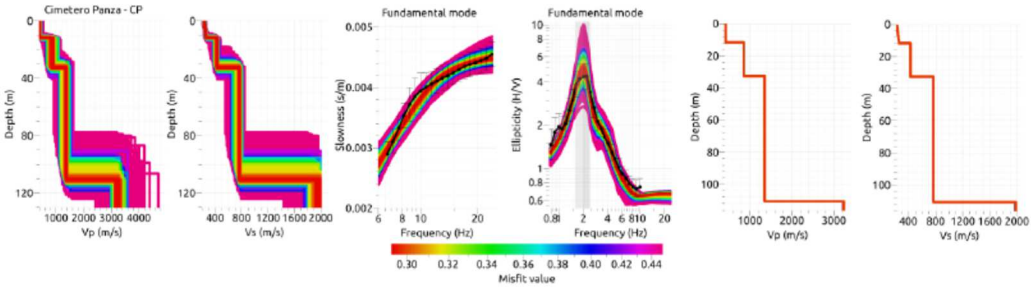
*Array bidimensionali*

A cura del gruppo di lavoro del Centro MS sono stati eseguiti n. 3 array sismici bidimensionali.

Gli array sismici bidimensionali (antenna sismica 2D) sono stati installati nelle seguenti località:

- Cimitero di Panza (CP);
- Palazzetto dello sport/Baiola (FD);
- Istituto Comprensivo Forio (IF);

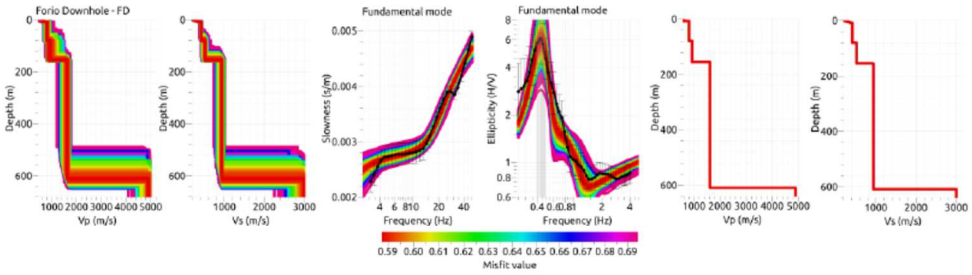
con l'obiettivo di caratterizzare l'area in termini di geometria e di caratteristiche geotecniche dei terreni di copertura. Per mezzo di indagini passive che sfruttano le caratteristiche dispersive delle onde superficiali l'array fornisce informazioni sulla frequenza di risonanza del sito e sulla di curva di dispersione per le onde superficiali la cui inversione, basata su tecniche non lineari, consente di ottenere profili di velocità delle onde di taglio (Vs) fino a profondità anche elevate. I risultati ottenuti consentono inoltre di calcolare la Vs media nei primi 30 metri di terreno (Vs30) e di assegnare al sito la categoria di sottosuolo secondo quanto dettato dal codice NTC18.




| da (m dal p.c.) | a (m dal p.c.) | spessore (m) | Vp (m/s) | Vs (m/s) | densita (Kg/m3) |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 2 | 2 | 424 | 235 | 2000 |
| 2 | 4 | 2 | 424 | 241 | 2000 |
| 4 | 6 | 2 | 424 | 247 | 2000 |
| 6 | 8 | 2 | 424 | 253 | 2000 |
| 8 | 10 | 2 | 424 | 259 | 2000 |
| 10 | 31 | 21 | 855 | 430 | 2000 |
| 31 | 109 | 78 | 1357 | 767 | 2000 |
| 109 | | | 3235 | 1981 | 2000 |

*Valori tabellari del best fit del modello di sottosuolo*

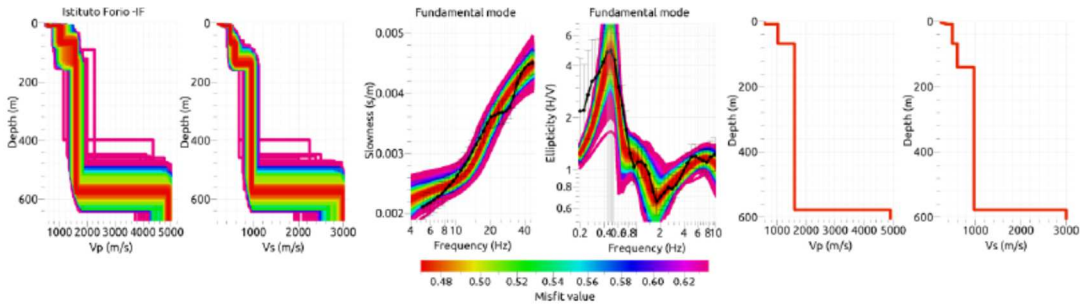
*Figura 111 - Risultati array bidimensionale effettuato in prossimità del Cimitero di Panza*




| da (m dal p.c.) | a (m dal p.c.) | spessore (m) | Vp (m/s) | Vs (m/s) | densita (Kg/m3) |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 2 | 2 | 613 | 205 | 2000 |
| 2 | 4 | 2 | 613 | 245 | 2000 |
| 4 | 6 | 2 | 613 | 286 | 2000 |
| 6 | 8 | 2 | 613 | 326 | 2000 |
| 8 | 10 | 2 | 613 | 367 | 2000 |
| 10 | 82 | 72 | 809 | 420 | 2000 |
| 82 | 157 | 75 | 928 | 519 | 2000 |
| 157 | 612 | 455 | 1620 | 939 | 2000 |
| 612 | 612 | 0 | 4899 | 2999 | 2000 |

Valori tabellari del best fit del modello di sottosuolo

*Figura 112 - Risultati array bidimensionale effettuato in prossimità del Palazzetto dello sport*




| da (m dal p.c.) | a (m dal p.c.) | spessore (m) | Vp (m/s) | Vs (m/s) | densita (Kg/m3) |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 2 | 2 | 579 | 217 | 2000 |
| 2 | 4 | 2 | 579 | 251 | 2000 |
| 4 | 6 | 2 | 579 | 286 | 2000 |
| 6 | 8 | 2 | 579 | 320 | 2000 |
| 8 | 10 | 2 | 579 | 355 | 2000 |
| 10 | 69 | 59 | 1042 | 491 | 2000 |
| 69 | 141 | 72 | 1604 | 604 | 2000 |
| 141 | 579 | 438 | 1606 | 967 | 2000 |
| 579 | 579 | 0 | 4899 | 2999 | 2000 |

Valori tabellari del best fit del modello di sottosuolo

*Figura 113 - Risultati array bidimensionale effettuato in prossimità dell'Istituto Comprensivo*

*Procedure di inversione delle misure congiunte e modalità di determinazione delle incertezze*

La curva di dispersione sperimentale costituita dal solo modo fondamentale dell'onda di Rayleigh ottenuta dall'elaborazione dei segnali delle prove di sismica attiva con tecnica M.A.S.W. e la curva di ellitticità ottenuta dall'elaborazione dei segnali di sismica passiva acquisiti con il tromografo sono state utilizzate, insieme a tutti gli altri dati a disposizione, per la modellazione geologica del sito attraverso una metodologia di inversione congiunta.

Il software usato è Dinver, uno dei moduli di cui si compone il programma Geopsy (GEOPhisical Signal database for noise arraY processing), sviluppato nell'ambito del progetto europeo SESAME (Site EffectS assessment using AMbient Excitation). Ai soli fini di verifica e di controllo dei risultati ottenuti con Dinver, sono state eseguite a campione delle inversioni congiunte anche con il software HV Inv. I due programmi usano algoritmi di inversione differenti: la procedura presente in Dinver usa tecniche di ricerca globale della soluzione, mentre HV Inv associa alle tecniche globali anche le tecniche di ricerca locale. I risultati ottenuti sono equiparabili.

La curva di dispersione sperimentale usata nel processo di inversione è la media delle singole curve ottenute dall'analisi dei segnali acquisiti in seguito ad ogni energizzazione (come riportato nel paragrafo relativo alla tecnica M.A.S.W.). Dalla scheda dei metadati delle indagini M.A.S.W. risultano 8 energizzazioni per sito.

Dopo aver caricato la curva di dispersione sono stati inseriti la curva di ellitticità e i dati relativi al picco della curva, comprensivi della deviazione standard.

Nella casella "Min. misfit" della finestra "Targets" è stato lasciato il valore di default, cioè zero. Ciò significa che sono stati presi in considerazione tutti i modelli generati nel processo di inversione. Durante alcune elaborazioni abbiamo provato a dare un peso maggiore alla curva con lo scarto molto più grande rispetto all'altra ma i risultati non sono stati soddisfacenti ottenendo dei modelli non comparabili con le informazioni geologiche a disposizione. È stato quindi scelto di dare lo stesso peso statistico ad ogni insieme di dati, cioè 1 (casella "Misfit weight").

Attraverso l'analisi delle curve, lo studio dei dati geognostici a disposizione (indagini pregresse e indagini recenti) e tenendo conto della geologia dell'area abbiamo inserito i parametri del modello. Abbiamo correlato le velocità delle onde longitudinali, i rapporti di Poisson e le densità ai corrispondenti valori delle velocità delle onde di taglio. Per verificare la correttezza della parametrizzazione inserita è stata eseguita un'inversione e valutato il misfit per entrambe le curve. È stato variato l'intervallo dei valori e ripetuto il processo di inversione fin quando non è stato trovato un buon adattamento per entrambe.

Il "misfit" rappresenta lo scarto tra la curva sperimentale e quella teorica. È la media quadratica normalizzata della deviazione standard, se fornita, o dei valori stessi nel caso non sia presente nessuna stima dell'errore.

È stato dunque scelto il modello con il misfit minore, quello cioè in cui la curva teorica si adattava meglio a entrambe le curve sperimentali.

Nella fattispecie, di concerto con il gruppo di lavoro del Centro MS, sono state eseguite n. 2 inversioni congiunte per la masw effettuata in prossimità del Cimitero di Panza (L21) e per la masw effettuata a Zaro (L30).

# 5. Modello del sottosuolo finalizzato alla MS

Nel testo di "Microzonazione Sismica per la ricostruzione dell'area aquilana", viene definito come modello del sottosuolo "una rappresentazione tridimensionale approssimata di una porzione di sottosuolo, nella quale devono essere distinguibili gli elementi qualitativi e quantitativi necessari per il suo impiego nelle valutazioni funzionali alla specifica applicazione. Metodologicamente è il risultato di un processo interattivo e iterativo di trattamento di dati provenienti da diverse fonti informative, riconducibili a specifiche aree disciplinari: geologia, geofisica e geotecnica".

Dai risultati ottenuti dalle indagini e dai rilevamenti eseguiti all'interno del territorio comunale di Forio, uniti con le informazioni ricavate dai dati pregressi e dagli studi bibliografici, e stato possibile ottenere il modello del sottosuolo finalizzato all'analisi di Microzonazione Sismica.
Di seguito sono riportate le informazioni con cui sono state effettuate le modellazioni per individuare eventuali effetti di amplificazione sia stratigrafica che topografica; di queste analisi numeriche vengono descritti i risultati delle indagini ottenute e sono specificate le principali proprietà fisiche, meccaniche e geofisiche rilevanti per la risposta sismica locale.

## 5.1 Unità geologico-tecniche: definizione e parametrizzazione

L'esecuzione e l'elaborazione delle indagini geotecniche e geofisiche nel territorio comunale di Forio hanno consentito di definire le geometrie riguardanti i limiti delle unità geologico tecniche, ma non in maniera completa, in quanto solo per pochi punti si è riusciti ad individuare il bedrock sismico, grazie agli array sismici bidimensionali ed alle inversioni congiunte effettuate nelle zone di Zaro e Campotese.
Il processo di inversione congiunta Masw – Hvsr non è risultato sempre realizzabile, per diversi motivi; principalmente perché il contenuto spettrale delle due metodologie è risultato spesso molto diverso, pertanto non utilizzabile in un unico processo di inversione.
In particolare, si è verificato, che i picchi del rapporto H/V, dovuti a contatti stratigrafici, risultavano spesso inferiori ad 1 Hz che tradotti in profondità erano dell'ordine delle diverse centinaia di metri, mentre il contenuto di frequenze in cui si osservava la dispersione dell'onda di Rayleigh, determinato dalla sismica attiva Masw, mediamente raggiungeva i 10-12 Hz. Questa situazione ha determinato un palese vuoto di informazioni non colmabile con nessun altro dato a disposizione.
Difatti per l'area della zona centrale di Forio i pochi dati profondi disponibili sono relativi solo ai due array del Palazzetto dello sport/Baiola (FD) e dell'Istituto Comprensivo Forio (IF), che permettono di individuare un bedrock sismico a profondità comprese tra i 140 ed i 150m dal p.c., ed ai n. 4 sondaggi profondi tratti dal progetto SAFEN e dalle indagini allegate al PUC.
Un utile confronto per la definizione del modello sottosuolo è derivato dall'allegato 1 della relazione finale dove sono riportate per il comune di Forio n. 2 sezioni geologiche con n. 17 dati stratigrafici di sondaggi profondi che hanno contribuito a tarare le poche informazioni profonde disponibili.

Il seguente grafico, mostra i valori in percentuale dei terreni di copertura e dei substrati individuati sul territorio comunale da cui si evince che i terreni di copertura affiorano per il 79% mentre i substrati per il 21% (vedi Figura 114).

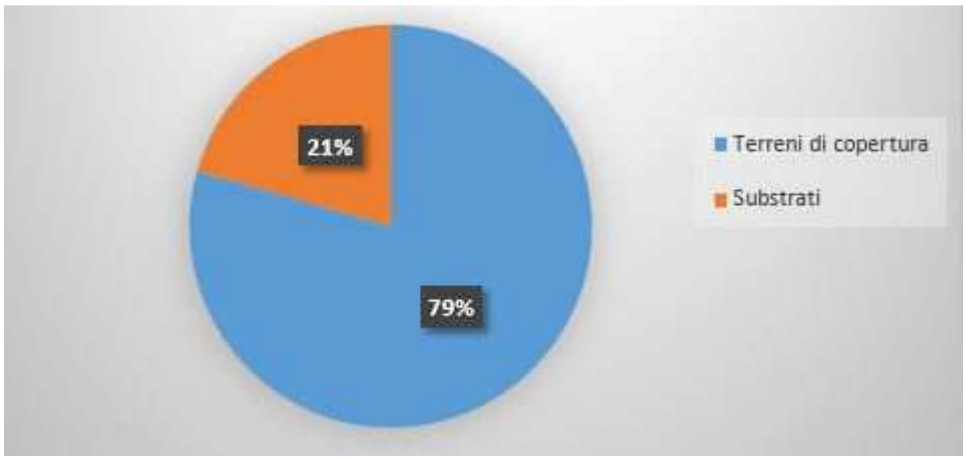



*Figura 114 - Distribuzione percentuale a scala comunale dei terreni affioranti.*

Di seguito si riporta una breve descrizione dei substrati e dei terreni di copertura individuati, con un riepilogo delle caratteristiche di ognuno e le curve di decadimento e smorzamento attributi ad ogni complesso dal gruppo di Ingegneria UNINA-DICEA.

Tutte le informazioni disponibili in merito ai parametri geotecnici e geofisici dei vari complessi (substrati e terreni di copertura) sono archiviate nel database CdI_Tabelle nella cartella Forio_41/Indagini.

**Substrati Geologici**

I substrati geologici affiorano per il 21% nell'area di studio, con prevalenza dei substrati tufacei (57% del totale dei substrati), definiti dagli scriventi secondo gli standard di microzonazione sismica come Substrato Granulare cementato, stratificato fratturato / alterato (SFGRS). Nei substrati SFGRS sono stati ricompresi i Tufi di Citara, il Tufo Verde del Monte Epomeo ed il Tufo del Pizzone; gli stessi affiorano in particolar modo nella parte ad ovest del territorio comunale, nella zona del Monte Epomeo.

L'altra tipologia di substrato geologico individuato nel presente studio è quello lavico (lave di Zaro e di Campotese) ed affiorano per il 43% del totale dei substrati. Essi sono stati definiti come SFLP e cioè Substrato Lapideo Fratturato / Alterato e si individuano in prevalenza nella porzione settentrionale del territorio comunale (plateau di Zaro).

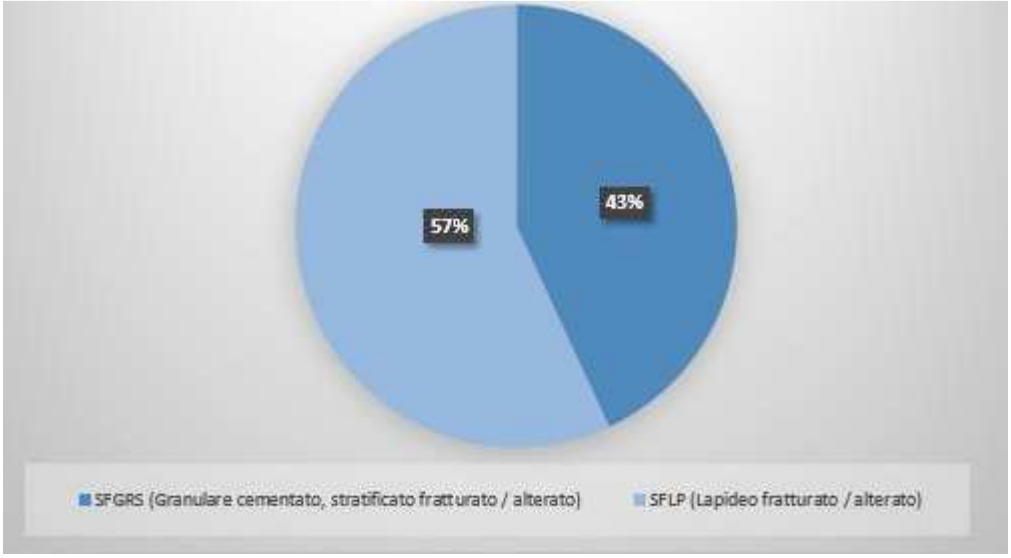



*Figura 115 - Distribuzione percentuale dei tipi prevalenti di substrato.*

I substrati geologici individuati nel territorio comunale di Forio sono i seguenti:

- SFGRS (Substrato Granulare cementato, stratificato fratturato / alterato ) – Tufi massivi e altre piroclastiti stratificate, litoidi. Tufi litoidi a grana fine o media e spesso fratturati. Tufi massivi, litoidi, ignimbriti a struttura massiva. Comprende le unità PZE, TCT, TFS, TME. Il Tufo di Citara (TCT) affiora unicamente a sud ed ad est rispetto all'omonima spiaggia, lungo la falesia, mentre il TME affiora lungo i versanti dell'Epomeo. Il gruppo degli SFGRS è suddividile geotecnicamente nel Tufo di Citara (SFGRS 1) e nel Tufo Verde del Monte Epomeo (SFGRS 2)

*Tabella 12 - Principali caratteristiche complesso SFGRS 1.*

| **Nome del Complesso Geologico-Tecnico** | **SFGRS 1 – Tufi di Citara** |
|---|---|
| Descrizione | Alternanza di strati medi e sottili di tufi ricchi in lapilli pomicei e livelli di tufi cineritici ricchi in lapilli accrezionali, biancastri-giallastri. Verso la base strati di lapilli pomicei. |
| Variazione degli spessori | 25-60m |
| Classazione granulometrica prevalente | Sabbie, limi e ghiaie |
| Stato addensamento/fratturazione | Da estremamente alterati a compatti |
| Peso di volume | 17.89 KN/m$^3$ |
| Valori di Vs | Compresi tra 420 m/s ed i 491 m/s |

*Tabella 13 – Valori delle curve di decadimento di riferimento per i Tufi di Citara.*

| g [%] | G/G0 [–] | g [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.00001 | 1 | 0.00001 | 0.5 |
| 0.001471 | 0.99 | 0.001471 | 0.800021 |

| g [%] | G/G0 [–] | g [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.00465 | 0.98 | 0.00465 | 1.100041 |
| 0.00922 | 0.97 | 0.00922 | 1.400062 |
| 0.015107 | 0.96 | 0.015107 | 1.700082 |
| 0.022299 | 0.95 | 0.022299 | 2.000103 |
| 0.046158 | 0.925 | 0.046158 | 2.750154 |
| 0.049493 | 0.9221 | 0.049493 | 2.83716 |
| 0.051985 | 0.92 | 0.051985 | 2.900165 |
| 0.079084 | 0.9 | 0.079084 | 3.500206 |
| 0.331477 | 0.8 | 0.331477 | 6.500412 |
| 0.908049 | 0.7 | 0.908049 | 9.500618 |
| 5.024195 | 0.5 | 5.024195 | 15.50103 |

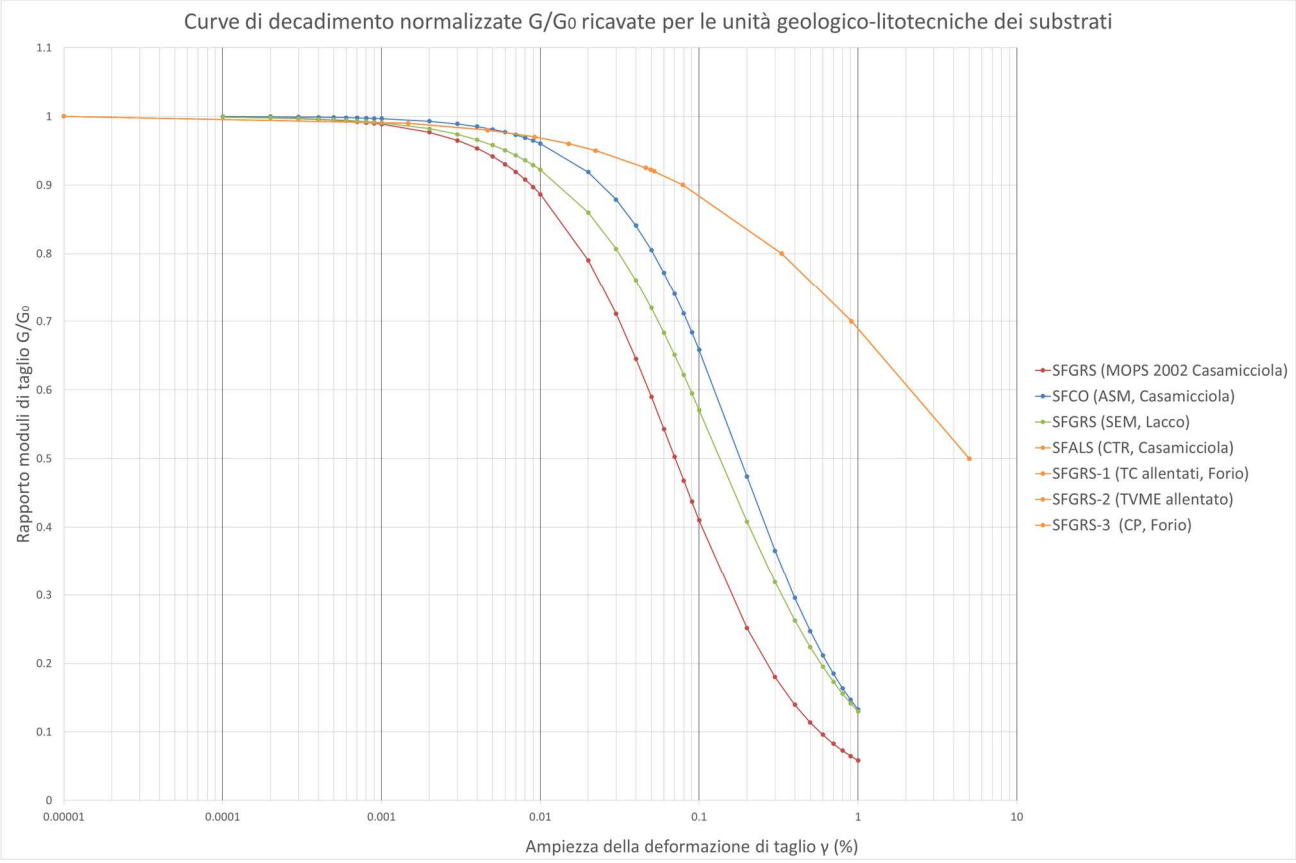



*Figura 116 - Curve di Decadimento normalizzate G/Go per tutti i substrati individuati per gli studi Microzonazione dei tre comuni di Casamicciola Terme, Forio e Lacco Ameno.*

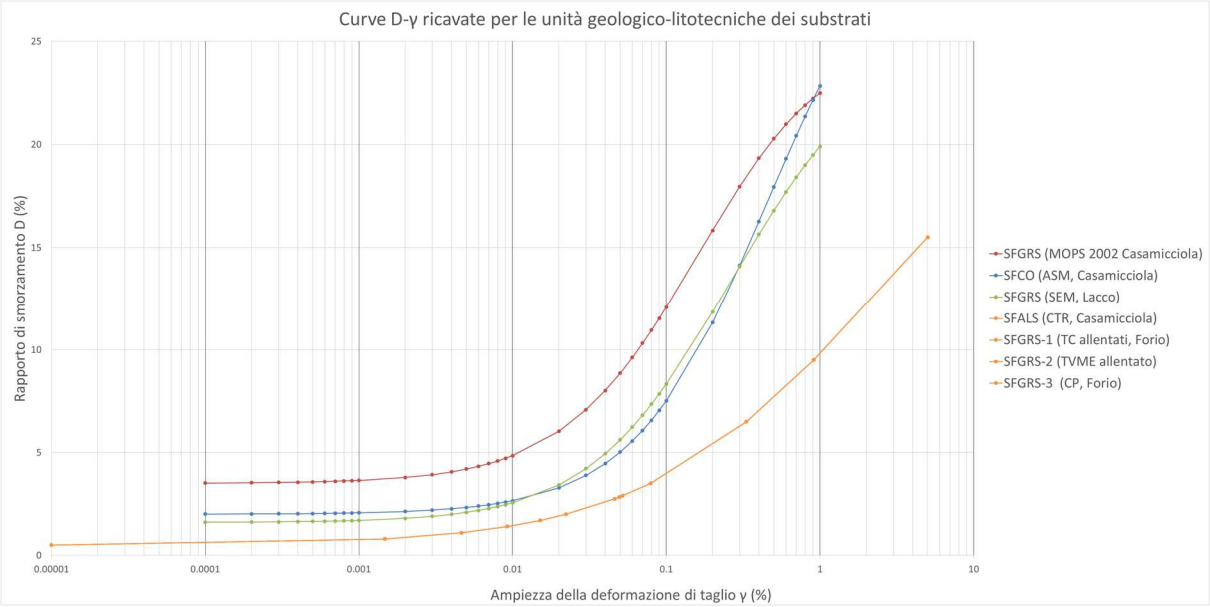



*Figura 117 - Curve del fattore di smorzamento per tutti i substrati individuati per gli studi Microzonazione dei tre comuni di Casamicciola Terme, Forio e Lacco Ameno.*

*Tabella 14 - Principali caratteristiche complesso SFGRS 2*

| **Nome del Complesso Geologico-Tecnico** | **SFGRS 2 – Tufi del Monte Epomeo/ Tufo del Pizzone** |
|---|---|
| Descrizione | Tufo Verde del Monte Epomeo del Sintema del rifugio di San Nicola, dato da tufi massivi di colore da verde chiaro. Tufo del Pizzone |
| Variazione degli spessori | 40-300m |
| Classazione granulometrica prevalente | Sabbie, limi e ghiaie |
| Stato addensamento/fratturazione | Da fratturati/alterati a compatti |
| Peso di volume | 17.89 KN/m$^3$ |
| Valori di Vs | Compresi tra 500 m/s nella porzione alterata/fratturata fino ai i 950m/s in profondità. |

*Tabella 15 – Valori delle curve di decadimento di riferimento per i Tufi del Monte Epomeo/Tufi del Pizzone.*

| **γ [%]** | **G/G0 [-]** | **γ [%]** | **D [%]** |
|---|---|---|---|
| 0.00001 | 1 | 0.00001 | 0.5 |
| 0.001471 | 0.99 | 0.001471 | 0.800021 |
| 0.00465 | 0.98 | 0.00465 | 1.100041 |
| 0.00922 | 0.97 | 0.00922 | 1.400062 |
| 0.015107 | 0.96 | 0.015107 | 1.700082 |
| 0.022299 | 0.95 | 0.022299 | 2.000103 |
| 0.046158 | 0.925 | 0.046158 | 2.750154 |
| 0.049493 | 0.9221 | 0.049493 | 2.83716 |
| 0.051985 | 0.92 | 0.051985 | 2.900165 |

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.079084 | 0.9 | 0.079084 | 3.500206 |
| 0.331477 | 0.8 | 0.331477 | 6.500412 |
| 0.908049 | 0.7 | 0.908049 | 9.500618 |
| 5.024195 | 0.5 | 5.024195 | 15.50103 |

- SFLP (Substrato Lapideo Fratturato / Alterato) - Rocce laviche. Rocce laviche trachitiche, da molto a poco compatte, da poco a mediamente fratturate, organizzate in grandi bancate di spessore plurimetrico (colate laviche in ambiente subaereo) o con strutture a pillow (colate sottomarine) (comprende le unità BPT, FGN1, FGN2, GMV, LCH, LCG, LPR, PIM, POM, RSC, SHP, VNU, ZRO1, ZRO2). Affiorano in grossa parte nell'area del plateau di Zaro ed in piccola parte lungo la costa del complesso di Campotese. Nella zona delle Fumarole di Donna Rachele e Lave di Rione Bocca si rinvengono corpi lavici anteriori al Tufo Verde del Monte Epomeo; tali corpi sono attribuiti da Sbrana & Toccaceli (2011) a una intrusione ipoabissale della Unità di Vagnulo (VNU), successiva al Tufo Verde del Monte Epomeo (60-55 ka).

*Tabella 16 - Principali caratteristiche complesso SFLP.*

| **Nome del Complesso Geologico-Tecnico** | **SFLP Lave** |
|---|---|
| Descrizione | Rocce laviche da molto a poco compatte, da poco a mediamente fratturate |
| Variazione degli spessori | indefiniti |
| Classazione granulometrica prevalente | - |
| Stato addensamento/fratturazione | Da alterata a fratturata a compatta |
| Peso di volume | 19-20 KN/m$^3$ |
| Valori di Vs | Pari a 250-400 m/s nella porzione fratturata/alterata (loc. Zaro e Campotese) e tra i 900 ed i 1980m/s (a profondità superiore ai 70-100 metri – loc. Campotese). |

*Tabella 17 – Valori delle curve di decadimento di riferimento per i termini alterati/fratturati.*

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.00001 | 1 | 0.00001 | 0.5 |
| 0.001471 | 0.99 | 0.001471 | 0.800021 |
| 0.00465 | 0.98 | 0.00465 | 1.100041 |
| 0.00922 | 0.97 | 0.00922 | 1.400062 |
| 0.015107 | 0.96 | 0.015107 | 1.700082 |
| 0.022299 | 0.95 | 0.022299 | 2.000103 |
| 0.046158 | 0.925 | 0.046158 | 2.750154 |
| 0.049493 | 0.9221 | 0.049493 | 2.83716 |
| 0.051985 | 0.92 | 0.051985 | 2.900165 |

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.079084 | 0.9 | 0.079084 | 3.500206 |
| 0.331477 | 0.8 | 0.331477 | 6.500412 |
| 0.908049 | 0.7 | 0.908049 | 9.500618 |
| 5.024195 | 0.5 | 5.024195 | 15.50103 |

**Terreni di copertura**

I terreni affioranti sul territorio comunale ddetti sono stati riclassificati con una nuova identificazione usando lo standard U.S.C.S. (Unfield Soil Classification System) leggermente modificato come indicato dagli Standard di Microzonazione sismica.

Gli stessi sono stati riclassificati nelle seguenti classi:

- GC (ghiaie argillose, miscele di ghiaia, sabbia e argille);
- GM (ghiaie limose, miscele di ghiaia sabbia e limo);
- GW (ghiaie pulite con granulometria ben assortita, miscela di ghiaia e sabbia);
- MH (limi inorganici, sabbie fini, limi micacei o diatomicei);
- ML (limi inorganici, farina di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità);
- SM (sabbie limose, miscele di sabbie e ghiaie);
- RI (terreni contenenti resti di attività antropica);

Sul territorio comunale le coperture occupano il 79% degli affioramenti, con prevalenza dei depositi contraddistinti come GM (ghiaie limose, miscele di ghiaia sabbia e limo) che occupano circa il 67% del totale dei terreni di copertura affioranti; essi si individuano prevalentemente dalla fascia pedemontana fino alla costa della parte centrale del territorio comunale.

Subordinatamente sono presenti i complessi di sabbie limose, miscele di sabbie e ghiaie (SM) per un 16% del totale dei terreni di copertura affioranti, individuabili in particolare nelle zone di Forio centro e San Francesco (lahar); i limi inorganici, farina di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità (ML), presenti per il 12% del totale dei terreni di copertura affioranti, affioranti a macchia di leopardo su piccole aree del territorio; i GW (ghiaie pulite con granulometria ben assortita, miscela di ghiaia e sabbia) affioranti per il 4% del totale dei terreni di copertura affioranti e concentrati nella zona di Campotese-Panza.

In percentuali bassissime (inferiori all'1% del totale dei terreni di copertura affioranti) sono stati classificati le ghiaie argillose, miscele di ghiaia, sabbia e argille (GC), i limi inorganici, sabbie fini, limi micacei o diatomicei (MH), ed i terreni contenenti resti di attività antropica (RI).

Oltre che la suddivisione su base granulometrica i terreni sono stati classificati in base all'ambiente genetico-deposizionale, come definiti dagli standard.

Per la classificazione dei terreni di copertura di Forio sono stati utilizzati i seguenti codici:

*Tabella 18 – Codici genetici dei terreni di Forio.*

| | |
|---|---|
| Coni scorie/ceneri | sc |
| Lahar (colate di fango) | lh |
| Falda detritica | fd |
| Conoide detritica | cd |
| Eluvi/colluvi | ec |
| Conoide alluvionale | ca |
| Spiaggia | sp |

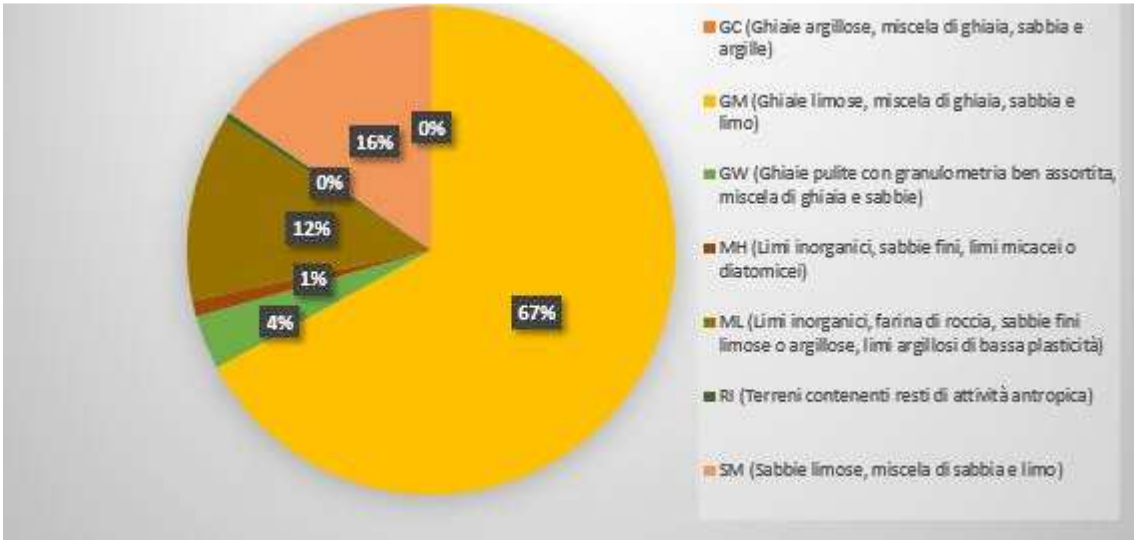



*Figura 118 - Distribuzione percentuale delle coperture affioranti.*

I terreni di copertura individuati nel territorio comunale di Forio sono i seguenti:

- RIzz - Depositi e opere antropici. Terreni di discarica e di re-interro grossolani eterometrici ed eterogenei, con abbondante matrice limoso-sabbiosa; opere di difesa costiera in cemento, calcestruzzo e grandi blocchi litici (comprende le unità r, h1 ed h3).

*Tabella 19 - Principali caratteristiche complesso RIzz.*

| **Nome del Complesso Geologico-Tecnico** | **RIzz** |
|---|---|
| Descrizione | Depositi ed opere antropiche |
| Variazione degli spessori individuati | Dai 5m ai 20m (discarica di Punta Caruso) |
| Classazione granulometrica prevalente | Materiale eterometrico ed eterogeneo |
| Stato di addensamento | Da poco a moderatamente addensati |
| Peso di volume ($\gamma$ medio) | 17.00 KN/m$^3$ |
| Valori di Vs | - |

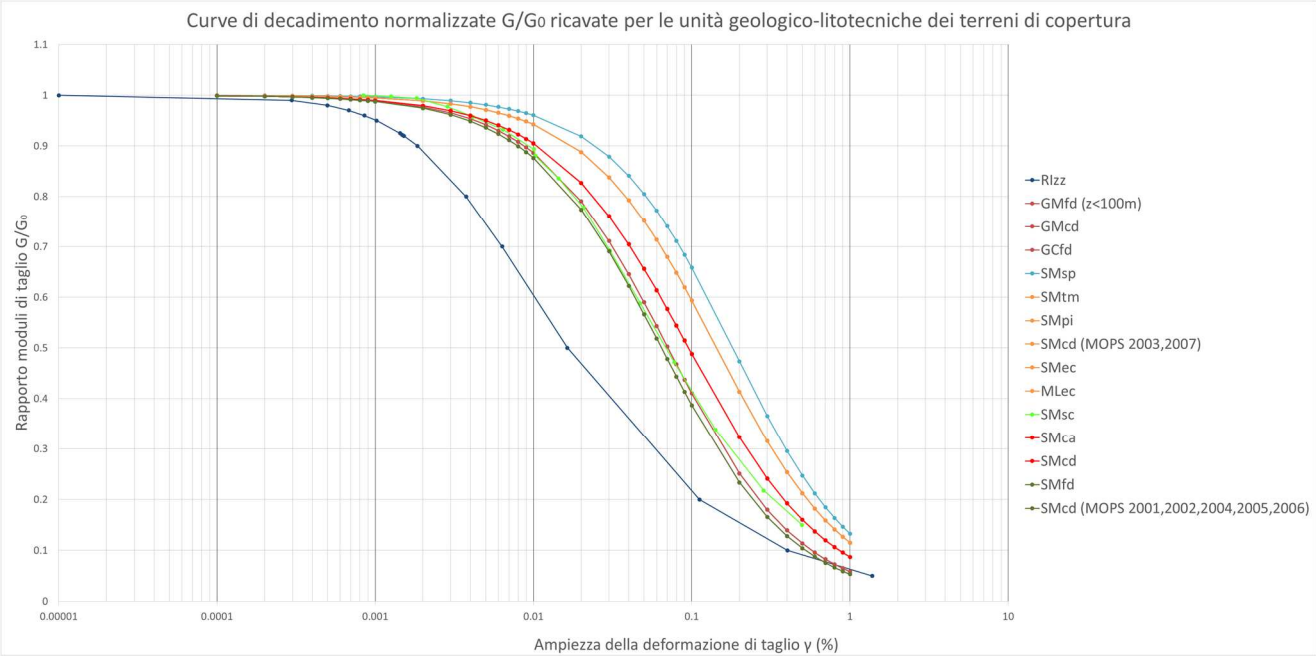



*Figura 119 - Curve di Decadimento normalizzate G/Go per tutti i terreni di copertura individuati per gli studi Microzonazione dei tre comuni di Casamicciola Terme, Forio e Lacco Ameno.*

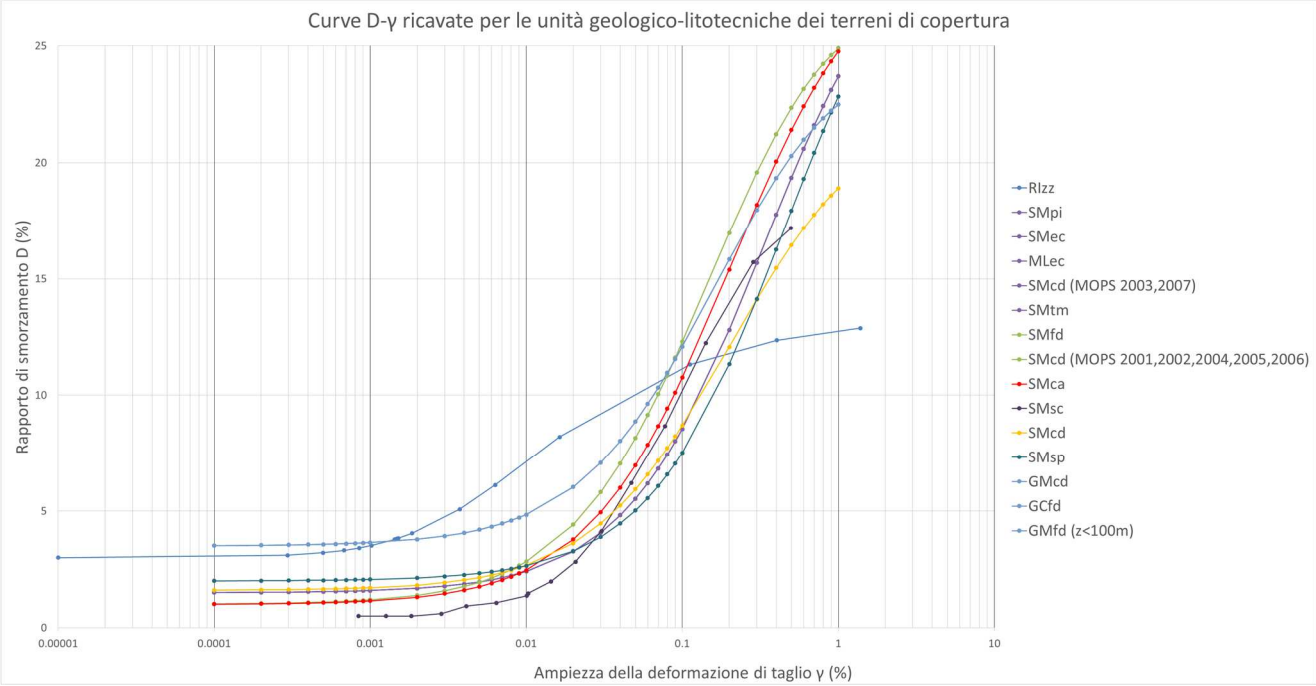



*Figura 120 - Curve del fattore di smorzamento per tutti i terreni di copertura individuati per gli studi Microzonazione dei tre comuni di Casamicciola Terme, Forio e Lacco Ameno.*

*Tabella 20 - Valori delle curve di decadimento di riferimento per i terreni di riporto.*

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.00001 | 1.00000 | 0.00001 | 3.00 |
| 0.00030 | 0.99000 | 0.00030 | 3.10 |

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.00050 | 0.98000 | 0.00050 | 3.21 |
| 0.00068 | 0.97000 | 0.00068 | 3.31 |
| 0.00085 | 0.96000 | 0.00085 | 3.42 |
| 0.00102 | 0.95000 | 0.00102 | 3.52 |
| 0.00143 | 0.92500 | 0.00143 | 3.78 |
| 0.00148 | 0.92210 | 0.00148 | 3.81 |
| 0.00152 | 0.92000 | 0.00152 | 3.83 |
| 0.00185 | 0.90000 | 0.00185 | 4.04 |
| 0.00375 | 0.80000 | 0.00375 | 5.08 |
| 0.00633 | 0.70000 | 0.00633 | 6.12 |
| 0.01637 | 0.50000 | 0.01637 | 8.20 |
| 0.11178 | 0.20000 | 0.11178 | 11.32 |
| 0.40235 | 0.10000 | 0.40235 | 12.36 |
| 1.38288 | 0.05000 | 1.38288 | 12.88 |

- GWsc - Depositi di scorie e brecce saldati da massivi a grossolani (comprende le unità SUNa, SUNb, CPE).

*Tabella 21 - Principali caratteristiche complesso GWsc.*

| **Nome del Complesso Geologico-Tecnico** | **GW sc** |
|---|---|
| Descrizione | Depositi grossolani di scorie e brecce |
| Variazione degli spessori individuati | 20-50m |
| Classazione granulometrica prevalente | Classi grossolani in matrice scarsa matrice sabbioso - limosa |
| Stato di addensamento | Da moderatamente addensati ad addensati |
| Peso di volume (ɣ medio) | 15.25 KN/m$^3$ |
| Valori di Vs | Compresi tra un minino di 260 m/s in superficie fino a 430 m/s in profondità |

*Tabella 22 - Valori delle curve di decadimento di riferimento per GWsc.*

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.0001 | 1.000 | 0.0001 | 1.14 |
| 0.0002 | 0.996 | 0.0002 | 1.21 |
| 0.0004 | 0.989 | 0.0003 | 1.31 |
| 0.0007 | 0.977 | 0.0005 | 1.39 |
| 0.0010 | 0.964 | 0.0010 | 1.53 |
| 0.0020 | 0.937 | 0.0020 | 2.08 |
| 0.0030 | 0.907 | 0.0030 | 2.34 |
| 0.0041 | 0.882 | 0.0050 | 2.91 |

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.0050 | 0.855 | 0.0070 | 3.39 |
| 0.0070 | 0.818 | 0.0101 | 3.94 |
| 0.0099 | 0.757 | 0.0201 | 5.57 |
| 0.0196 | 0.635 | 0.0299 | 6.81 |
| 0.0304 | 0.552 | 0.0397 | 7.64 |
| 0.0395 | 0.500 | 0.0596 | 8.99 |
| 0.0495 | 0.451 | 0.0805 | 10.01 |
| 0.0604 | 0.412 | 0.0990 | 10.73 |
| 0.0808 | 0.364 | 0.2004 | 13.24 |
| 0.0997 | 0.326 | 0.2953 | 14.37 |
| 0.2012 | 0.205 | 0.3996 | 15.14 |
| 0.2986 | 0.146 | 0.5937 | 16.05 |
| 0.4001 | 0.112 | 0.8088 | 16.55 |
| 0.5003 | 0.092 | 1.0033 | 16.89 |
| 0.6025 | 0.075 | | |
| 0.7954 | 0.057 | | |
| 1.0220 | 0.042 | | |

- GMcd - Depositi grossolani eterometrici massivi, con abbondate matrice, addensati. Depositi detritici eterometrici ed eterogenei grossolani con abbondante matrice sabbiosa-limosa, massivi, coerenti e addensati, contenenti spesso grandi olistoliti tufacei. Si tratta di spessi depositi epiclastici dovuti a grandi fenomeni di debris flow, debris avalanche, rock avalanche, depositi per meccanismi di debris-flow e flussi iper-concentrati. Al top sono presenti depositi di frana recenti e depositi detritici poco coerenti e poco addensati, grossolani, eterometrici ed eterogenei, in matrice sabbioso-limosa, deposti per meccanismi di conoide detritica (comprende le unità SUC, PUS, Ia e Ib).

*Tabella 23 - Principali caratteristiche complesso GMcd.*

| **Nome del Complesso Geologico-Tecnico** | **GMcd** |
|---|---|
| Descrizione | Depositi epiclastici massivi, con abbondate matrice, addensati |
| Variazione degli spessori individuati | 15-50m |
| Classazione granulometrica prevalente | Depositi ghiaioso sabbiosi con olistoliti |
| Stato di addensamento | Da moderatamente addensati ad addensati |
| Peso di volume (ɣ medio) | 16.36 KN/m$^3$ |
| Valori di Vs | Compresi tra un minino di 170 m/s in superficie fino a 500 m/s. |

*Tabella 24 - Valori delle curve di decadimento di riferimento per GMcd.*

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.0001 | 0.998983 | 0.0001 | 3.514379 |
| 0.0002 | 0.997896 | 0.0002 | 3.528736 |
| 0.0003 | 0.996783 | 0.0003 | 3.543074 |
| 0.0004 | 0.995653 | 0.0004 | 3.557393 |
| 0.0005 | 0.994512 | 0.0005 | 3.571692 |
| 0.0006 | 0.993362 | 0.0006 | 3.585972 |
| 0.0007 | 0.992205 | 0.0007 | 3.600233 |
| 0.0008 | 0.991042 | 0.0008 | 3.614474 |
| 0.0009 | 0.989875 | 0.0009 | 3.628696 |
| 0.001 | 0.988704 | 0.001 | 3.642899 |
| 0.002 | 0.97689 | 0.002 | 3.783868 |
| 0.003 | 0.965053 | 0.003 | 3.922937 |
| 0.004 | 0.953305 | 0.004 | 4.06014 |
| 0.005 | 0.941695 | 0.005 | 4.195514 |
| 0.006 | 0.930251 | 0.006 | 4.329094 |
| 0.007 | 0.91899 | 0.007 | 4.460915 |
| 0.008 | 0.907919 | 0.008 | 4.591013 |
| 0.009 | 0.897045 | 0.009 | 4.719421 |
| 0.01 | 0.88637 | 0.01 | 4.846173 |
| 0.02 | 0.790242 | 0.02 | 6.02952 |
| 0.03 | 0.711082 | 0.03 | 7.078946 |
| 0.04 | 0.645331 | 0.04 | 8.017008 |
| 0.05 | 0.590076 | 0.05 | 8.861361 |
| 0.06 | 0.543103 | 0.06 | 9.62601 |
| 0.07 | 0.502746 | 0.07 | 10.32221 |
| 0.08 | 0.467739 | 0.08 | 10.95912 |
| 0.09 | 0.437111 | 0.09 | 11.54428 |
| 0.1 | 0.410106 | 0.1 | 12.08397 |
| 0.2 | 0.251368 | 0.2 | 15.83349 |
| 0.3 | 0.179894 | 0.3 | 17.96331 |
| 0.4 | 0.139538 | 0.4 | 19.33443 |
| 0.5 | 0.113706 | 0.5 | 20.28549 |
| 0.6 | 0.095793 | 0.6 | 20.97882 |
| 0.7 | 0.082661 | 0.7 | 21.50251 |
| 0.8 | 0.072632 | 0.8 | 21.90865 |
| 0.9 | 0.06473 | 0.9 | 22.23009 |
| 1 | 0.058346 | 1 | 22.48859 |

- GMfd - Depositi grossolani eterometrici massivi, poco addensati. Depositi detritici poco coerenti e poco addensati, grossolani, eterometrici ed eterogenei, in matrice sabbioso-

limosa, deposti per meccanismi di debris-flow e flussi iper-concentrati. Al top sono presenti depositi di frana recenti (comprende le unità a1a, a1b, aa, a3, PUS, Ia e Ib).

*Tabella 25 - Principali caratteristiche complesso GMfd.*

| **Nome del Complesso Geologico-Tecnico** | **GMfd** |
|---|---|
| Descrizione | Depositi eterometrici ed eterogenei di natura piroclastica |
| Variazione degli spessori individuati | 5-18m |
| Classazione granulometrica prevalente | Classi grossolani in matrice sabbioso-limosa. |
| Stato di addensamento | Da moderatamente addensati ad addensati |
| Peso di volume ($\gamma$ medio) | 17.07 KN/m$^3$ |
| Valori di Vs | - |

*Tabella 26 - Valori delle curve di decadimento di riferimento per GMfd.*

| $\gamma$ [%] | G/G0 [-] | $\gamma$ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.0001 | 0.998983 | 0.0001 | 3.514379 |
| 0.0002 | 0.997896 | 0.0002 | 3.528736 |
| 0.0003 | 0.996783 | 0.0003 | 3.543074 |
| 0.0004 | 0.995653 | 0.0004 | 3.557393 |
| 0.0005 | 0.994512 | 0.0005 | 3.571692 |
| 0.0006 | 0.993362 | 0.0006 | 3.585972 |
| 0.0007 | 0.992205 | 0.0007 | 3.600233 |
| 0.0008 | 0.991042 | 0.0008 | 3.614474 |
| 0.0009 | 0.989875 | 0.0009 | 3.628696 |
| 0.001 | 0.988704 | 0.001 | 3.642899 |
| 0.002 | 0.97689 | 0.002 | 3.783868 |
| 0.003 | 0.965053 | 0.003 | 3.922937 |
| 0.004 | 0.953305 | 0.004 | 4.06014 |
| 0.005 | 0.941695 | 0.005 | 4.195514 |
| 0.006 | 0.930251 | 0.006 | 4.329094 |
| 0.007 | 0.91899 | 0.007 | 4.460915 |
| 0.008 | 0.907919 | 0.008 | 4.591013 |
| 0.009 | 0.897045 | 0.009 | 4.719421 |
| 0.01 | 0.88637 | 0.01 | 4.846173 |
| 0.02 | 0.790242 | 0.02 | 6.02952 |
| 0.03 | 0.711082 | 0.03 | 7.078946 |
| 0.04 | 0.645331 | 0.04 | 8.017008 |
| 0.05 | 0.590076 | 0.05 | 8.861361 |
| 0.06 | 0.543103 | 0.06 | 9.62601 |
| 0.07 | 0.502746 | 0.07 | 10.32221 |
| 0.08 | 0.467739 | 0.08 | 10.95912 |
| 0.09 | 0.437111 | 0.09 | 11.54428 |

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.1 | 0.410106 | 0.1 | 12.08397 |
| 0.2 | 0.251368 | 0.2 | 15.83349 |
| 0.3 | 0.179894 | 0.3 | 17.96331 |
| 0.4 | 0.139538 | 0.4 | 19.33443 |
| 0.5 | 0.113706 | 0.5 | 20.28549 |
| 0.6 | 0.095793 | 0.6 | 20.97882 |
| 0.7 | 0.082661 | 0.7 | 21.50251 |
| 0.8 | 0.072632 | 0.8 | 21.90865 |
| 0.9 | 0.06473 | 0.9 | 22.23009 |
| 1 | 0.058346 | 1 | 22.48859 |

- GMsc - - Piroclastiti fittemente stratificate con alternanze di livelli di lapilli pomicei, bombe e litici con livelli cineritici (comprende le unità PPI, RUO, SGL).

*Tabella 27 - Principali caratteristiche complesso GMsc.*

| **Nome del Complesso Geologico-Tecnico** | **GMsc** |
|---|---|
| Descrizione | Depositi piroclastici stratificati eterometrici |
| Variazione degli spessori individuati | 5-15m |
| Classazione granulometrica prevalente | Ghiaia di lapilli di pomici in matrice |
| Stato di addensamento | Da sciolti a moderatamente addensati. |
| Peso di volume (ɣ medio) | 14.60 KN/m$^3$ |
| Valori di Vs | Compresi tra un minino di 210 m/s in superficie fino a 260 m/s. |

*Tabella 28 - Valori delle curve di decadimento di riferimento per GMsc.*

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.00001 | 1 | 0.00001 | 2.27 |
| 0.000255 | 0.99 | 0.000255 | 2.458011 |
| 0.00053 | 0.98 | 0.00053 | 2.646022 |
| 0.00082 | 0.97 | 0.00082 | 2.834033 |
| 0.001124 | 0.96 | 0.001124 | 3.022045 |
| 0.001443 | 0.95 | 0.001443 | 3.210056 |
| 0.002306 | 0.925 | 0.002306 | 3.680084 |
| 0.002413 | 0.9221 | 0.002413 | 3.734607 |
| 0.002491 | 0.92 | 0.002491 | 3.774089 |
| 0.003273 | 0.9 | 0.003273 | 4.1501 |
| 0.008445 | 0.8 | 0.008445 | 6.0302 |
| 0.016758 | 0.7 | 0.016758 | 7.9103 |
| 0.055853 | 0.5 | 0.055853 | 11.6706 |

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.577215 | 0.2 | 0.577215 | 17.3109 |
| 2.647944 | 0.1 | 2.647944 | 19.191 |

- GCfd - Detrito eterometrico da minuto a grossolano in matrice prevalentemente limo-argillosa e sabbiosa. A luoghi sono presenti detriti grossolani, da metrici a plurimetrici, isolati o in matrice (comprende le unità aa, a1a, a1b).

*Tabella 29 - Principali caratteristiche complesso GCfd.*

| **Nome del Complesso Geologico-Tecnico** | **GCfd** |
|---|---|
| Descrizione | Detrito eterometrico da minuto a grossolano in matrice prevalentemente limo-argillosa e sabbiosa |
| Variazione degli spessori individuati | Spessori massimi pari a 5m |
| Classazione granulometrica prevalente | Depositi ghiaioso in matrice limo-argillosa e sabbiosa |
| Stato di addensamento | Da moderatamente addensati ad addensati |
| Peso di volume (ɣ medio) | 17.06 KN/m$^3$ |
| Valori di Vs | - |

*Tabella 30 - Valori delle curve di decadimento di riferimento per GCfd.*

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.0001 | 0.998983 | 0.0001 | 3.514379 |
| 0.0002 | 0.997896 | 0.0002 | 3.528736 |
| 0.0003 | 0.996783 | 0.0003 | 3.543074 |
| 0.0004 | 0.995653 | 0.0004 | 3.557393 |
| 0.0005 | 0.994512 | 0.0005 | 3.571692 |
| 0.0006 | 0.993362 | 0.0006 | 3.585972 |
| 0.0007 | 0.992205 | 0.0007 | 3.600233 |
| 0.0008 | 0.991042 | 0.0008 | 3.614474 |
| 0.0009 | 0.989875 | 0.0009 | 3.628696 |
| 0.001 | 0.988704 | 0.001 | 3.642899 |
| 0.002 | 0.97689 | 0.002 | 3.783868 |
| 0.003 | 0.965053 | 0.003 | 3.922937 |
| 0.004 | 0.953305 | 0.004 | 4.06014 |
| 0.005 | 0.941695 | 0.005 | 4.195514 |
| 0.006 | 0.930251 | 0.006 | 4.329094 |
| 0.007 | 0.91899 | 0.007 | 4.460915 |
| 0.008 | 0.907919 | 0.008 | 4.591013 |
| 0.009 | 0.897045 | 0.009 | 4.719421 |
| 0.01 | 0.88637 | 0.01 | 4.846173 |
| 0.02 | 0.790242 | 0.02 | 6.02952 |

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.03 | 0.711082 | 0.03 | 7.078946 |
| 0.04 | 0.645331 | 0.04 | 8.017008 |
| 0.05 | 0.590076 | 0.05 | 8.861361 |
| 0.06 | 0.543103 | 0.06 | 9.62601 |
| 0.07 | 0.502746 | 0.07 | 10.32221 |
| 0.08 | 0.467739 | 0.08 | 10.95912 |
| 0.09 | 0.437111 | 0.09 | 11.54428 |
| 0.1 | 0.410106 | 0.1 | 12.08397 |
| 0.2 | 0.251368 | 0.2 | 15.83349 |
| 0.3 | 0.179894 | 0.3 | 17.96331 |
| 0.4 | 0.139538 | 0.4 | 19.33443 |
| 0.5 | 0.113706 | 0.5 | 20.28549 |
| 0.6 | 0.095793 | 0.6 | 20.97882 |
| 0.7 | 0.082661 | 0.7 | 21.50251 |
| 0.8 | 0.072632 | 0.8 | 21.90865 |
| 0.9 | 0.06473 | 0.9 | 22.23009 |
| 1 | 0.058346 | 1 | 22.48859 |

- GMtm – Terreni detritici caotici, depositi alluvionali costituiti da sabbie e argille sabbiose, e depositi palustri intercalati a livelli piroclastici pomicei (comprende l'unità MZV).

*Tabella 31 - Principali caratteristiche complesso GMtm.*

| **Nome del Complesso Geologico-Tecnico** | **GMtm** |
|---|---|
| Descrizione | Terreni detritici caotici, depositi alluvionali costituiti da sabbie e argille sabbiose |
| Variazione degli spessori individuati | Spessori massimi pari a 15m |
| Classazione granulometrica prevalente | Depositi ghiaioso in matrice limo-argillosa e sabbiosa |
| Stato di addensamento | Da sciolti a moderatamente addensati |
| Peso di volume (ɣ medio) | 14.606 KN/m$^3$ |
| Valori di Vs | - |

*Tabella 32 - Valori delle curve di decadimento di riferimento per GMtm.*

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.00001 | 1 | 0.00001 | 2.27 |
| 0.000255 | 0.99 | 0.000255 | 2.458011 |
| 0.00053 | 0.98 | 0.00053 | 2.646022 |
| 0.00082 | 0.97 | 0.00082 | 2.834033 |
| 0.001124 | 0.96 | 0.001124 | 3.022045 |
| 0.001443 | 0.95 | 0.001443 | 3.210056 |

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.002306 | 0.925 | 0.002306 | 3.680084 |
| 0.002413 | 0.9221 | 0.002413 | 3.734607 |
| 0.002491 | 0.92 | 0.002491 | 3.774089 |
| 0.003273 | 0.9 | 0.003273 | 4.1501 |
| 0.008445 | 0.8 | 0.008445 | 6.0302 |
| 0.016758 | 0.7 | 0.016758 | 7.9103 |
| 0.055853 | 0.5 | 0.055853 | 11.6706 |
| 0.577215 | 0.2 | 0.577215 | 17.3109 |
| 2.647944 | 0.1 | 2.647944 | 19.191 |

- SMfd – Depositi epiclastici massivi grossolani, si tratta di depositi di debris avalanche derivanti dal collasso gravitativo del settore settentrionale del Monte Epomeo (comprende le unità LMO, MZV)

*Tabella 33 - Principali caratteristiche complesso SMfd.*

| **Nome del Complesso Geologico-Tecnico** | **SMfd** |
|---|---|
| Descrizione | Depositi epiclastici massivi grossolani a granulometria sabbiosa |
| Variazione degli spessori individuati | Spessore massimo pari a 15-20m |
| Classazione granulometrica prevalente | Sabbie con poca ghiaia |
| Stato di addensamento | Da poco addensati ad addensati |
| Peso di volume (ɣ medio) | 16.00 KN/m$^3$ |
| Valori di Vs | - |

*Tabella 34 - Valori delle curve di decadimento di riferimento per SMfd.*

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.0001 | 0.998878 | 0.0001 | 1.019651 |
| 0.0002 | 0.997679 | 0.0002 | 1.039272 |
| 0.0003 | 0.996452 | 0.0003 | 1.058865 |
| 0.0004 | 0.995207 | 0.0004 | 1.078428 |
| 0.0005 | 0.993949 | 0.0005 | 1.097962 |
| 0.0006 | 0.992682 | 0.0006 | 1.117468 |
| 0.0007 | 0.991408 | 0.0007 | 1.136944 |
| 0.0008 | 0.990127 | 0.0008 | 1.156391 |
| 0.0009 | 0.988842 | 0.0009 | 1.175809 |
| 0.001 | 0.987553 | 0.001 | 1.195198 |
| 0.002 | 0.974566 | 0.002 | 1.387506 |
| 0.003 | 0.961587 | 0.003 | 1.576972 |
| 0.004 | 0.948735 | 0.004 | 1.763654 |

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.005 | 0.936065 | 0.005 | 1.947611 |
| 0.006 | 0.923606 | 0.006 | 2.128901 |
| 0.007 | 0.911374 | 0.007 | 2.307582 |
| 0.008 | 0.899376 | 0.008 | 2.483713 |
| 0.009 | 0.887618 | 0.009 | 2.657347 |
| 0.01 | 0.876101 | 0.01 | 2.82854 |
| 0.02 | 0.773505 | 0.02 | 4.417233 |
| 0.03 | 0.690503 | 0.03 | 5.812091 |
| 0.04 | 0.622554 | 0.04 | 7.04815 |
| 0.05 | 0.566136 | 0.05 | 8.152289 |
| 0.06 | 0.518658 | 0.06 | 9.145464 |
| 0.07 | 0.478216 | 0.07 | 10.04427 |
| 0.08 | 0.443394 | 0.08 | 10.86206 |
| 0.09 | 0.413123 | 0.09 | 11.60966 |
| 0.1 | 0.386583 | 0.1 | 12.29604 |
| 0.2 | 0.233347 | 0.2 | 16.98269 |
| 0.3 | 0.165862 | 0.3 | 19.57988 |
| 0.4 | 0.128162 | 0.4 | 21.22462 |
| 0.5 | 0.104181 | 0.5 | 22.35107 |
| 0.6 | 0.08762 | 0.6 | 23.16345 |
| 0.7 | 0.075515 | 0.7 | 23.7711 |
| 0.8 | 0.066291 | 0.8 | 24.23806 |
| 0.9 | 0.059034 | 0.9 | 24.60432 |
| 1 | 0.053181 | 1 | 24.89621 |

- SMsp - Depositi e unità sabbiose. Sabbie, sabbie limose e sabbie con ghiaia, sciolte o poco addensate, di ambiente marino costiero (comprende l'unità g2).

*Tabella 35 - Principali caratteristiche complesso SMsp.*

| **Nome del Complesso Geologico-Tecnico** | **SMsp** |
|---|---|
| Descrizione | Depositi e unità sabbiose. Sabbie, sabbie limose e sabbie con ghiaia, sciolte o poco addensate, di ambiente marino costiero. |
| Variazione degli spessori individuati | Spessori massimi pari a circa 5m in affioramento e fino a 30 metri per le sabbie individuate nel sottosuolo. |
| Classazione granulometrica prevalente | Sabbie da fini a grossolane |
| Stato di addensamento | Da sciolte ad addensati |
| Peso di volume (ɣ medio) | 18.97 KN/m$^3$ |
| Valori di Vs | I valori di Vs delle sabbie affioranti nelle spiagge di Montano, San Francesco e Citara sono compresi tra 175 e 220m/s, mentre i valori di Vs del complesso sabbioso |

| Nome del Complesso Geologico-Tecnico | SMsp |
|---|---|
| | individuato nel sottosuolo di Forio sono compresi tra un minino di 420 m/s fino a 620 m/s. |

*Tabella 36 - Valori delle curve di decadimento di riferimento per SMsp.*

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.0001 | 0.999637 | 0.0001 | 0.910083 |
| 0.0002 | 0.999223 | 0.0002 | 0.920162 |
| 0.0003 | 0.998787 | 0.0003 | 0.930235 |
| 0.0004 | 0.998336 | 0.0004 | 0.940303 |
| 0.0005 | 0.997875 | 0.0005 | 0.950366 |
| 0.0006 | 0.997404 | 0.0006 | 0.960424 |
| 0.0007 | 0.996926 | 0.0007 | 0.970477 |
| 0.0008 | 0.996441 | 0.0008 | 0.980524 |
| 0.0009 | 0.995951 | 0.0009 | 0.990566 |
| 0.001 | 0.995455 | 0.001 | 1.000603 |
| 0.002 | 0.990309 | 0.002 | 1.10068 |
| 0.003 | 0.984943 | 0.003 | 1.200227 |
| 0.004 | 0.979454 | 0.004 | 1.299242 |
| 0.005 | 0.973887 | 0.005 | 1.397724 |
| 0.006 | 0.968272 | 0.006 | 1.495674 |
| 0.007 | 0.962628 | 0.007 | 1.593095 |
| 0.008 | 0.956969 | 0.008 | 1.689987 |
| 0.009 | 0.951306 | 0.009 | 1.786352 |
| 0.01 | 0.945648 | 0.01 | 1.882193 |
| 0.02 | 0.890312 | 0.02 | 2.812335 |
| 0.03 | 0.838609 | 0.03 | 3.693166 |
| 0.04 | 0.791083 | 0.04 | 4.527828 |
| 0.05 | 0.747629 | 0.05 | 5.319447 |
| 0.06 | 0.707951 | 0.06 | 6.071006 |
| 0.07 | 0.671701 | 0.07 | 6.785301 |
| 0.08 | 0.638534 | 0.08 | 7.464924 |
| 0.09 | 0.608126 | 0.09 | 8.112265 |
| 0.1 | 0.580188 | 0.1 | 8.729521 |
| 0.2 | 0.392 | 0.2 | 13.61924 |
| 0.3 | 0.292158 | 0.3 | 16.95372 |
| 0.4 | 0.23123 | 0.4 | 19.37185 |
| 0.5 | 0.190489 | 0.5 | 21.20328 |
| 0.6 | 0.161462 | 0.6 | 22.63562 |
| 0.7 | 0.1398 | 0.7 | 23.78383 |
| 0.8 | 0.123052 | 0.8 | 24.72241 |

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.9 | 0.10974 | 0.9 | 25.50189 |
| 1 | 0.098919 | 1 | 26.15776 |

- SMlh - Depositi di lahar. Depositi ben addensati a granulometria sabbiosa-limosa prevalente, con abbondanti clasti grossolani. Depositi piroclastici ed epiclastici rimobilizzati per mezzo di flussi iper-concentrati subaerei (comprende l'unità PUS).

*Tabella 37 - Principali caratteristiche complesso SMlh.*

| **Nome del Complesso Geologico-Tecnico** | **SMlh** |
|---|---|
| Descrizione | Depositi ben addensati a granulometria sabbiosa-limosa prevalente, con abbondanti clasti grossolani |
| Variazione degli spessori individuati | 15-30m |
| Classazione granulometrica prevalente | Sabbie con poca ghiaia |
| Stato di addensamento | Da moderatamente addensati ad addensati |
| Peso di volume (ɣ medio) | 16.62 KN/m$^3$ |
| Valori di Vs | Compresi tra 240 m/s e 400 m/s |

*Tabella 38 -- Valori delle curve di decadimento di riferimento per SMlh-*

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.0001 | 0.99968 | 0.0001 | 1.00976 |
| 0.00020 | 0.999295 | 0.00020 | 1.01951 |
| 0.0003 | 0.99888 | 0.0003 | 1.02926 |
| 0.00040 | 0.99844 | 0.00040 | 1.03901 |
| 0.00050 | 0.99798 | 0.00050 | 1.048749 |
| 0.0006 | 0.99751 | 0.0006 | 1.058489 |
| 0.0007 | 0.997029 | 0.0007 | 1.068224 |
| 0.0008 | 0.996537 | 0.0008 | 1.077956 |
| 0.0009 | 0.99604 | 0.0009 | 1.08768 |
| 0.001 | 0.995529 | 0.001 | 1.097409 |
| 0.002 | 0.99013 | 0.002 | 1.19445 |
| 0.003 | 0.98436 | 0.003 | 1.291097 |
| 0.004 | 0.97836 | 0.004 | 1.387348 |
| 0.005 | 0.972205 | 0.005 | 1.483192 |
| 0.006 | 0.965942 | 0.006 | 1.578623 |
| 0.007 | 0.959603 | 0.007 | 1.673634 |
| 0.008 | 0.953211 | 0.008 | 1.768222 |
| 0.009 | 0.946786 | 0.009 | 1.862381 |
| 0.01 | 0.94034 | 0.01 | 1.956109 |
| 0.02 | 0.876583 | 0.02 | 2.869175 |
| 0.03 | 0.816704 | 0.03 | 3.737766 |

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.04 | 0.761939 | 0.04 | 4.562533 |
| 0.05 | 0.71233 | 0.05 | 5.34508 |
| 0.06 | 0.667535 | 0.06 | 6.087463 |
| 0.07 | 0.627097 | 0.07 | 6.791927 |
| 0.08 | 0.590546 | 0.08 | 7.460758 |
| 0.09 | 0.557438 | 0.09 | 8.096191 |
| 0.1 | 0.527374 | 0.1 | 8.700371 |
| 0.2 | 0.334587 | 0.2 | 13.40737 |
| 0.3 | 0.239796 | 0.3 | 16.51574 |
| 0.4 | 0.184729 | 0.4 | 18.70794 |
| 0.5 | 0.149155 | 0.5 | 20.32906 |
| 0.6 | 0.124453 | 0.6 | 21.57064 |
| 0.7 | 0.106387 | 0.7 | 22.54737 |
| 0.8 | 0.092646 | 0.8 | 23.33209 |
| 0.9 | 0.08187 | 0.9 | 23.97334 |
| 1 | 0.073212 | 1 | 24.50466 |

- SMsc - Depositi piroclastici sabbioso limosi sciolti con livelli di ghiaia pomicea (comprende l'unità PPZ).

*Tabella 39 - Principali caratteristiche complesso SMsc.*

| **Nome del Complesso Geologico-Tecnico** | **SMsc** |
|---|---|
| Descrizione | Depositi piroclastici sabbioso limosi sciolti con livelli di ghiaia pomicea |
| Variazione degli spessori individuati | 5-15m |
| Classazione granulometrica prevalente | Sabbie limose con ghiaia di pomici |
| Stato di addensamento | Da sciolti a poco addensati |
| Peso di volume (ɣ medio) | 14.50 KN/m$^3$ |
| Valori di Vs | Compresi tra un minino di 180 m/s in superficie fino a 260 m/s. |

*Tabella 40 - Valori delle curve di decadimento di riferimento per SMsc.*

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.00084 | 1 | 0.00084 | 0.5 |
| 0.00126 | 0.997437 | 0.00126 | 0.5 |
| 0.00183 | 0.994098 | 0.00183 | 0.5 |
| 0.00286 | 0.977704 | 0.00286 | 0.5997 |
| 0.00414 | 0.957583 | 0.00414 | 0.92305 |
| 0.00642 | 0.932172 | 0.00642 | 1.07 |
| 0.01007 | 0.89363 | 0.01007 | 1.37 |

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.01028 | 0.880485 | 0.01028 | 1.47 |
| 0.01442 | 0.835609 | 0.01442 | 1.98 |
| 0.02071 | 0.778154 | 0.02071 | 2.82 |
| 0.03038 | 0.691964 | 0.03038 | 4.14 |
| 0.04713 | 0.588411 | 0.04713 | 6.21 |
| 0.07737 | 0.472129 | 0.07737 | 8.66 |
| 0.14126 | 0.337934 | 0.14126 | 12.24 |
| 0.28442 | 0.217718 | 0.28442 | 15.71 |
| 0.49734 | 0.150158 | 0.49734 | 17.19 |

- MHzz - Limi sabbiosi e sabbie limose sciolti di ambiente marino costiero/alluvionale (comprende l'unità g2).

*Tabella 41 - Principali caratteristiche complesso MHzz.*

| **Nome del Complesso Geologico-Tecnico** | **MHzz** |
|---|---|
| Descrizione | Limi sabbiosi e sabbie limose sciolti di ambiente marino costiero/alluvionale |
| Variazione degli spessori individuati | Spessori massimi fino a 5m |
| Classazione granulometrica prevalente | Limi sabbiosi |
| Stato di addensamento | Sciolti |
| Peso di volume (ɣ medio) | 15.66 KN/m$^3$ |
| Valori di Vs | Compresi tra un minino di 150 m/s in superficie fino a 200 m/s. |

- MLec - Limi sabbiosi e argillosi colluviali poco consolidati, a luoghi pedogenizzati al top (comprende l'unità b2).

*Tabella 42 - Principali caratteristiche complesso MLec.*

| **Nome del Complesso Geologico-Tecnico** | **MLec** |
|---|---|
| Descrizione | Limi sabbiosi e argillosi colluviali poco consolidati |
| Variazione degli spessori individuati | Spessori massimi fino a 10m |
| Classazione granulometrica prevalente | Limi sabbiosi ed argillosi |
| Stato di addensamento | Sciolti |
| Peso di volume (ɣ medio) | 15.66 KN/m$^3$ |
| Valori di Vs | Compresi tra un minino di 180 m/s in superficie fino a 260 m/s. |

*Tabella 43 - Principali caratteristiche complesso MLec.*

| γ [%] | G/G0 [-] | γ [%] | D [%] |
|---|---|---|---|
| 0.00010 | 0.99951 | 0.00010 | 1.509418 |
| 0.0002 | 0.998996 | 0.0002 | 1.51883 |
| 0.00030 | 0.99846 | 0.00030 | 1.528236 |
| 0.0004 | 0.997924 | 0.0004 | 1.537635 |
| 0.00050 | 0.99738 | 0.00050 | 1.547028 |
| 0.0006 | 0.996826 | 0.0006 | 1.556415 |
| 0.00070 | 0.99627 | 0.00070 | 1.565795 |
| 0.0008 | 0.99571 | 0.0008 | 1.57517 |
| 0.00090 | 0.995149 | 0.00090 | 1.584538 |
| 0.00100 | 0.994585 | 0.00100 | 1.593899 |
| 0.002 | 0.988852 | 0.002 | 1.687172 |
| 0.003 | 0.983036 | 0.003 | 1.779821 |
| 0.004 | 0.97719 | 0.004 | 1.871851 |
| 0.005 | 0.97134 | 0.005 | 1.963266 |
| 0.006 | 0.96550 | 0.006 | 2.054072 |
| 0.007 | 0.959685 | 0.007 | 2.144274 |
| 0.008 | 0.953897 | 0.008 | 2.233878 |
| 0.009 | 0.948143 | 0.009 | 2.322891 |
| 0.01 | 0.942426 | 0.01 | 2.411316 |
| 0.02 | 0.887711 | 0.02 | 3.26456 |
| 0.03 | 0.837785 | 0.03 | 4.065166 |
| 0.04 | 0.792452 | 0.04 | 4.818053 |
| 0.05 | 0.751283 | 0.05 | 5.527568 |
| 0.06 | 0.713824 | 0.06 | 6.197546 |
| 0.07 | 0.679652 | 0.07 | 6.831377 |
| 0.08 | 0.648389 | 0.08 | 7.432063 |
| 0.09 | 0.619704 | 0.09 | 8.002271 |
| 0.1 | 0.59331 | 0.1 | 8.544381 |
| 0.2 | 0.413348 | 0.2 | 12.79929 |
| 0.3 | 0.315209 | 0.3 | 15.6799 |
| 0.4 | 0.253895 | 0.4 | 17.76886 |
| 0.5 | 0.212111 | 0.5 | 19.35537 |
| 0.6 | 0.181877 | 0.6 | 20.60115 |
| 0.7 | 0.15902 | 0.7 | 21.60442 |
| 0.8 | 0.141153 | 0.8 | 22.42857 |
| 0.9 | 0.126815 | 0.9 | 23.1165 |
| 1 | 0.115062 | 1 | 23.69831 |

## 5.2 Sezioni geologico-tecniche

Al fine di rappresentare al meglio le condizioni del sottosuolo di Forio sono state tracciate ben n° 7 sezioni Geologico tecniche, concentrate nella zona del centro di Forio e di Panza, interessate dallo studio di Microzonazione Sismica di III Livello (Figura 121).
Le tracce di sezione sono state rappresentate in funzione di tutte le indagini in nostro possesso e di eventuali criticità (valle sepolta, variazioni morfologiche e topografiche, faglie).
Nelle sezioni sono stati rappresentati tutti i dati utilizzati per la ricostruzione dei complessi geologici, sono stati indicati i limiti delle MOPS e le linee di intersezione con altre sezioni. Inoltre nelle sezioni sono state indicate anche le aree indicate nella carta Geologico-Tecnica come in frana.

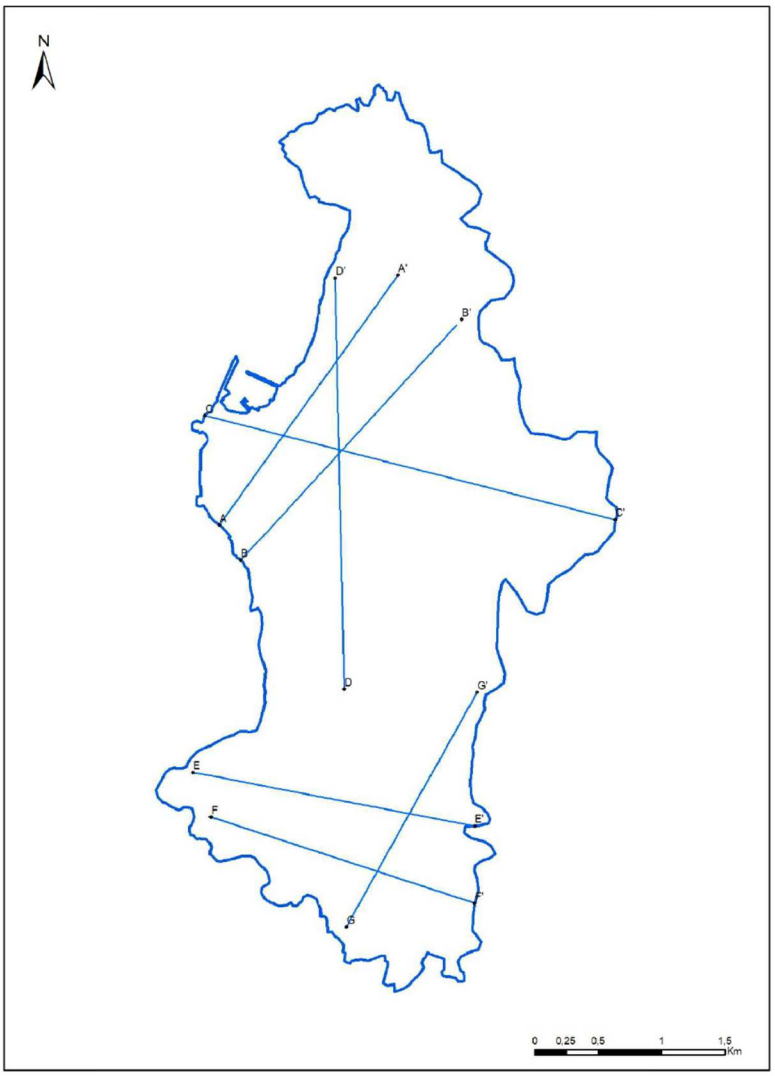



*Figura 121 - Ubicazione delle tracce di sezione sul confine comunale.*

La prima sezione (Sezione **A-A'**) presenta un'orientazione SudOvest – NordEst, è lunga 2.45km, con un dislivello massimo di 35 metri. Evidenzia una sostanziale morfologia sub pianeggiante, tranne che per le colline in prossimità del cimitero di Forio e dell'Istituto comprensivo. Attraversa tutta la

valle di Forio e presenta una sostanziale continuità dei termini rappresentativi della situazione del sottosuolo (al top SMlh e GMcd, in profondità le sabbie del sottosuolo di Forio – SMsp – e poi gli SFGRS dei tufi di Citara e del Monte Epomeo). Intercetta i due lahar di Forio a sud e San Francesco a nord, intervallati dai depositi grossolani di debris flow. Nella porzione centrale si intercetta la valle sepolta dove risulta eroso il complesso del tufo di Citara. La sezione intercetta una faglia diretta che ribassa l'area del centro di Forio. Lungo tutta la sezione è stato anche possibile ricostruire la superficie della falda acquifera.

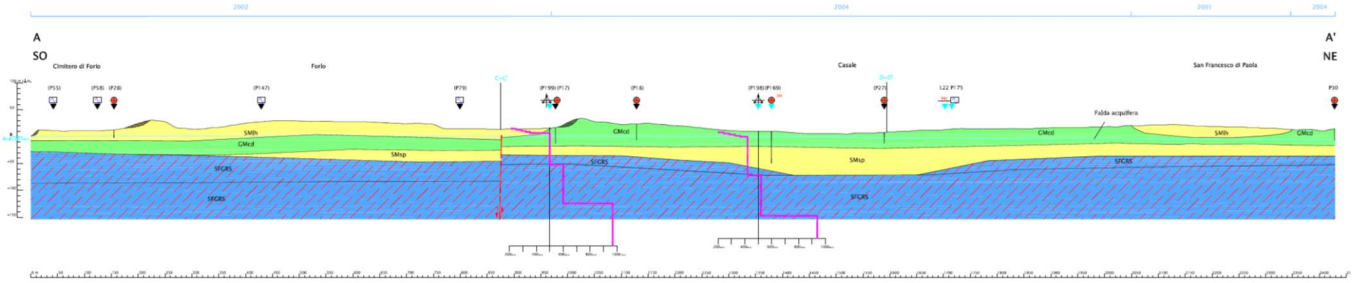



*Figura 122 - Sezione A-A'.*

La Sezione **B-B'** presenta anch'essa un'orientazione SudOvest – NordEst, ed è lunga 2.50km, con un dislivello massimo di 70 metri, ed è tracciata a monte della A-A'. Presenta una sostanziale morfologia sub pianeggiante, tranne che per la scarpata di Cava dell'Isola e della collina di Monterone. È caratterizzato al top dalla presenza del GMcd con spessori anche di 60/70 metri. Intercetta anch'essa i lahar di Forio e San Francesco e la faglia diretta che ribassa il centro di Forio.
Nella porzione centrale si intercetta la valle sepolta dove risulta eroso il complesso del tuo di Citara. Lungo tutta la sezione è stato anche possibile ricostruire la superficie della falda acquifera.

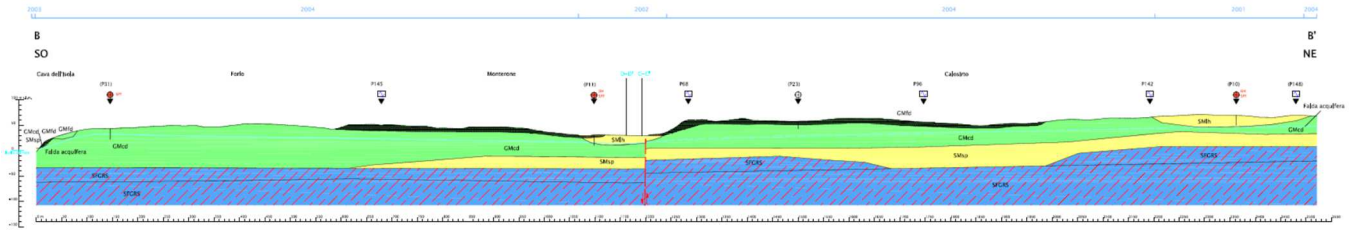



*Figura 123 - Sezione B-B'.*

La Sezione **C-C'** è lunga ben 3.35km, presenta un'orientazione ONO – ESE, con un dislivello massimo di 700 metri (dal porto di Forio fino all'Epomeo). Morfologicamente può essere suddivisa in due porzioni ben definite, quella del centro urbano di Forio con basse variazioni di quote e pendenze limitate (10° massimo) e quella che conduce fino al Monte Epomeo, con pendenze superiori anche ai 45°. La sezione passa attraverso il versante di Monte Nuovo, caratterizzato dalla presenza della Deformazione Gravitativa Profonda di Versante. La sezione risulta diversa da quella riportata

nell'allegato 1 della "Relazione Finale" del gruppo di lavoro Centro MS ad est rispetto alla località Monterone. La differenza consiste nella presenza o meno dei complesso tufaceo al letto dei depositi di debris avalanche/ frane e quindi della presenza a scarse profondità del complesso lavico basale. L'interpretazione degli scriventi è riconducibile a quella di Vezzoli et al del 1998 (Figura 125), mentre quella del Cento Ms (Figura 126) deriva dall'interpretazione di Della Seta et al. del 2015 (Figura 127).

Questi ultimi presentano il top del complesso lavico così alto in funzione dei corpi lavici delle Lave di Rione Bocca (133 ka), stratigraficamente anteriori al Tufo Verde del Monte Epomeo. Gli stessi corpi lavici, però, sono attribuiti da Sbrana & Toccaceli (2011) a una intrusione ipoabissale della Unità di Vagnulo-VNU, successiva al Tufo Verde del Monte Epomeo (60-55 ka). A questa ultima ipotesi si è fatto riferimento per la Sezione C-C'.

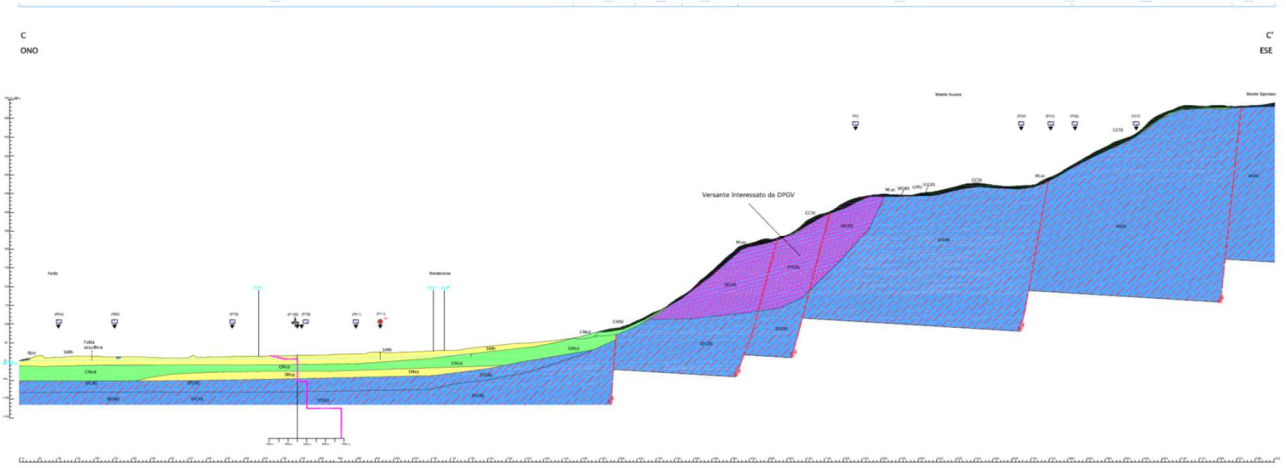



*Figura 124 - Sezione C-C'.*

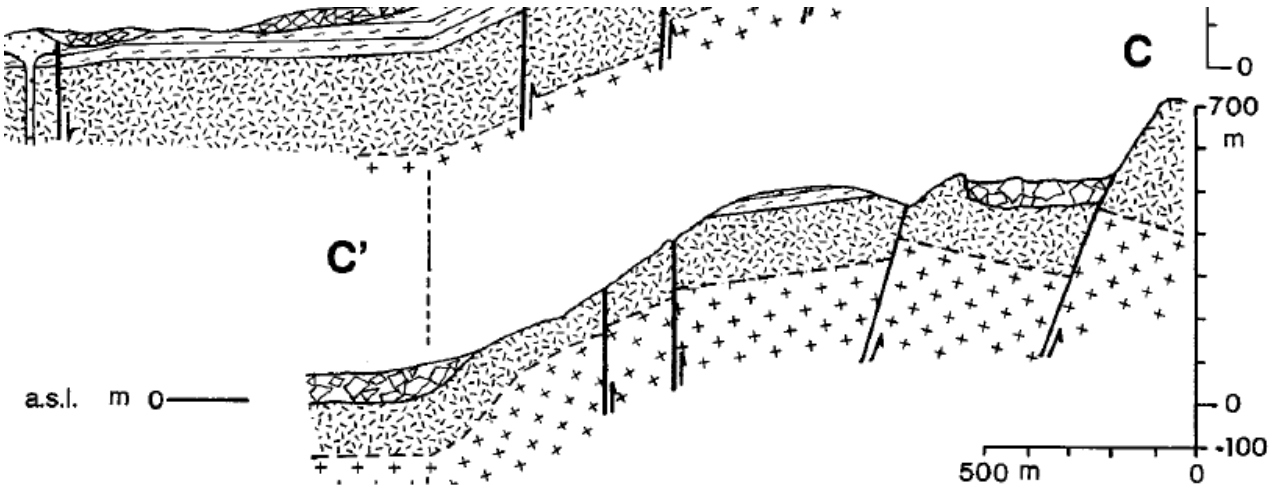



*Figura 125 - Sezione tratta da Tibaldi - Vezzoli 1998.*

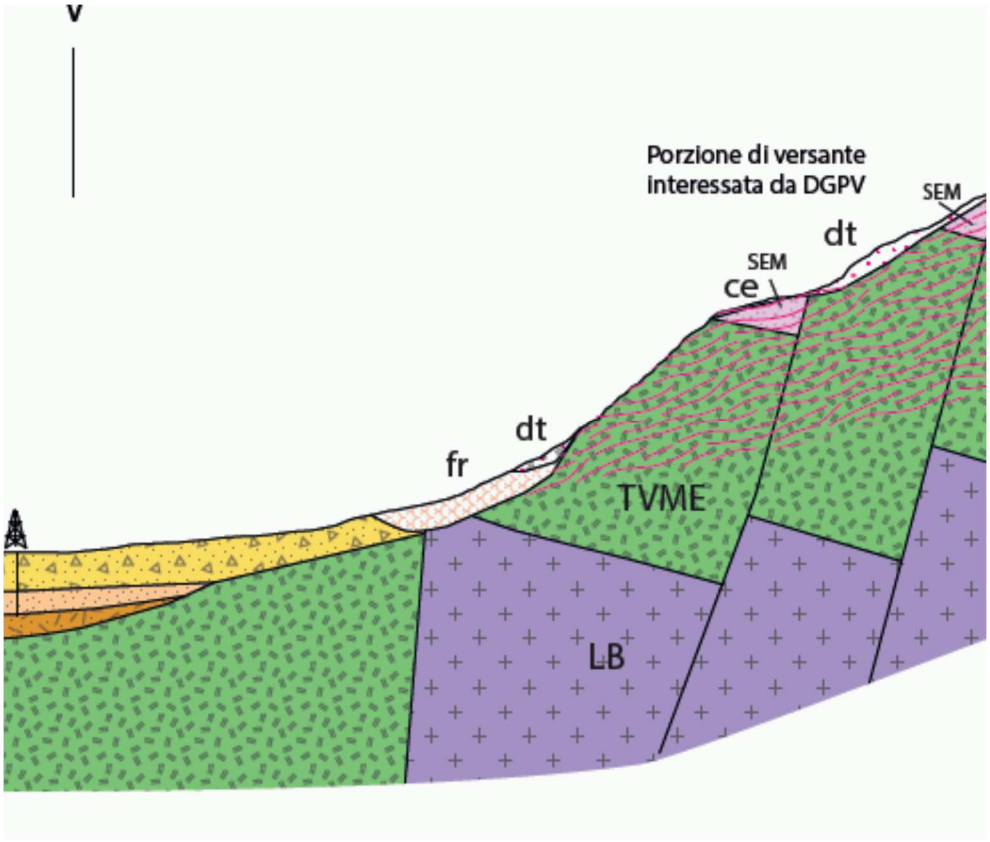



*Figura 126 - Sezione IV allegato 1 Gruppo di lavoro Centro MS.*

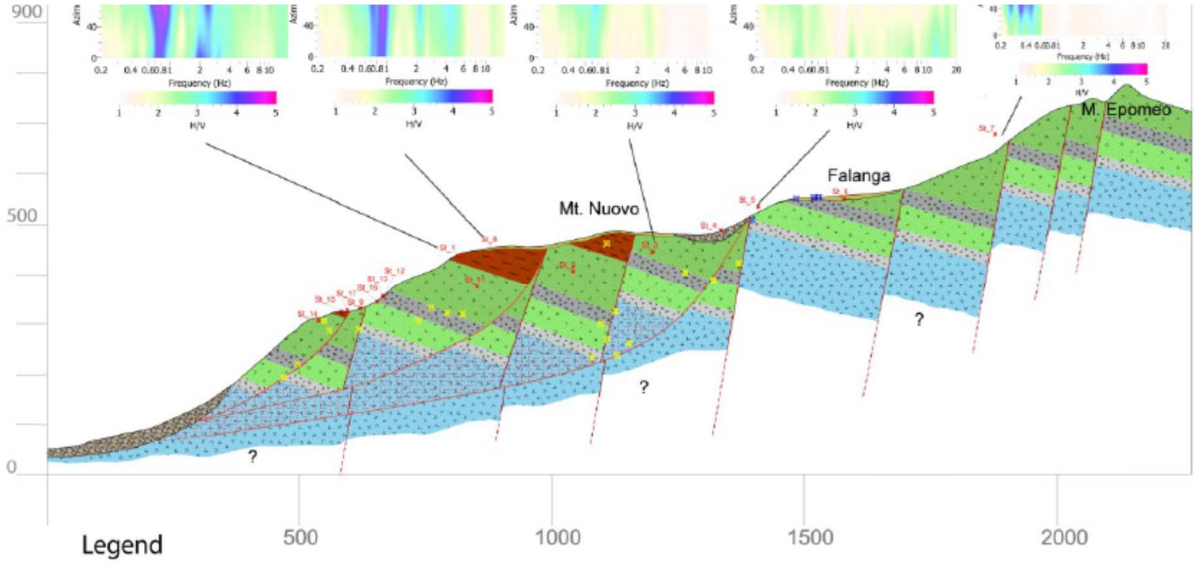



*Figura 127 - Sezione tratta da Della Seta et al. 2015.*

La Sezione **D-D'** ha un'orientazione Sud – Nord, ed è lunga quasi 3.25km, con un dislivello massimo di 110 metri. Morfologicamente risulta molto articolata in quanto si passa dalla zona collinare di Capo Verde e Mortola fino alla piana di Baiola/San Francesco. Attraversa tutta la valle di Forio e presenta una sostanziale continuità dei termini rappresentativi della situazione del sottosuolo (al top SMlh e GMcd, in profondità le sabbie del sottosuolo di Forio – SMsp – e poi gli SFGRS dei tufi di

Citara e del Monte Epomeo). Intercetta i due lahar di Forio a sud e San Francesco a nord, intervallati dai depositi grossolani di debris flow. Nella porzione centrale si intercetta la valle sepolta dove risulta eroso il complesso del tuo di Citara. La sezione intercetta una faglia diretta che ribassa l'area del centro di Forio. Lungo tutta la sezione è stato anche possibile ricostruire la superficie della falda acquifera.

Risulta importante perché mostra il passaggio dalla zona di "Citara" a quella di "Forio", intercettando anche l'horst di Pietre Rosse.

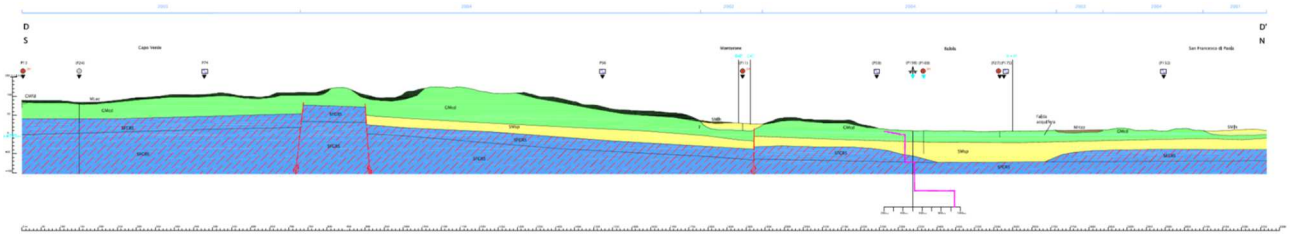



*Figura 128 - Sezione D-D'.*

La sezione **E-E'** ha un'orientazione Ovest – Est, ed è lunga 2.70km, con un dislivello massimo di 200 metri. La porzione ad ovest intercetta gli alti morfologici di Contrada Amalfitano e di Citruria. La sezione, tracciata in prossimità del passaggio dall'area vulcanica di Campotese-Panza a quella di Citara-Forio, intercetta il bordo settentrionale del cratere di Campotese e soprattutto la faglia diretta che ribassa l'area di Citara-Forio e mettendo a contatto il complesso dei tufi (SFGRS) con il basamento lavico (SFLP)

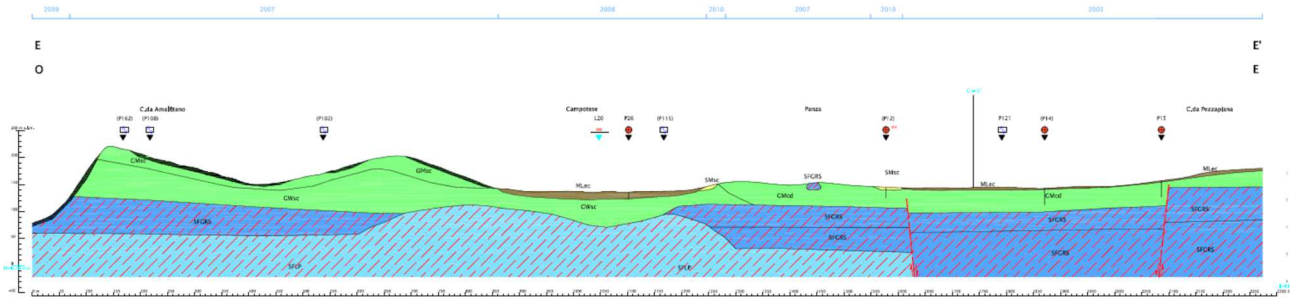



*Figura 129 - Sezione E-E'.*

La Sezione **F-F'** è parallela alla E-E', lunga 2.19km, con un dislivello massimo di circa 100 metri. Presenta una morfologia piuttosto articolata nella parte più meridionale del territorio comunale.

Intercetta il centro vulcanico del Pomicione ad ovest, mentre ad est la faglia diretta che ribassa l'area di Flumerie e la separa dalla zona di Campotese.

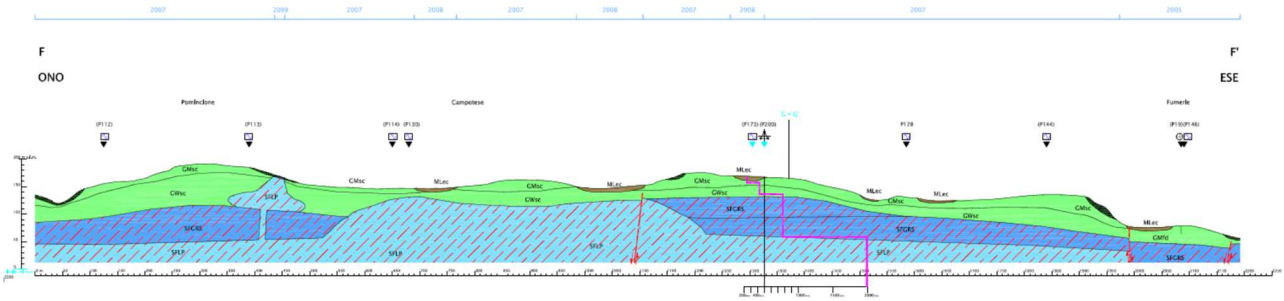



*Figura 130 - Sezione F-F'.*

La settima ed ultima Sezione (**G-G'**) presenta un'orientazione SudSudOvest – NordNordEst, è lunga 2.15km, con un dislivello massimo di circa 210 metri. Nella porzione verso sud è caratterizzata dalla presenza della collina di loc. La Cima, mentre verso nord si intercettano le propaggini dell'Epomeo. La sezione risulta molto importante in quanto la stessa evidenzia il netto passaggio tra l'area di Panza (la sezione intercetta proprio il centro della frazione) e quella di Citara / Forio ribassata dalla faglia diretta indicata in sezione. L'area di Campotese è caratterizzata soprattutto dalla presenza del complesso lavico di base molto più superficiale, ricoperto prevalentemente da piroclastiti sciolte.

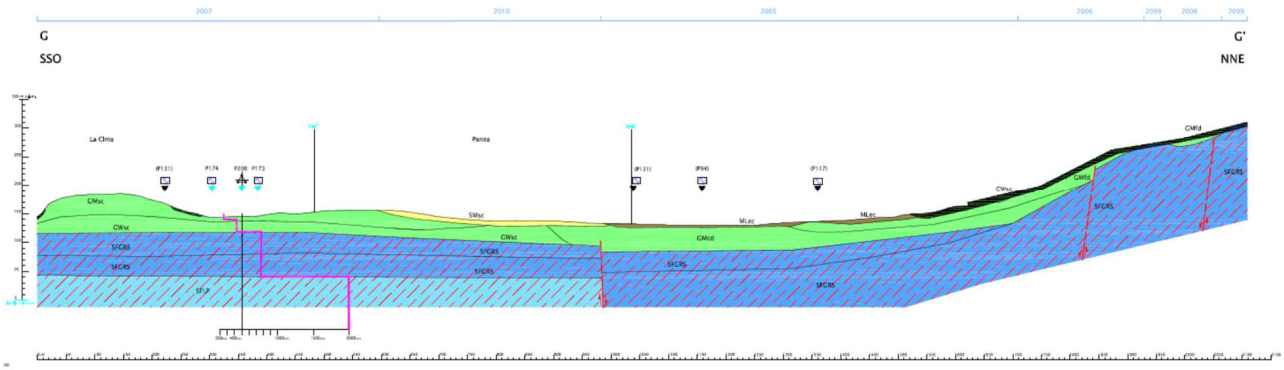



*Figura 131 - Sezione G-G'.*

# 6. Interpretazioni e incertezze

Per quanto riguarda i dati reperiti, dal punto di vista geotecnico e sismico è stato possibile ricostruire in maniera sufficientemente adeguata i terreni superficiali (spessore massimo compreso tra i 20m ed i 30m), grazie agli 8 sondaggi del vecchio PRG ed una serie di indagini anche recenti effettuate per conto dell'Amministrazione Comunale (tipo le verifiche sismiche degli edifici scolastici presenti sul territorio). Ovviamente, come ampiamente discusso in precedenza ed evidenziato nelle sezioni geologico – tecniche sopra riportate, dai dati in possesso non è stato assolutamente possibile intercettare con indagini in maniera diretta i substrati (sismici o litologici che siano), ma gli stessi sono stati valutati sulla base di rilievi di campo nelle zone dove affiorano, ed in maniera indiretta tramite i tre array sismici e le inversioni congiunte (utilizzando masw ed HVSR).
In generale è possibile evidenziare che i primi metri della successione si presentano sempre con un buon grado di addensamento, difatti su 8 prove penetrometriche dinamiche DPSH archiviate ben 7 raggiungono valori di rifiuto strumentale a profondità comprese tra i 6 e gli 11 metri dal p.c., e solo una (quella effettuata presso il plesso S. Caterina, che arriva fino alla profondità di 13 metri dal p.c., senza incontrare valori di rifiuto strumentale).
Il numero di colpi di SPT in foro dei sondaggi presentano quasi sempre valori superiori a 10 (tranne che nei primi metri della successione) e spesso raggiungono i valori di rifiuto strumentale. Solo in due casi si sono denotati valori di Nspt inferiori a 10 in profondità, nei sondaggi del PRG di San Francesco e Monterone. In particolare il sondaggio di loc. San Francesco presenta valori di Nspt particolarmente bassi fino almeno a 11m dal p.c..

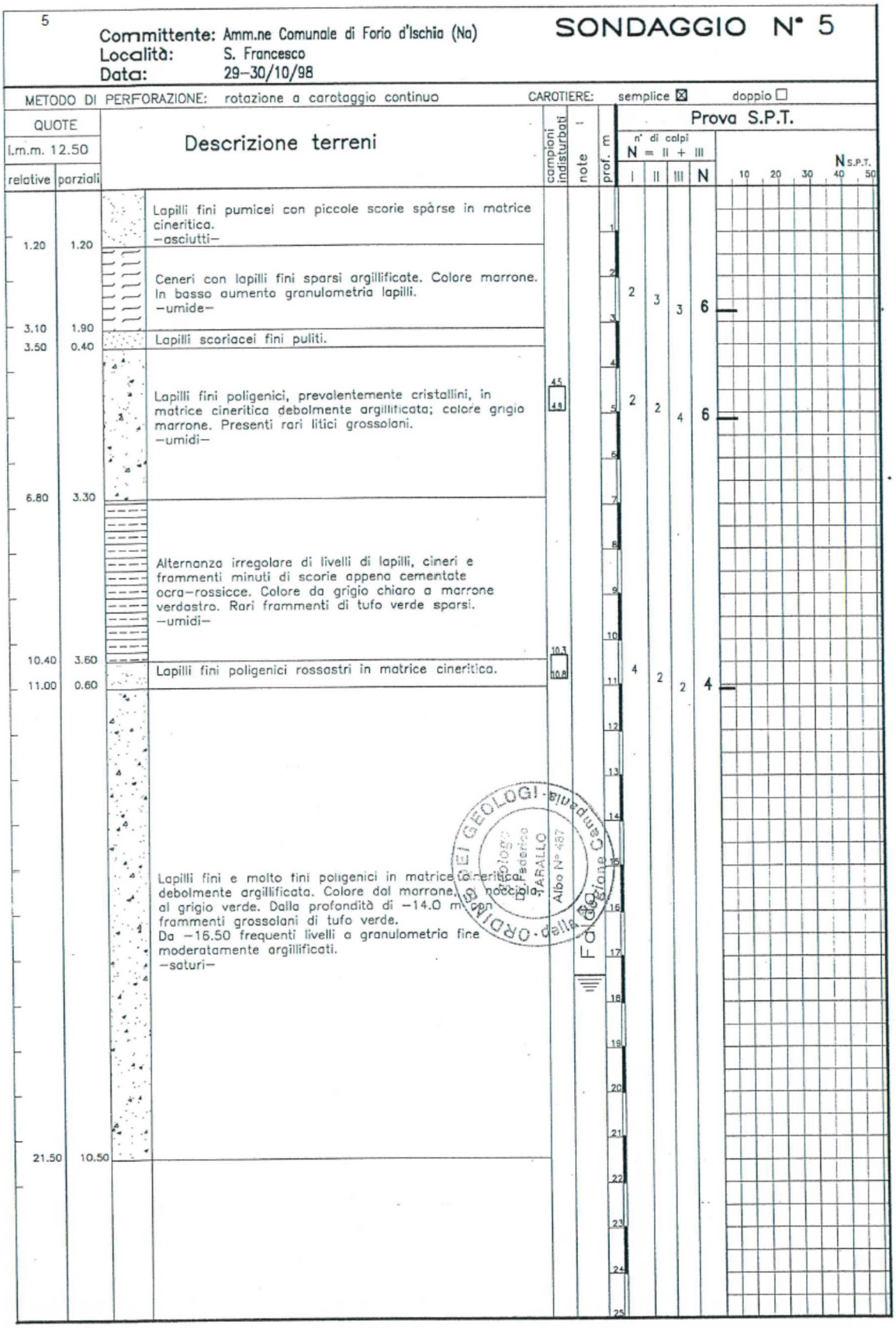



*Figura 132 - Sondaggio P34 loc. Forio.*

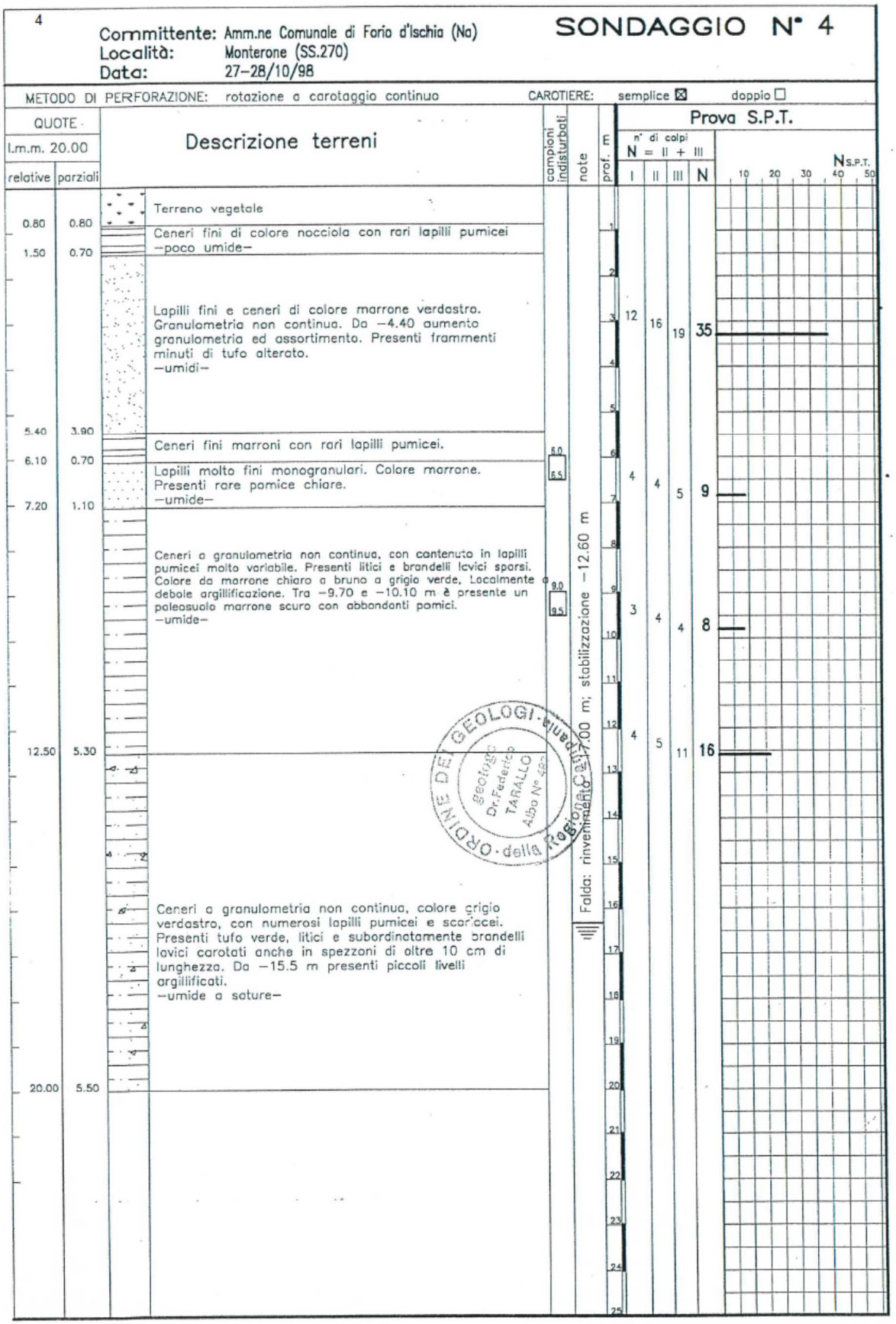



*Figura 133 - Sondaggio P15 loc. Monterone.*

Gli unici 5 dati di laboratorio presenti tra i documenti allegati allo studio di MS con prova di taglio finalizzato alla valutazione degli angoli di attrito presentano valori compresi tra il 29° ed i 32° gradi di attrito.

Per quanto riguarda le velocità delle Vs per definire i valori di ogni complesso sono state effettuate le analisi statistiche previste dai Protocolli al Capitolo 6, utilizzando tutte le DH archiviate (utili per la definizione delle velocità nei primi 20/30m), la DH da noi effettuata spinta fino alla profondità di 50m dal p.c., i tre array sismici, le 11 masw e le 2 inversioni congiunte.

Le modalità di elaborazione delle inversioni congiunte sono già state descritte in precedenza al paragrafo 4.2.

Le maggiori incertezze dello studio effettuato sono comunque relative alla presenza di un basso numero di dati per l'individuazione del bedrock sismico, elemento fondamentale per la modellazione 1D e 2D. Difatti gli HV effettuati nella porzione centrale del territorio comunale, con picchi inferiori ad 1Hz, non permettono di individuare un bedrock se non a grandi profondità (superiori ai 100 metri), mentre nelle aree di Zaro e Campotese la presenza relativamente meno profonda del bedrock lavico permette una più semplice individuazione, anche se lo stesso, in funzione proprio della tipologia di substrato, risulta individuabile a differenti profondità.

Per maggiore dettaglio si ricorda che tutte le informazioni disponibili in merito ai parametri geotecnici e geofisici sono archiviate nel database CdI_Tabelle nella cartella Forio_41/Indagini.

A complicare le cose sull'isola d'Ischia è la presenza della circolazione profonda dei fluidi geotermali, che modificano le caratteristiche geotecniche e sismiche dei depositi interessati, in particolar modo dei substrati tufacei (Tufo di Citara e Tufo Verde del Monte Epomeo).

Dunque è possibile che localmente il substrato sismico possa presentare profondità molto differenti da punto a punto anche in funzione della presenza di acque termali particolarmente calde.

**Descrizione variazione del Fattore di Amplificazione tra la Modellazione 1D e 2D**

Il fattore di Amplificazione FA è un parametro numerico che descrive quanto il moto sismico, misurato nel sito di riferimento (bedrock sismico piatto) è amplificato nell'area oggetto di studio. Le grandezze scalari che quantificano tale fattore sono rappresentabili come il rapporto tra il valore integrale di output e di input calcolato su determinati spettri di risposta in un range di periodo (range di periodi selezionati appositamente).

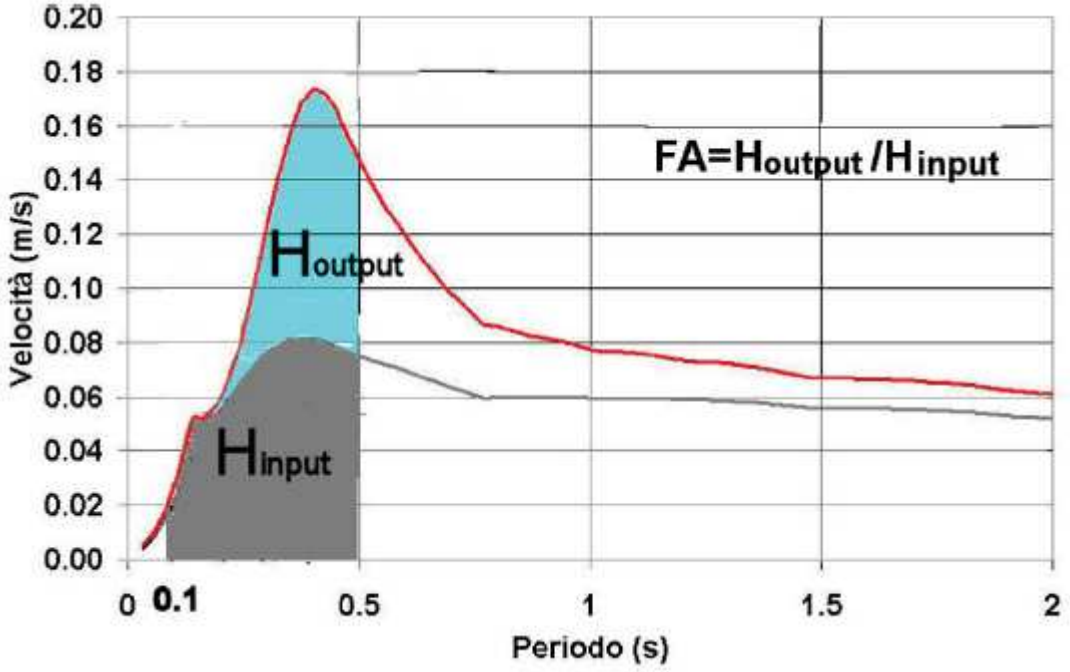



*Figura 134 - Calcolo integrale fattore di FA.*

In letteratura il range di periodo sul quale eseguire il calcolo del Fattore di Amplificazione viene definito a seconda della tipologia di costruzione che deve essere realizzata. Di norma ("La Microzonazione Sismica della città di Perugia") il range che va da 0.1 a 0.5 secondi viene assunto come rappresentativo per edifici con strutture particolarmente rigide e sviluppo verticale indicativamente fino a 5 piani; il periodo che va da 0.5 a 1.5 secondo viene assunto come rappresentativo del periodo proprio di edifici con strutture flessibili e sviluppo verticale indicativamente compreso tra 5 e 15 piani.

Di seguito si riporta una tabella di comparazione tra i valori di FA ottenuti con la modellazione 1D (vedasi i paragrafi successivi) per determinate MOPS e quelli relativi ai punti della modellazione 2D presenti all'interno delle stesse. Si può notare una sostanziale congruità di valori per i valori FA dei periodi 0.1-05s e 0.7-1.1s, mentre valori difformi si evidenziano per l'FA del periodo 0.4-0.8s per le MOPS 2001 (con differenza di 0.43) e 2005 con differenza di 0.58), con la modellazione 2D che evidenzia dunque, valori sensibilmente più elevati.

La Carta di Microzonazione di III Livello è stata redatta, di concerto con il gruppo di lavoro del Centro MS, utilizzando i valori degli FA più elevati per ogni MOPS e per ogni periodo individuati dal confronto tra le modellazioni 1D e 2D

*Tabella 44 - Confronto tra I valori di Fa delle modellazioni 1D e 2D.*

| | FA 0.1-0.5 1D | FA 0.1-0.5 2D | FA 0.4-0.8 1D | FA 0.4-0.8 2D | FA 0.7-1.1 1D | FA 0.7-1.1 2D |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Zona 2002 | 1.24 | 1.39 | 1.59 | 1.90 | 1.81 | 2.01 |
| Zona 2003 | 1.75 | | 1.91 | | 1.86 | |
| Zona 2004 | 1.36 | 1.43 | 1.69 | 1.48 | 1.88 | 1.53 |
| Zona 2005 | 1.57 | 1.50 | 1.77 | 2.06 | 1.94 | 2.22 |
| Zona 2006 | | 1.32 | | 1.50 | | 1.38 |

| | FA 0.1-0.5 1D | FA 0.1-0.5 2D | FA 0.4-0.8 1D | FA 0.4-0.8 2D | FA 0.7-1.1 1D | FA 0.7-1.1 2D |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Zona 2007 | 2.03 | 1.63 | 2.54 | 2.06 | 2.47 | 2.10 |
| Zona 2008 | 1.47 | | 1.89 | | 2.39 | |
| Zona 2010 | 1.99 | 1.47 | 2.69 | 2.03 | 2.85 | 1.18 |

# 7. Metodologie di elaborazione e risultati

Le analisi numeriche previste dall'Ordinanza n.1 del 27 novembre 2018, hanno riguardato la determinazione di alcuni parametri rappresentativi della Risposta Sismica Locale (RSL) in tutte le microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS) definite come stabili e soggette a fenomeni di amplificazione. I parametri di interesse determinati sulla base delle analisi 1D di RSL sono stati:

- Accelerogrammi (in numero di 7) rappresentativi della pericolosità sismica locale (scenari di scuotimento) associata ad eventi con tempo di ritorno di 475 anni e relativi spettri di risposta elastici in pseudo-accelerazione con smorzamento pari al 5% dello smorzamento critico (Sa);
- Fattori di Amplificazione (FA) relativi a tre intervalli di periodi (0.1-0.5s, 0.4-0.8s e 0.7-1.1s).

La modellazione è stata effettuata utilizzando il codice di calcolo STRATA che opera nel dominio delle frequenze e modella il comportamento non lineare dei terreni mediante il metodo lineare equivalente (EQL).
Il codice monodimensionale Strata (Kottke and Rathje, 2008) calcola la risposta sismica di un deposito stratificato orizzontalmente, a comportamento visco-elastico lineare, poggiante su bedrock deformabile a superficie orizzontale, soggetto alla propagazione verticale di onde di taglio. Il codice opera nel dominio delle frequenze analogamente al codice SHAKE e sue successive modificazioni (Schnabel et. Al. 1972, Idriss & Sun, 1992), senz'altro il codice di calcolo per analisi monodimensionali più conosciuto e diffuso.
Nel modello, il sottosuolo è schematizzato mediante una successione di strati orizzontali sovrapposti omogenei (modelli 1D). I principali dati richiesti in ingresso sono:

- Lo scuotimento sismico (accelerogramma) su basamento sismico affiorante ovvero su un sito di riferimento rigido e superficie topografica orizzontale (Categoria di sottosuolo A e Categoria topografica T1 secondo la classificazione NTC18, corrispondente ad un ammasso roccioso o terreno rigido con superficie suborizzontale e valori della velocità media delle onde S nei primi 30 metri almeno pari a 800 m/s); questo scuotimento è detto anche "moto di input" o "moto di riferimento" e deve essere assegnato al codice di calcolo come "rock outcropping input motion" (indicato anche come '2A' nel codice STRATA).
- Il profilo di velocità delle onde S (Vs) fino alla profondità corrispondente al basamento sismico ovvero al tetto di un ammasso roccioso o terreno rigido caratterizzato da valori di Vs almeno pari a 800 m/s; più in generale si deve identificare come profondità di riferimento quella del tetto del primo strato della successione che presenta valori di velocità delle onde

S maggiori di 750-800m/s con uno spessore ritenuto sufficientemente significativo in relazione al modello geologico del sito.

- Le curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato G/G0 e del rapporto di smorzamento D, in funzione della deformazione di taglio, per ciascuno dei materiali presenti nel modello di sottosuolo.

## 7.1 Zone stabili suscettibili di amplificazione

Le zone stabili suscettibili di amplificazione interessate dalla modellazione numerica sono quelle ricomprese nei limiti delle zone di microzonazione di III Livello e non interessate da fenomenologie di instabilità (frane e liquefazione).

Per il centro urbano di Forio le MOPS sottoposte ad analisi sono:

- MOPS 2002;
- MOPS 2003;
- MOPS 2004;
- MOPS 2006 (per un piccolissimo areale).

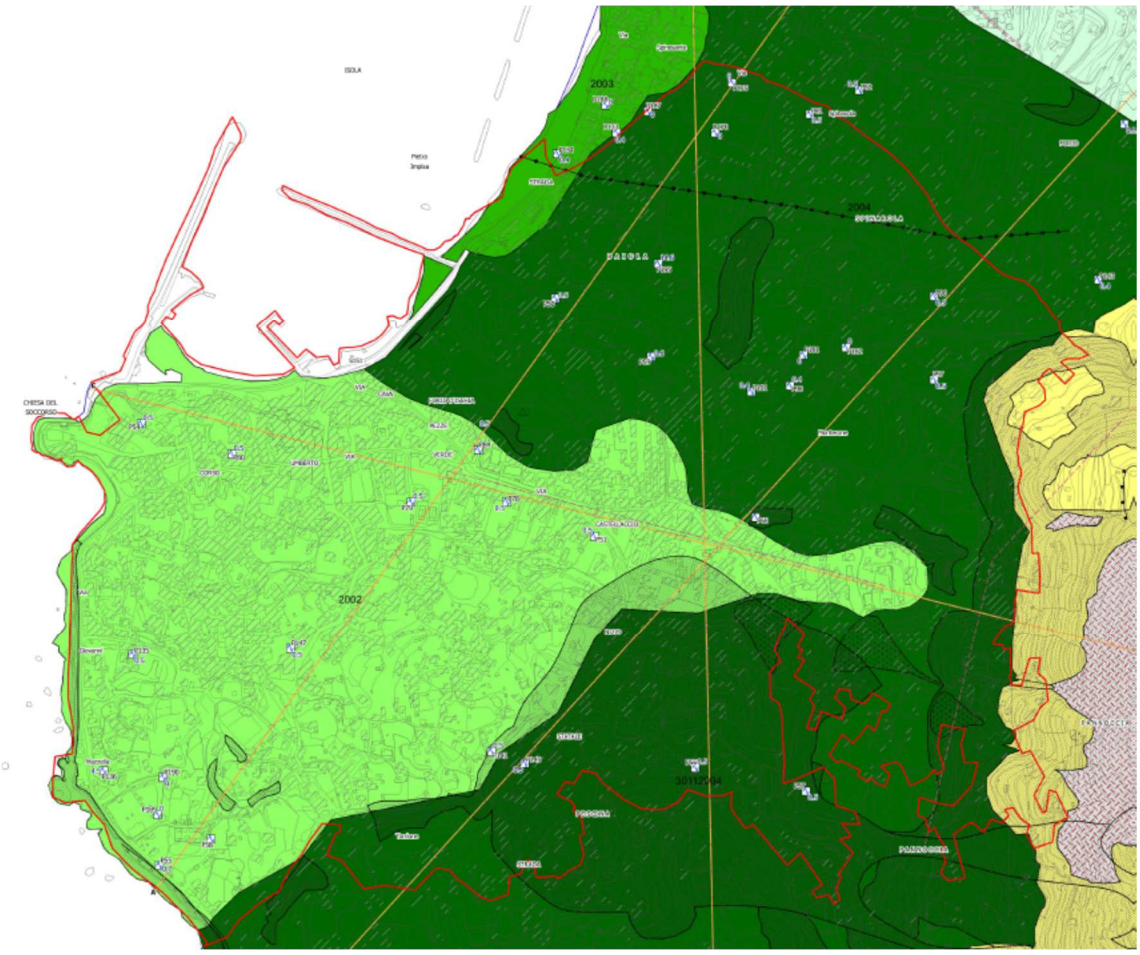



*Figura 135 - Stralcio Carta delle MOPS per il centro di Forio*

Per il centro urbano di Panza le MOPS sottoposte ad analisi sono:

- MOPS 2005;
- MOPS 2007;
- MOPS 2008 (per un piccolissimo areale);
- MOPS 2010.

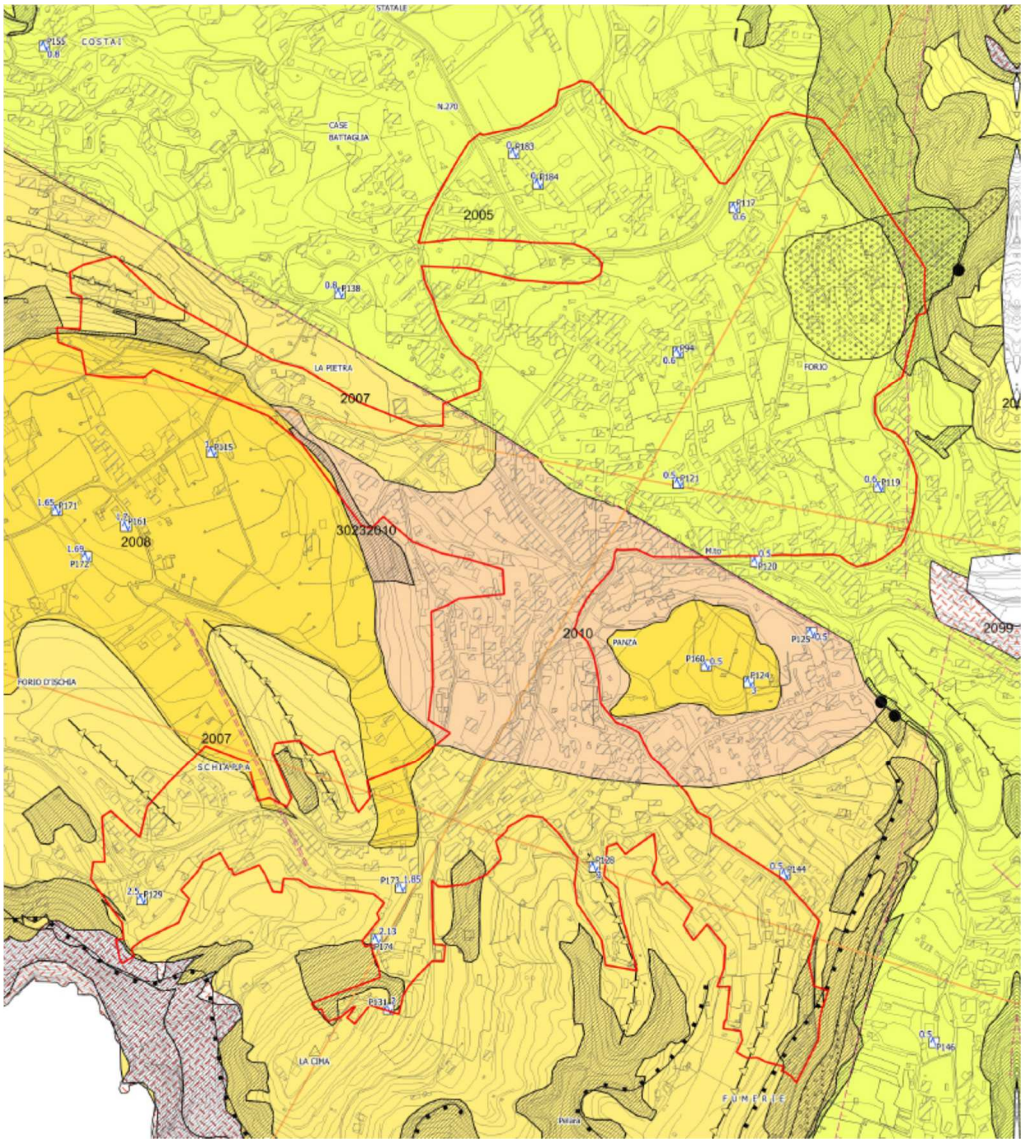



*Figura 136 - Stralcio Carta delle MOPS per il centro di Panza*

Le Sezioni da sottoporre a modellazione 2D intercettano invece le seguenti MOPS:

- MOPS 2002;
- MOPS 2004;
- MOPS 2005;
- MOPS 2006;
- MOPS 2007;
- MOPS 2010.

### 7.1.1 Scelta dell'input sismico

I 7 accelerogrammi utilizzati per la definizione dell'input sismico relativi alla pericolosità sismica di base sono quelli forniti dall'Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria Del Consiglio Nazionale delle Ricerche (per il centro per la Microzonazione Sismica e le sue applicazioni).
Lo stesso istituto ha fornito il report per la "Definizione dell'input sismico da utilizzare per le analisi numeriche di risposta sismica locale (1D e 2D)" di seguito riportato:

"*Nell'ambito degli studi di microzonazione sismica di livello III (MZS) si prevede la realizzazione di modellazioni numeriche mono o bidimensionali del moto sismico. Tali simulazioni vengono realizzate assumendo come moto di input un gruppo di 7 accelerogrammi rappresentativi dello spettro di progetto previsto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018 (NTC18). Le NTC18 si basano sulla carta di pericolosità sismica a scala nazionale (OPCM 3519 del 28/04/2006; Montaldo et al., 2007) che fornisce i parametri necessari per la formulazione degli spettri di progetto, intesi su suoli rigidi, su una griglia regolare di punti distribuita sul territorio nazionale. In Figura 1 si mostrano i valori di picco di accelerazione previsti dalla mappa di pericolosità per l'Isola di Ischia per il periodo di ritorno di 475 anni, utilizzato di prassi per gli studi di MZS.*

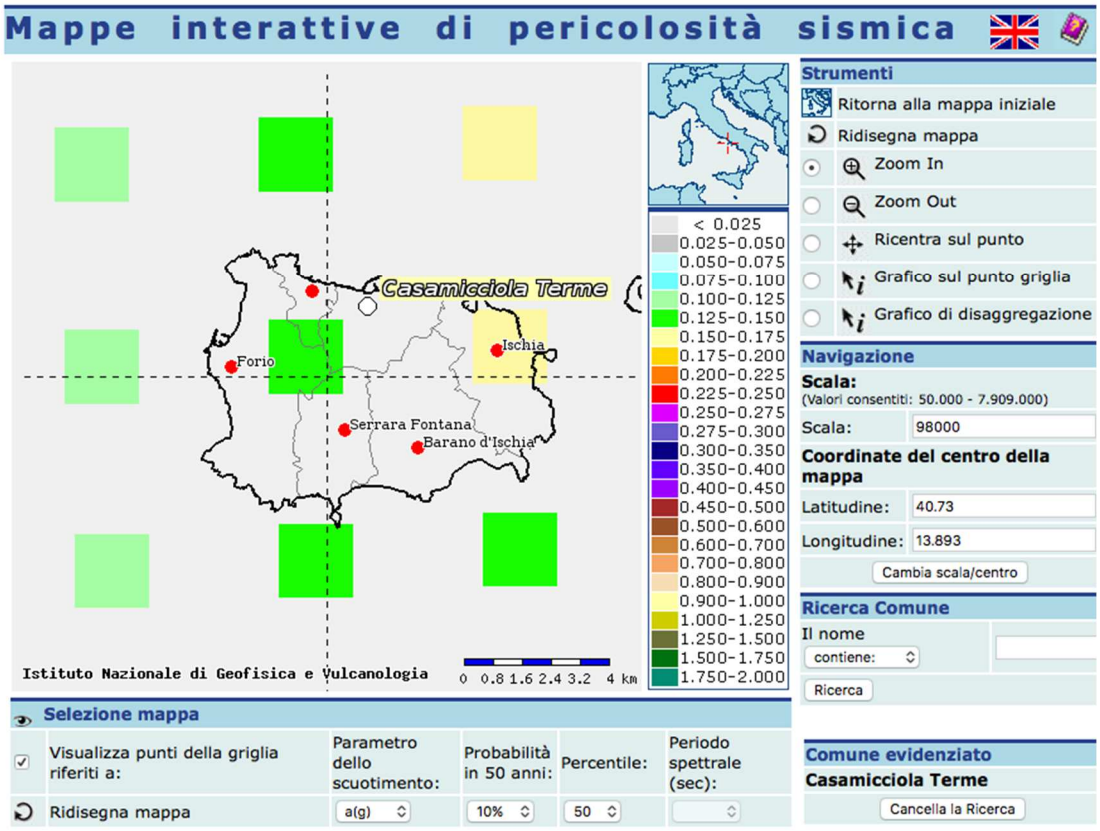



*Figura 137 - Valori di a(g) per l'isola di Ischia come forniti dalla mappa di pericolosità a scala nazionale (disponibile al sito http://esse1.mi.ingv.it).*

*Come si può notare dalla figura, la spaziatura del grigliato utilizzato nelle mappe di pericolosità è relativamente ampia rispetto alle dimensioni dell'isola che è interessata soltanto da due punti della stessa griglia.*
*È possibile ottenere dalle NTC18 i valori dei parametri che descrivono lo spettro di progetto. In questo caso viene effettuata una media pesata dei valori associati ai quattro punti della griglia più vicini al centroide del comune di interesse. In Tabella 1 vengono riportati i valori dei parametri $a_g$, $F_0$ e $T_C$ per i tre comuni interessati dalla MZS.*

*Tabella 45 - Parametri per la costruzione degli spettri di normativa per i tre comuni interessati dalla MZS (NTC18).*

| Comune | $a_g$ | $F_0$ | Tc |
|---|---|---|---|
| Casamicciola Terme | 0.152 | 2.285 | 0.325 |
| Lacco Ameno | 0.148 | 2.289 | 0.327 |
| Forio | 0.137 | 2.321 | 0.333 |

*In Tabella1 si possono notare alcune differenze tra i valori dei parametri per i tre comuni interessati dalla MZS. Tuttavia lo scarto tra i valori di minimo e massimo della distribuzione è inferiore al 10% di $a_g$ tabellato per il comune di Casamicciola Terme.*

*La disaggregazione della mappa di pericolosità sismica (disponibile al sito http://esse1.mi.ingv.it) rappresenta il riferimento per l'individuazione dello scenario, in termini di magnitudo e distanza, che maggiormente contribuisce alla pericolosità del sito in esame.*
*Gli intervalli delle coppie di valori Magnitudo-Distanza ottenuti dall'analisi di disaggregazione in termini di PGA per il tempo di ritorno di 475 anni sono: Mag Min: 4; Mag Max: 5.5; Distanza:0-20 Km.*

*Lo spettro elastico in accelerazione di riferimento al sito è costruito a partire dalle indicazioni di NTC18, specificando le coordinate geografiche del sito, la categoria di sottosuolo (A, B, C, D o E), la categoria topografica (T1, T2, T3, T4), la "Vita Nominale" dell'opera strutturale, la "Classe d'Uso" e lo "Stato Limite" di interesse.*
*Viste le differenze osservate in Tabella 1, visto l'aggiornamento attuale in corso della mappa di pericolosità e data la contiguità dei territori comunali, si è deciso di definire un solo spettro di input per i tre comuni e di calibrarlo rispetto al valore di pericolosità di base relativo al limitrofo comune di Ischia, che risulta essere più cautelativo (Figura 1). In particolare, le coordinate adottate per la taratura dello spettro di target sono le seguenti: Lat WGS84=40.733°, Lon WGS84=13.947°.*
*Di seguito vengono specificati i criteri per la costruzione dello spettro elastico di riferimento e i criteri per la ricerca della spettrocompatibilità.*

*Lo spettro elastico in accelerazione di riferimento, per un tempo di ritorno Tr 475 anni, è stato costruito a partire da:*

1. *Categoria di sito secondo NTC18 (Site classification (EC8)): A, A*;*
2. *Classe topografica secondo NTC18 (Topography): T1;*
3. *Vita nominale (Nominal life): 50 anni;*
4. *Classe d'uso (Building functional type): II, cu = 1.0;*
5. *Stato limite, espresso come probabilità (Limit state probability): 10%*

*I criteri per la compatibilità con lo spettro di normativa sono:*

1. *Intervallo di periodo (Period range): 0.1 - 1.1s*
2. *Tolleranza (Tolerance): upper: 30; lower: 10*
3. *Scalatura dei records (Scaled records): Si*

*Per l'intervallo di periodi si fa riferimento all'Ord. n. 1/2018 del Commissario Straordinario per la ricostruzione nei territori dei Comuni di Casamicciola Terme, di Forio e di Lacco Ameno dell'isola di Ischia.*

*Di seguito vengono specificati i criteri per la scelta delle registrazioni da scalare, rispetto alle quali occorre verificare la spettrocompatibilità.*
*Gli accelerogrammi naturali tra i quali si è effettuata la ricerca della spettrocompatibilità sono stati scelti tra quelli presenti nella banca dati ESM - Engineering Strong-Motion database (https://esm.mi.ingv.it; Luzi et al., 2016) ed aventi ben definite caratteristiche in termini di: i) intervallo di magnitudo e distanza sorgente-sito; ii) tipo di meccanismo focale dell'evento; iii) categoria di sottosuolo della postazione di registrazione. Per quanto riguarda gli intervalli di magnitudo da utilizzare nella ricerca degli accelerogrammi si utilizza di prassi il diagramma di disaggregazione, che consente di verificare il contributo delle varie sorgenti sismogenetiche alla pericolosità. Nel caso di Ischia sono stati adottati criteri di scelta delle registrazioni meno restrittivi per quel che riguarda la classe di sito e il meccanismo focale della sorgente, allo scopo di includere registrazioni relative ad eventi vicini e caratterizzati da profondità ipocentrali paragonabili a quelle delle sorgenti presenti nell'area di studio.*
*La ricerca delle registrazioni nella banca dati è stata quindi effettuata per eventi con le seguenti caratteristiche:*

1. *Classificazione di sito (Station site classification criteria): A, A* oppure Non Definito (allo scopo di includere registrazioni accelerometriche relative ad eventi vicini);*
2. *Magnitudo minima e massima per la selezione dei record (Magnitude min - max): 4-5.5;*
3. *Tipo di magnitudo (Type of magnitude to consider): Mw o Ml indifferentemente (Mw or Ml indifferently)*
4. *Distanza epicentrale minima e massima per la selezione dei record (Epicentral distance min - max): 0-20 km*
5. *Inclusione / Esclusione records (Include…): late triggered: No; analog records: No*

6. *Meccanismo focale (Focal mechanism): faglia normale (Normal faulting), faglia trascorrente (strike –slip faulting) e faglia indefinita. Questi ultimi due meccanismi focali sono stati scelti allo scopo di avere un dataset di registrazioni comprensivo di forme d'onda rappresentative di terremoti avvenuti a profondità ipocentrali dell'ordine dei 2-3 Km.*

*Per la selezione degli accelerogrammi da utilizzare come input è stato utilizzato il codice In-Spector (Acunzo et al, 2014).*
*L'insieme dei 7 accelerogrammi è stato selezionato in modo che la loro media, in un intervallo di periodo di interesse, risulti compresa tra una tolleranza minima e massima rispetto allo spettro di riferimento. NTC18 definisce una tolleranza minima del 10% (fissata quindi anche nel presente caso). NTC18 non definisce invece una tolleranza massima, che, nel caso presente, è stata fissata al 30%.*
*I dati sono resi disponibili tramite un apposito servizio FTP raggiungibile all'indirizzo ftp://150.146.31.30. Per accedere al servizio sono state configurate una serie di utenze, con accesso ristretto ai singoli Comuni. Le credenziali di accesso sono già disponibili presso le amministrazioni comunali.*
*Per ogni comune vengono forniti:*

1. *7 accelerogrammi in formato ASCII (due colonne: tempo in s, valori di accelerazione in g);*
2. *7 spettri di risposta in accelerazione corrispondenti ai 7 accelerogrammi in formato ASCII (due colonne: periodo in s, accelerazione spettrale in g);*
3. *Tabella_Parametri, in formato .xls, in cui vengono sintetizzate le caratteristiche degli eventi selezionati;*
4. *SPETTRO_INPUT_g.txt, in formato ASCII (periodo in s, accelerazione spettrale in cm/s2), che rappresenta lo spettro di riferimento NTC18 per il sito in esame.*

*Di seguito sono rappresentate rispettivamente le forme d'onda selezionate e i relativi spettri di risposta in accelerazione. In tabella sono riportate invece le caratteristiche degli eventi selezionati, espresse in termini di: Magnitudo Mw/Ml, Distanza Epicentrale (km), Profondità ipocentrale (km), Fattore di scala (SF), Scarto Quadratico Medio delle distanze rispetto alla forma spettrale obiettivo nel campo di periodi di interesse 0.1-1.1s (DRMS, Distance Root Mean Square), Intensità di Arias (Ia, cm/s), Durata Spettrale (SD, s).*

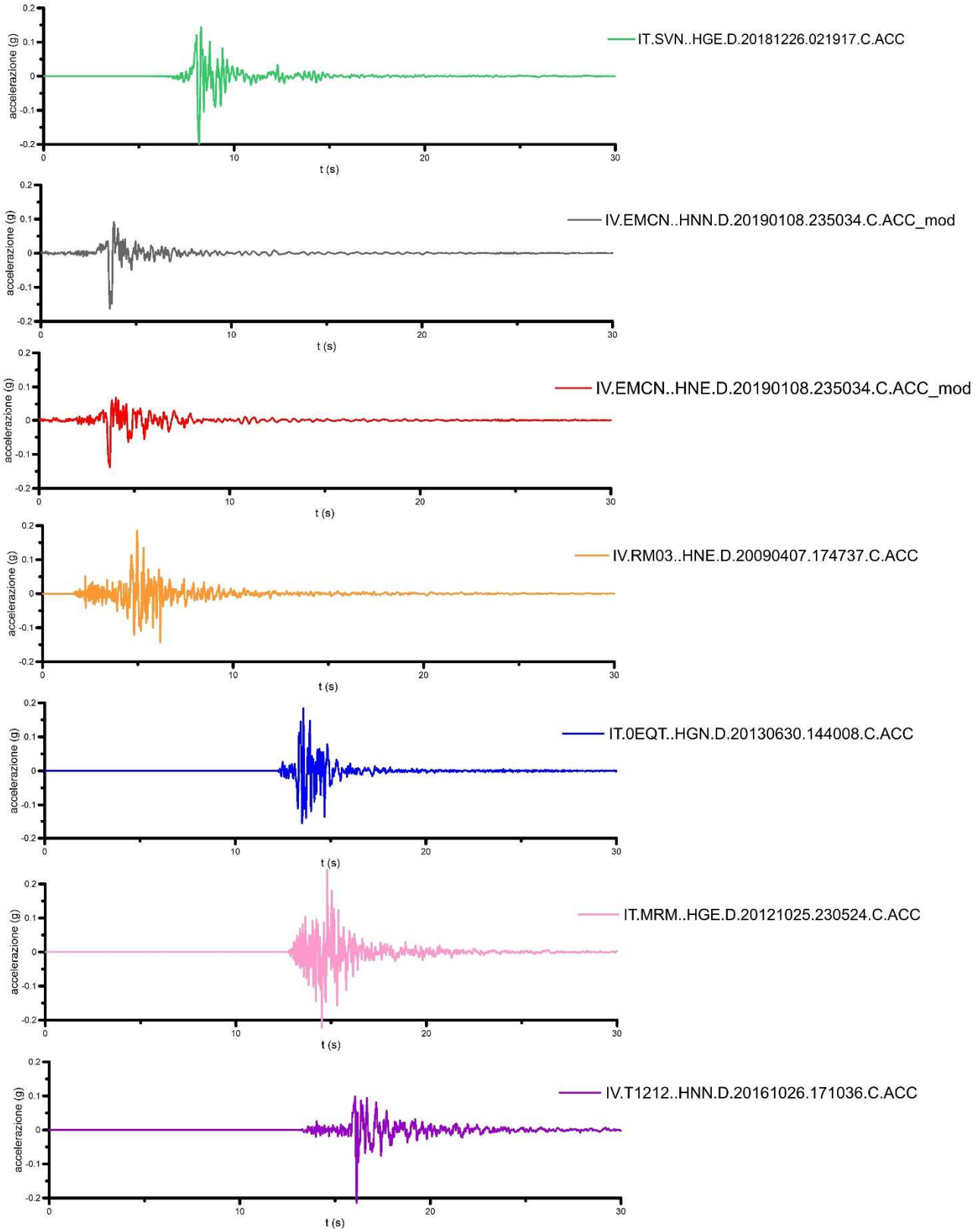



*Figura 138 - Forme d'onda selezionate e scalate per i sette accelerogrammi*

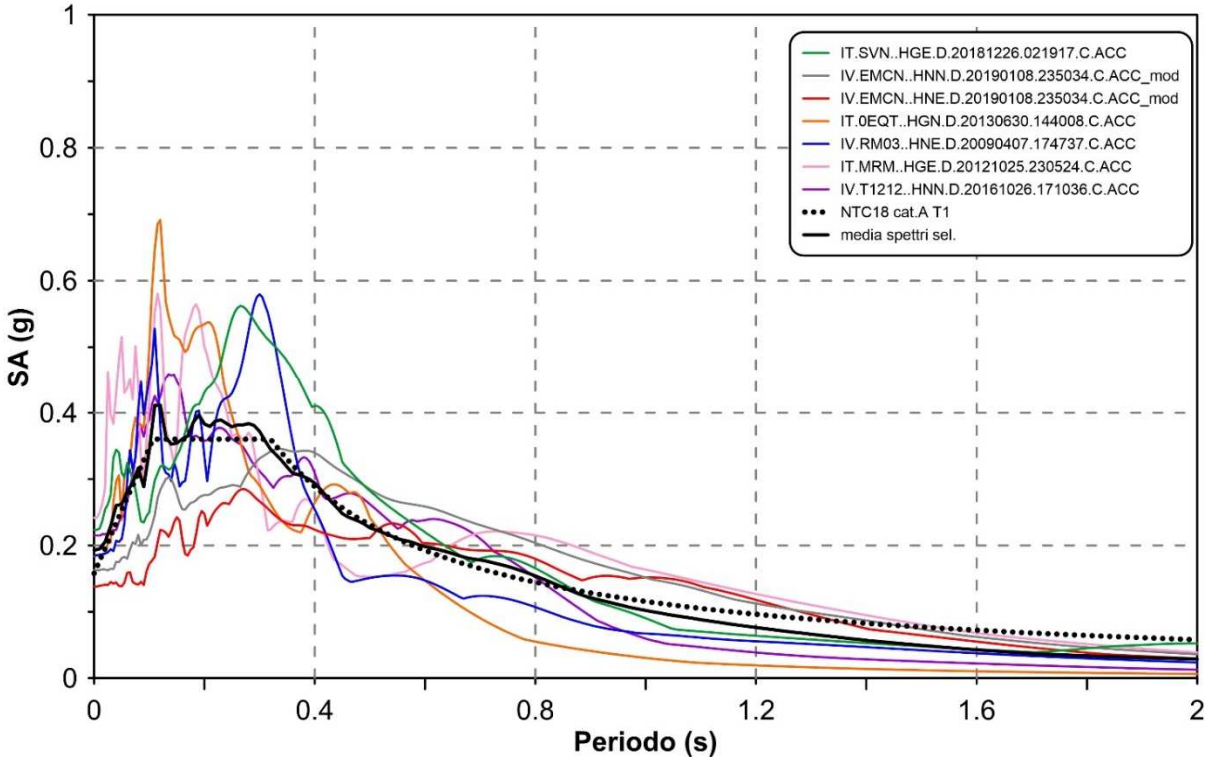



*Figura 139 - Spettri di risposta in accelerazione (g) degli accelerogrammi selezionati scalati. Sono riportati anche lo spettro di riferimento NTC18 (curva nera tratteggiata) e la media degli spettri di risposta della settupla di accelerogrammi selezionata (curva nera continua).*

*Tabella 46 - Tabella dei parametri tratta dal database ITACA.*

| Accelerogramma | ID ITACA | Nome evento | Comune | Data e ora | Mw | D Epicentrale [Km] | Profondità ipocentrale [Km] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Motion 1 - IT.0EQT..HGN.D.20130630.144008.C.ACC (scaled) | IT-2013-0009 | NORTHERN_ITALY | Casola in Lunigiana (Toscana) | 30/06/13 14:40:08 | 4.5 | 3 | 6.1 |
| Motion 2 - IT.MRM..HGE.D.20121025.230524.C.ACC scaled) | IT-2012-0061 | COSENZA | Mormanno (Calabria) | 25/10/2012 23:05:24 | 5.2 | 2.4 | 9.7 |
| Motion 3 - IT.SVN..HGE.D.20181226.021917.C.ACC (scaled) | EMSC-20181226_0000014 | SICILY_ITALY | Viagrande (Sicilia) | 26/12/2018 02:19:17 | 4.9 | 4.5 | / |
| Motion 4 - IV.EMCN..HNE.D.20190108.235034.C.ACC_mod4 (scaled) | - | SICILY_ITALY | Linguaglossa (Sicilia) | 08/01/2019 23:50:34 | 4.1 (ML) | 1.2 | 2.2 |
| Motion 5 - IV.EMCN..HNN.D.2019010 | - | SICILY_ITALY | Linguaglossa (Sicilia) | 08/01/2019 23:50:34 | 4.1 (ML) | 1.2 | 2.2 |

| Accelerogramma | ID ITACA | Nome evento | Comune | Data e ora | Mw | D Epicentrale [Km] | Profondità ipocentrale [Km] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8.235034.C.ACC_mod4 (scaled) | | | | | | | |
| Motion 6 - IV.RM03..HNE.D.20090407.174737.C.ACC (scaled) | IT-2009-0102 | CENTRAL_ITALY | Fossa (Abruzzo) | 07/04/2009 17:47:37 | 5.5 | 3.4 | 17.1 |
| Motion 7 - IV.T1212..HNN.D.20161026.171036.C.ACC (scaled) | EMSC-20161026_0000077 | CENTRAL_ITALY | Castel Sant'Angelo sul Nera (Marche) | 26/10/2016 17:10:36 | 5.4 | 15.2 | 8.1 |

*Tabella 47 - Tabella dei parametri: Magnitudo Mw/MI, Distanza Epicentrale (km), Profondità ipocentrale (km), Fattore di scala (SF), Scarto Quadratico Medio delle distanze rispetto alla forma spettrale obiettivo nel campo di periodi di interesse 0.1-1.1s (DRMS, Distance Root Mean Square), Intensità di Arias (Ia, cm/s), Durata Spettrale (SD, s)*

| Evento | Mw | Distanza Epicentrale [Km] | Profondità ipocentrale [Km] | Classe di sottosuolo (EC8) | Fattore di Scala (SF) | Drms | Ia [cm/s] | SD [s] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CENTRAL_ITALY [07/04/2009 17:47:37 - Station: RM03 - Component: E/O - MagnitudeW: 5.5 - Epicentral Distance: 3.4] | 5.5 | 3.4 | 17.1 | A* | 2 | 0.045093 | 14.4775 | 3.625 |
| CENTRAL_ITALY [26/10/2016 17:10:36 - Station: T1212 - Component: N/S - MagnitudeW: 5.4 - Epicentral Distance: 15.2] | 5.4 | 15.2 | 8.1 | A* | 1.1 | 0.041261 | 10.7506 | 3.755 |
| COSENZA [25/10/2012 23:05:24 - Station: MRM - Component: E/O - MagnitudeW: 5.2 - Epicentral Distance: 2.4] | 5.2 | 2.4 | 9.7 | A | 1.3 | 0.056107 | 18.06469 | 2.99 |
| IV.EMCN..HNE.D.20190108.235034.C.ACC_mod4.ASC | 4.1 (MI) | 1.2 | 2.2 | N/A | 1.28 | 0.039256 | 7.531587 | 3.49 |
| IV.EMCN..HNN.D.20190108.235034.C.ACC_mod4.ASC | 4.1 (MI) | 1.2 | 2.2 | N/A | 1.28 | 0.035833 | 8.257111 | 2.405 |
| NORTHERN_ITALY [30/06/2013 14:40:08 - Station: 0EQT - Component: N/S - MagnitudeW: 4.5 - Epicentral Distance: 3] | 4.5 | 3 | 6.1 | A* | 1.6 | 0.056093 | 14.28527 | 1.65 |
| SICILY_ITALY [26/12/2018 02:19:17 - Station: SVN - Component: E/O - MagnitudeW: 4.9 - Epicentral Distance: 4.5] | 4.9 | 4.5 | / | A* | 0.4 | 0.032829 | 13.88658 | 1.945 |

### 7.1.2 Simulazioni numeriche

**Modellazione monodimensionale**

L'analisi numerica monodimensionale (1D) per le MOPS individuate è stata effettuata al fine di determinare diversi parametri di risposta sismica locale, ed in particolar modo gli accelerogrammi rappresentativi delle pericolosità sismica locale ed i fattori di amplificazione (FA) relativi a tre intervalli di periodi (0.1-0.5s, 0.4-0.8s e 0.7-1.1s)

La modellazione 1D è stata effettuata con il codice di calcolo gratuito Strata (Kottke et al., 2013), che modella una colonna di terreno come un continuo stratificato a comportamento visco-elastico lineare. Le equazioni del moto sono risolte nel dominio della frequenza attraverso il calcolo e la successiva convoluzione delle funzioni di trasferimento di ogni strato, analogamente alla procedura seguita dal ben noto codice di calcolo SHAKE. La non linearità delle proprietà dinamiche, assunte indipendenti dalla frequenza, è portata in conto tramite l'approccio lineare equivalente.

L'analisi è stata effettuata impostando un file Strata di base secondo i parametri definiti durante gli incontri formativi e la riunione tenuta presso il Dipartimento di Ingegneria Geotecnica di Napoli (UNINA-DICEA).

Su questo file sono stati caricati:

- I 7 accelerogrammi già descritti precedenza;
- Le curve di decadimento e di smorzamento per singola unità CGT fornite da UNINA-DICEA e già riportate al paragrafo 5.1 del presente lavoro;

Successivamente sono stati Sono stati definiti gli output da ottenere per ogni simulazione effettuata (spettri di risposta al bedrock ed in superficie, rapporti della funzione di accelerazione e spettrali, serie temporali dell'accelerazione).

L'altezza massima degli strati continui modellati nell'analisi è stata fissata in proporzione alla velocità delle onde S, tramite la medesima relazione utilizzata per gli elementi finiti, per assicurare l'accuratezza della soluzione con riferimento una frequenza $f_{MAX}$ pari a 20 Hz;

È stato fissato un numero di iterazioni per analisi lineare equivalente pari a 100.

L'approccio di input è stato basato su serie temporali, la tolleranza dell'errore impostata all'1,0%, il numero massimo di iterazioni al di sopra della quale la convergenza si intende raggiunta pari a 20, l'effective strain ratio pari a 0,65, 20 Hz la massima frequenza considerata e 0,12 la funzione di lunghezza d'onda.

Considerando che uno degli aspetti problematici che affliggono la procedura di determinazione della RSL è l'incertezza o variabilità dei dati di input (Vs, proprietà di decadimento della rigidità e smorzamento, spessori…), l'output è particolarmente sensibile. Pertanto l'analisi di RSL è stata condotta in maniera probabilistica, considerando l'incertezza dei dati di input e propagando gli errori associati a tale incertezza con il metodo Monte Carlo, ottenendo così non un unico risultato per ogni segnale di input, bensì un insieme di risultati statisticamente plausibili, chiamati "realizzazioni".

Per le modellazioni sono stati inseriti nel codice di calcolo per ogni MOPS i dati relativi ai modelli di sottosuolo definiti in precedenza, inserendo lo spessore medio di riferimento di ogni singolo strato, i valori di velocità delle onde S, la profondità del bedrock, i valori del peso di volume e le curve di decadimento caratterizzanti il comportamento non lineare e dissipativo dei materiali.

Successivamente, sulla base di fogli excel predefiniti, sono stati calcolati i valori di FA e rappresentati gli spettri di risposta di accelerazione in superficie e di input e le storie temporali degli accelerogrammi.

L'Analisi di Risposta Sismica Locale 2D, necessaria per la valutazione di amplificazioni indotte da particolari configurazioni geometriche (ad esempio in prossimità di valli etc.) è stata effettuata a cura del Dipartimento UNINA-DICEA Centro di Microzonazione Sismica sulle sezioni A-A', C-C' e G-G', a cui si rimanda per le modalità di analisi ed in merito al codice di calcolo utilizzato.

**Modellazione bidimensionale (fornita dal centro MS)**

Il modello geotecnico di sottosuolo per le analisi numeriche bidimensionali (2D) di risposta sismica locale è stato definito sulla base dei rilievi di campagna e dei risultati delle indagini geofisiche di superficie (rapporti spettrali H/V, array passivi, MASW) ed in foro (Down Hole) specificatamene effettuate nell'area di Forio. Questi dati sono stati integrati con quelli ottenuti nell'ambito delle

"Misure di carattere non strutturale finalizzate alla riduzione del rischio sismico residuo dei territori interessati dal terremoto dell'Isola di Ischia del 21/08/2017" (art. 8 OPDC 476 del 29/08/2017) e dalle indagini pregresse disponibili.

Nelle Figura 140 e Figura 141 sono rappresentati gli stralci della carta geologico tecnica relativi alle due aree considerate, e una legenda sintetica dei litotipi presenti. Nelle stesse figure sono riportate in rosso le tracce delle sezioni sottoposte alle analisi bidimensionali, i cui corrispondenti profili stratigrafici sono invece mostrati in Figura 142.

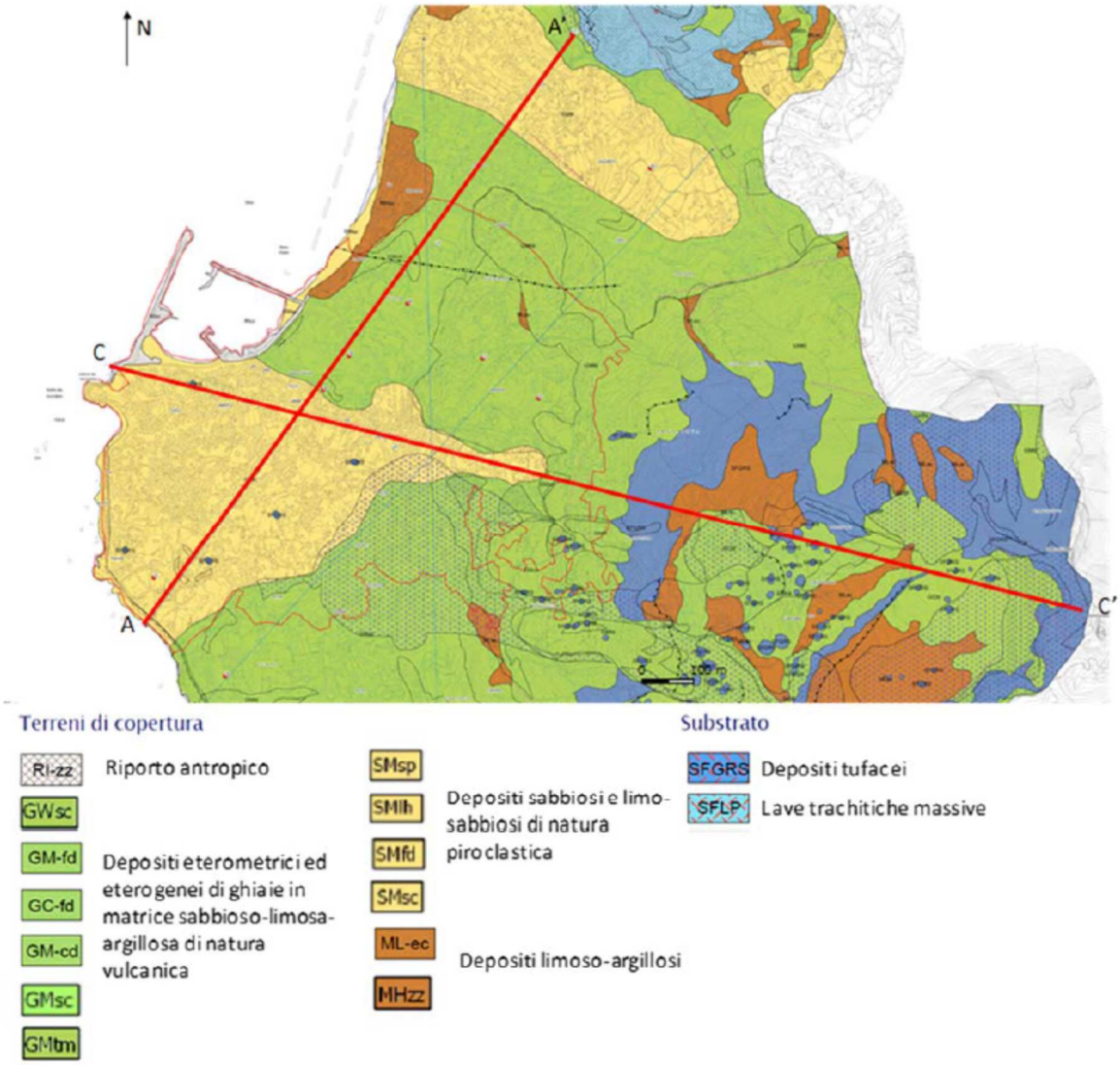



*Figura 140 - Carta geologico tecnica di Forio (sez. A-A' e C-C').*

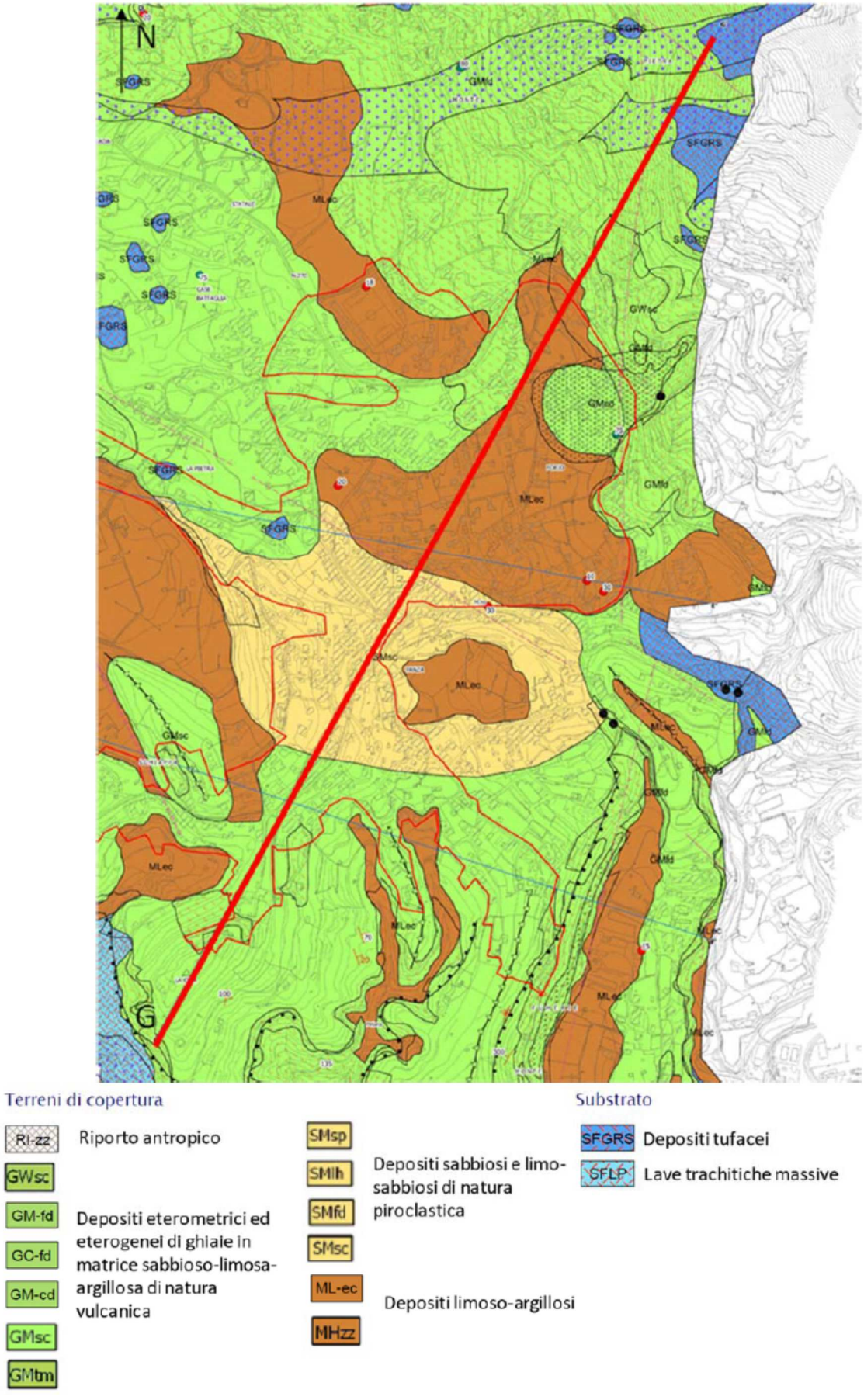



*Figura 141 – Carta geologico tecnica di Forio (sez. G-G').*

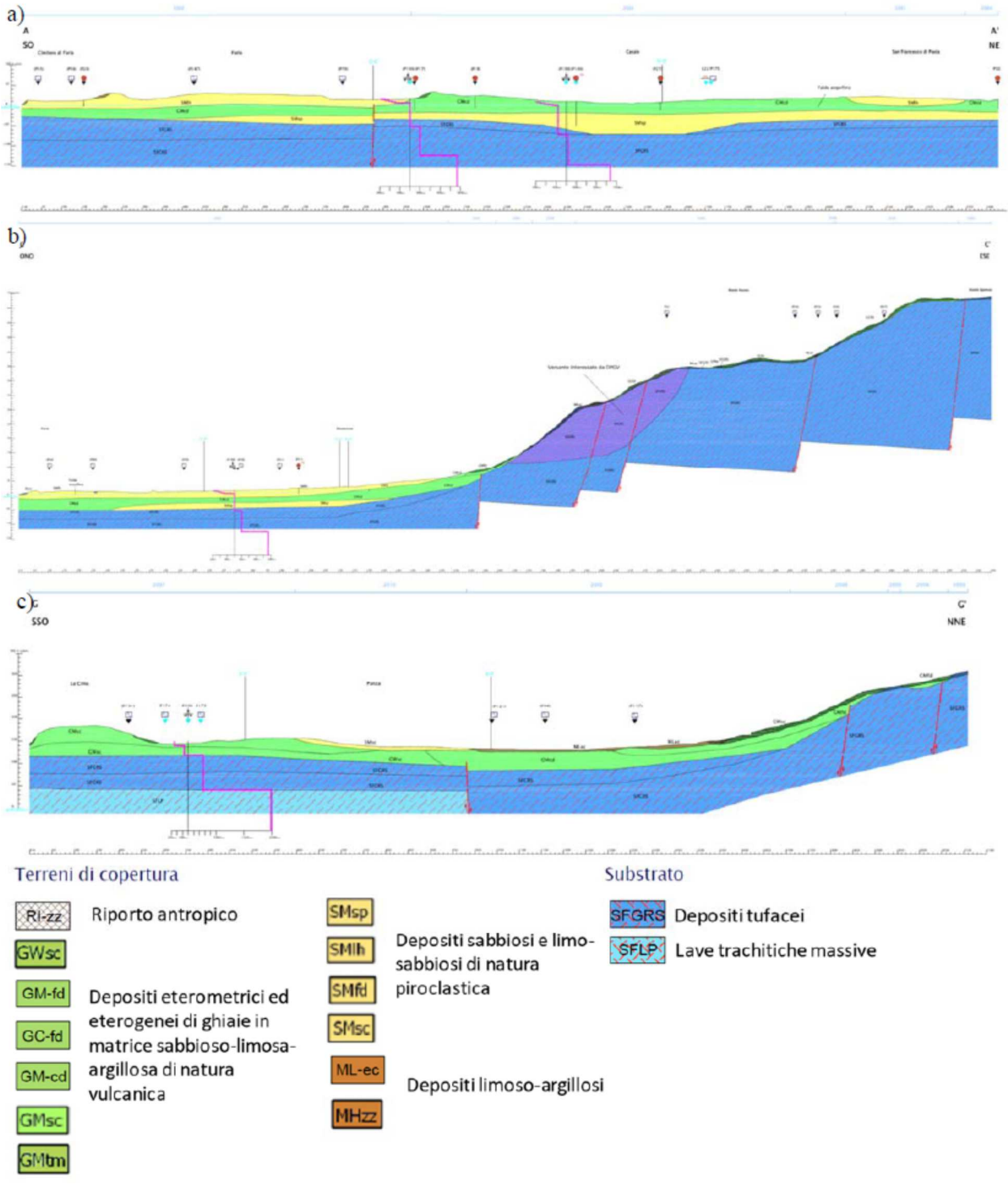



*Figura 142 - Profili stratigrafici: a) sez. AA', b) sez. CC', c) sez. GG'.*

La profondità e l'andamento del substrato sismico per le sezioni analizzate sono stati definiti sulla base degli studi geologici e delle indagini geofisiche effettuate. Essi, inoltre, sono stati calibrati verificando la corrispondenza tra le funzioni di amplificazione numeriche e quelle ricavate sperimentalmente sotto forma di rapporti HVSR misurati su noise.

Le proprietà fisico-meccaniche dei terreni e rocce adottate nelle analisi sono sinteticamente riportate nelle Tabella 48, Tabella 49 e Tabella 50 rispettivamente per la sezione AA', CC' e GG'.

*Tabella 48 - Proprietà fisiche e meccaniche dei terreni per la sezione AA' (i codici delle formazioni fanno riferimento alle sezioni precedenti).*

| Formazione | z (m) | $\gamma$ (kN/m²) | $V_s$ (m/s) | $V_p$ (m/s) | $\nu$ | $G_0$ (MPa) | $D_0$ (%) | Riferimento curve G($\gamma$)/G0 e D($\gamma$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $SM_{lh}$ | 0-40 | 16.62 | 274 | 544 | 0.33 | 127.19 | 1.01 | MS3_LAC_DH1_C4 |
| $GM_{cd}$ | 0-70 | 16.36 | 320 | 784 | 0.40 | 170.77 | 3.51 | MS3_FO_DH1_C2 |
| $SM_{sp}$ | 25-80 | 18.97 | 530 | 1298 | 0.40 | 543.19 | 2.01 | MS3_FO_DH1_C4 |
| SFRGS 1 | 30-90 | 17.89 | 456 | 886 | 0.32 | 379.20 | 0.50 | Tufo giallo napoletano (Vinale, 1988) |
| SFRGS 2 | 65-190 | 17.89 | 550 | 1069 | 0.32 | 551.65 | 0.50 | Tufo giallo napoletano (Vinale, 1988) |
| Bedrock Sismico | 140- | 17.89 | 950 | 1846 | 0.32 | 1645.84 | 0.50 | Visco elastico lineare |

*Tabella 49 - Proprietà fisiche e meccaniche dei terreni per la sezione CC' (i codici delle formazioni fanno riferimento alle sezioni precedenti).*

| Formazione | z (m) | $\gamma$ (kN/m²) | $V_s$ (m/s) | $V_p$ (m/s) | $\nu$ | $G_0$ (MPa) | $D_0$ (%) | Riferimento curve G($\gamma$)/G0 e D($\gamma$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $SM_{lh}$ | 0-30 | 16.62 | 274 | 544 | 0.33 | 127.19 | 1.01 | MS3_LAC_DH1_C4 |
| $GM_{cd}$ | 0-50 | 16.36 | 320 | 784 | 0.40 | 170.77 | 3.51 | MS3_FO_DH1_C2 |
| $GM_{fd}$ | 0-15 | 17.06 | 268 | 656 | 0.40 | 124.90 | 3.51 | MS3_FO_DH1_C2 |
| $GM_{fd}$ Frana | 0-5 | 17.06 | 180 | 441 | 0.40 | 56.34 | 3.51 | MS3_FO_DH1_C2 |
| $SM_{sp}$ | 40-60 | 18.97 | 530 | 1298 | 0.40 | 543.19 | 2.01 | MS3_FO_DH1_C4 |
| SFRGS 1 | 40-90 | 17.89 | 456 | 886 | 0.32 | 379.20 | 0.50 | Tufo giallo napoletano (Vinale, 1988) |
| SFRGS 2 | 0-150 | 17.89 | 550 | 1069 | 0.32 | 551.65 | 0.50 | Tufo giallo napoletano (Vinale, 1988) |
| Bedrock Sismico | 140 - | 17.89 | 950 | 1846 | 0.32 | 1645.84 | 0.50 | Visco elastico lineare |

*Tabella 50 - Proprietà fisiche e meccaniche dei terreni per la sezione GG' (i codici delle formazioni fanno riferimento alle sezioni precedenti).*

| Formazione | z (m) | $\gamma$ (kN/m²) | $V_s$ (m/s) | $V_p$ (m/s) | $\nu$ | $G_0$ (MPa) | $D_0$ (%) | Riferimento curve G($\gamma$)/G0 e D($\gamma$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $GM_{sc}$ | 0-40 | 14.60 | 250 | 508 | 0.34 | 93.02 | 2.27 | Kokusho et al. (1981) |
| $GM_{sc}$ Frana | 0-5 | 14.60 | 180 | 366 | 0.34 | 48.22 | 2.27 | Kokusho et al. (1981) |
| $GW_{sc}$ | 40-65 | 15.25 | 357 | 744 | 0.33 | 218.61 | 1.14 | Gravel average curve (Rollins et al, 1998) |
| $SM_{sc}$ | 0-10 | 14.50 | 250 | 496 | 0.33 | 9238 | 0.50 | Licata et al. (2015) |
| $ML_{ec}$ | 0-10 | 15.66 | 227 | 433 | 0.31 | 82.26 | 1.51 | MS3_LAC_DH1_C1 |
| $ML_{ec}$ Frana | 0-10 | 15.66 | 180 | 343 | 0.31 | 51.71 | 1.51 | MS3_LAC_DH1_C1 |
| $GM_{cd}$ | 10-55 | 16.36 | 312 | 764 | 0.40 | 162.34 | 3.51 | MS3_FO_DH1_C2 |
| $GM_{fd}$ | 0-20 | 17.06 | 268 | 565 | 0.40 | 124.90 | 3.51 | MS3_FO_DH1_C2 |
| $GM_{fd}$ Frana | 0-10 | 17.06 | 180 | 441 | 0.40 | 56.34 | 3.51 | MS3_FO_DH1_C2 |
| $GW_{sc}$ Frana | 0-10 | 15.25 | 180 | 357 | 0.33 | 50.37 | 1.14 | Gravel average curve |

| Formazione | z (m) | $\gamma$ (kN/m²) | $V_s$ (m/s) | $V_p$ (m/s) | $\nu$ | $G_0$ (MPa) | $D_0$ (%) | Riferimento curve G($\gamma$)/G0 e D($\gamma$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | (Rollins et al, 1998) |
| SFRGS 1 | 50-85 | 17.89 | 456 | 886 | 0.32 | 379.20 | 0.50 | Tufo giallo napoletano (Vinale, 1988) |
| SFRGS 2 | 0-150 | 17.89 | 550 | 1069 | 0.32 | 551.65 | 0.50 | Tufo giallo napoletano (Vinale, 1988) |
| Bedrock sismico | 100 - | 17.89 | 860 | 1672 | 0.32 | 1348.77 | 0.50 | Visco elastico lineare |

Poiché i metodi numerici di analisi utilizzati nel presente studio fanno riferimento al tradizionale approccio di legame costitutivo visco-elastico lineare equivalente, il comportamento di ciascun materiale è stato espresso attraverso il peso dell'unità di volume ($\gamma$), le velocità delle onde di taglio e di compressione ($V_S$, $V_P$), e le curve di variazione di rigidezza e smorzamento con la deformazione al taglio, G($\gamma$)/G0 e D($\gamma$).

Le velocità delle onde S sono state determinate per ogni formazione a partire dai risultati delle prove MASW, DH e degli array passivi. Ad ogni unità litologica sono stati, quindi, attribuiti valori realistici dei coefficienti di Poisson (v) e di conseguenza sono state stimate le velocità delle onde di compressione. Questi parametri sono stati poi utilizzati per le analisi di risposta sismica eseguite con i modelli mono e bidimensionali. I profili di VS delle diverse formazioni adottate nei modelli di calcolo sono riassunti e confrontati in Figura 143.

Con riferimento alle sezioni AA' e CC' il bedrock sismico è stato posto all'interno della formazione tufacea (SFGRS) caratterizzata dalla presenza di due strati più superficiali alterato (SFGRS 1 e 2) con velocità inferiori agli 800m/s. La sezione GG' è invece attraversata da una faglia in corrispondenza della progressiva 1200m; a S-SO di quest'ultima il bedrock è stato posto al tetto della formazione SFGRS, mentre in direzione N-NE il bedrock è stato individuato, così come nelle altre due sezioni, al letto degli strati di alterazione della stessa formazione tufacea (SFGRS 1 e 2).

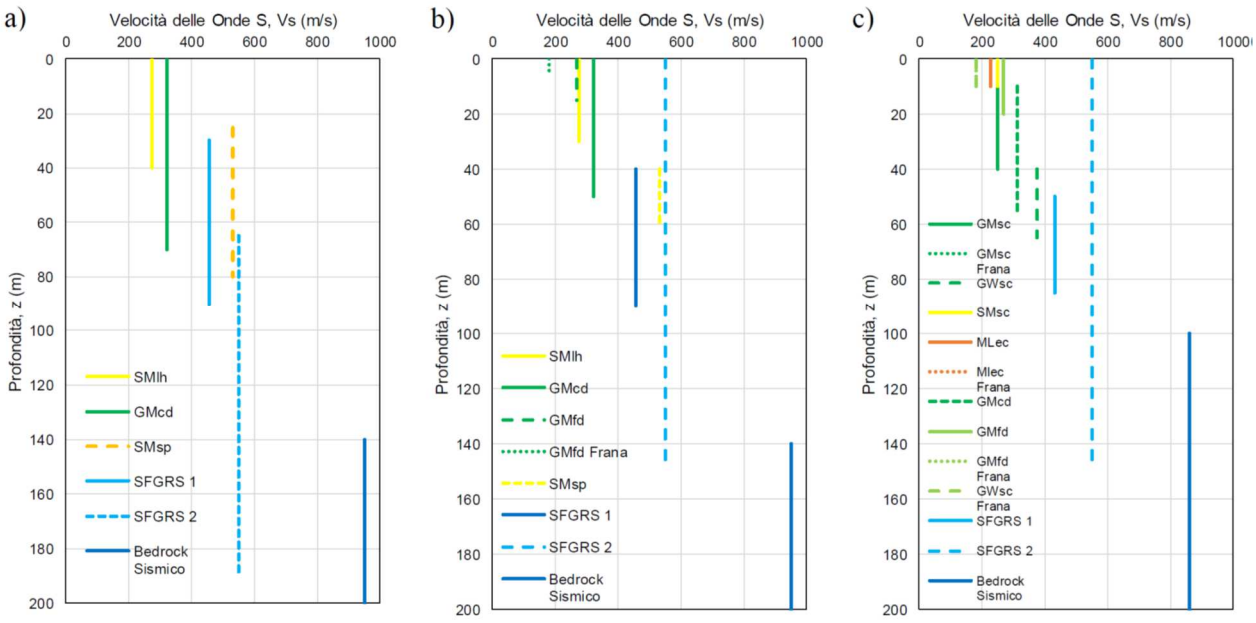



*Figura 143 - Modello di velocità: a) sezione AA', b) sezione CC', c) sezione GG'.*

Nelle Figura 144, Figura 145 e Figura 146 sono riportate le curve di variazione di rigidezza al taglio normalizzata e fattore di smorzamento con la deformazione tangenziale adottate per le analisi, rispettivamente, delle sezioni AA', CC' e GG'. Il comportamento non lineare e dissipativo dei terreni è stato caratterizzato interpretando con le relazioni analitiche derivate dal modello di Darendeli (2001) sia i risultati di prove di taglio torsionale ciclico, effettuate sui campioni appositamente prelevati nell'ambito delle attività di microzonazione ed indicati con il prefisso MS3 nelle Tabella 48, Tabella 49 e Tabella 50, sia curve di letteratura relative a materiali con caratteristiche litologiche simili a quelli interessati dal presente studio.

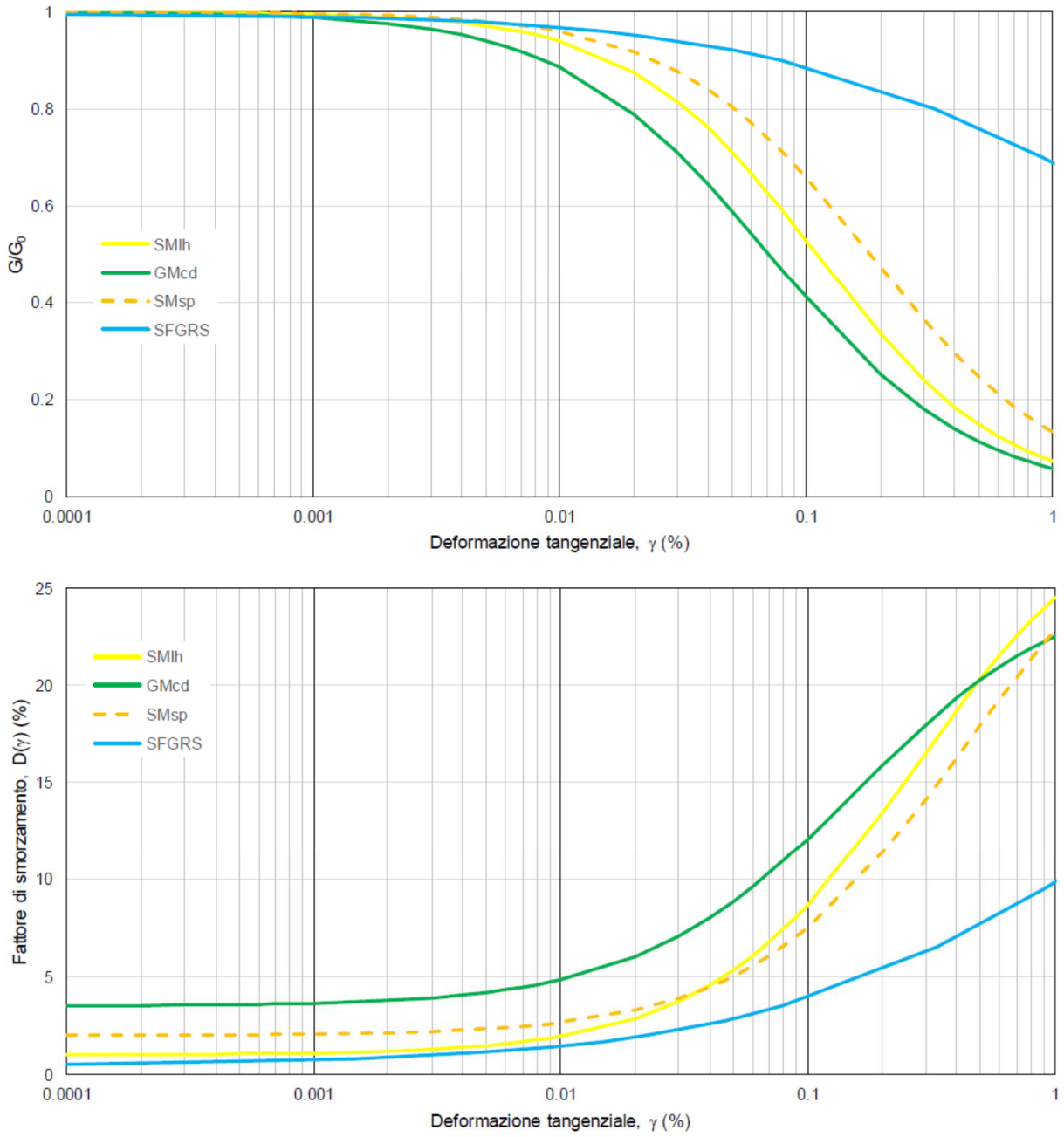



*Figura 144 - Curve del decadimento del modulo di taglio e dell'andamento del fattore di smorzamento con il livello di deformazione per la sezione AA'.*

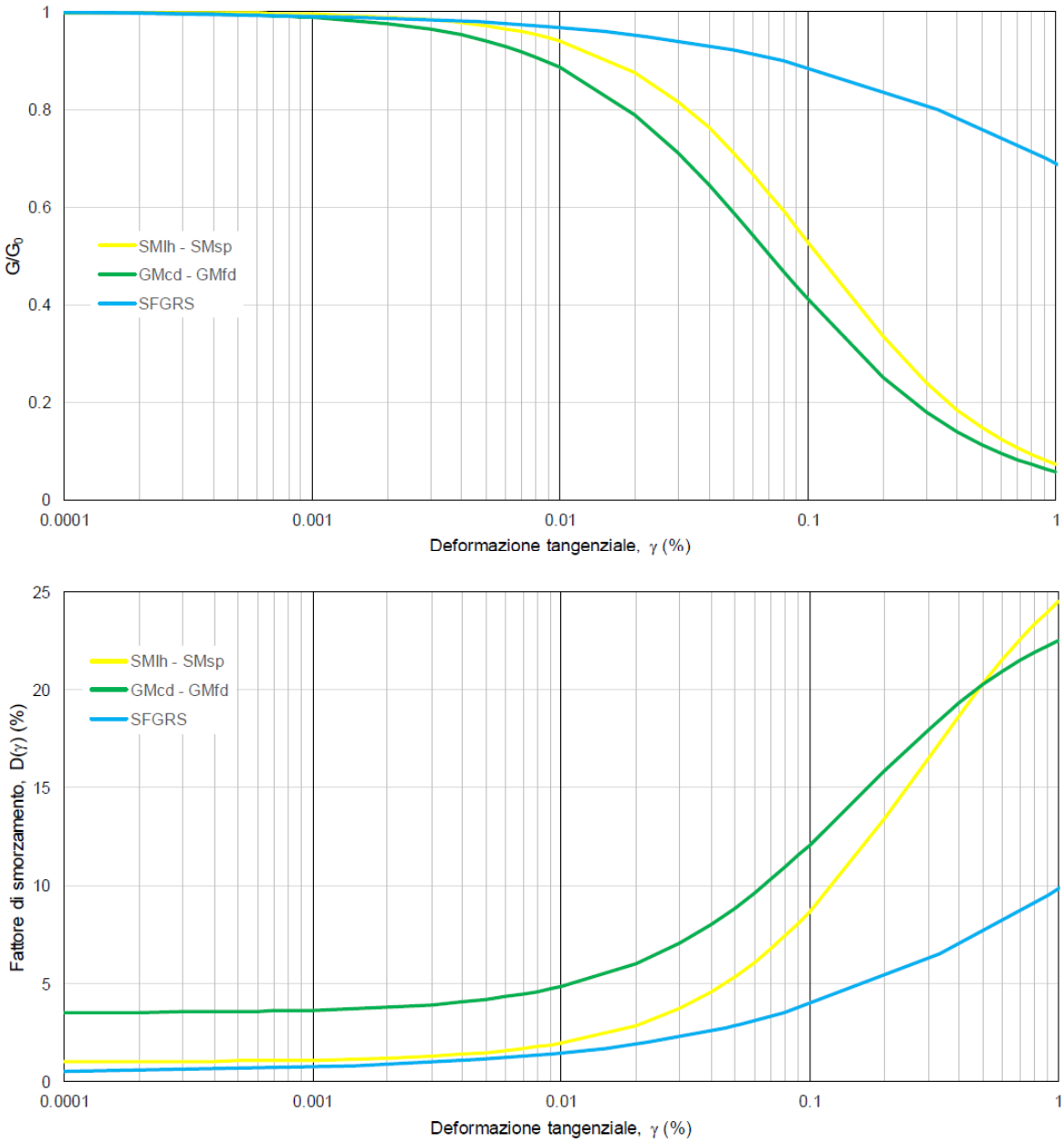



*Figura 145 - Curve del decadimento del modulo di taglio e dell'andamento del fattore di smorzamento con il livello di deformazione per la sezione CC'.*

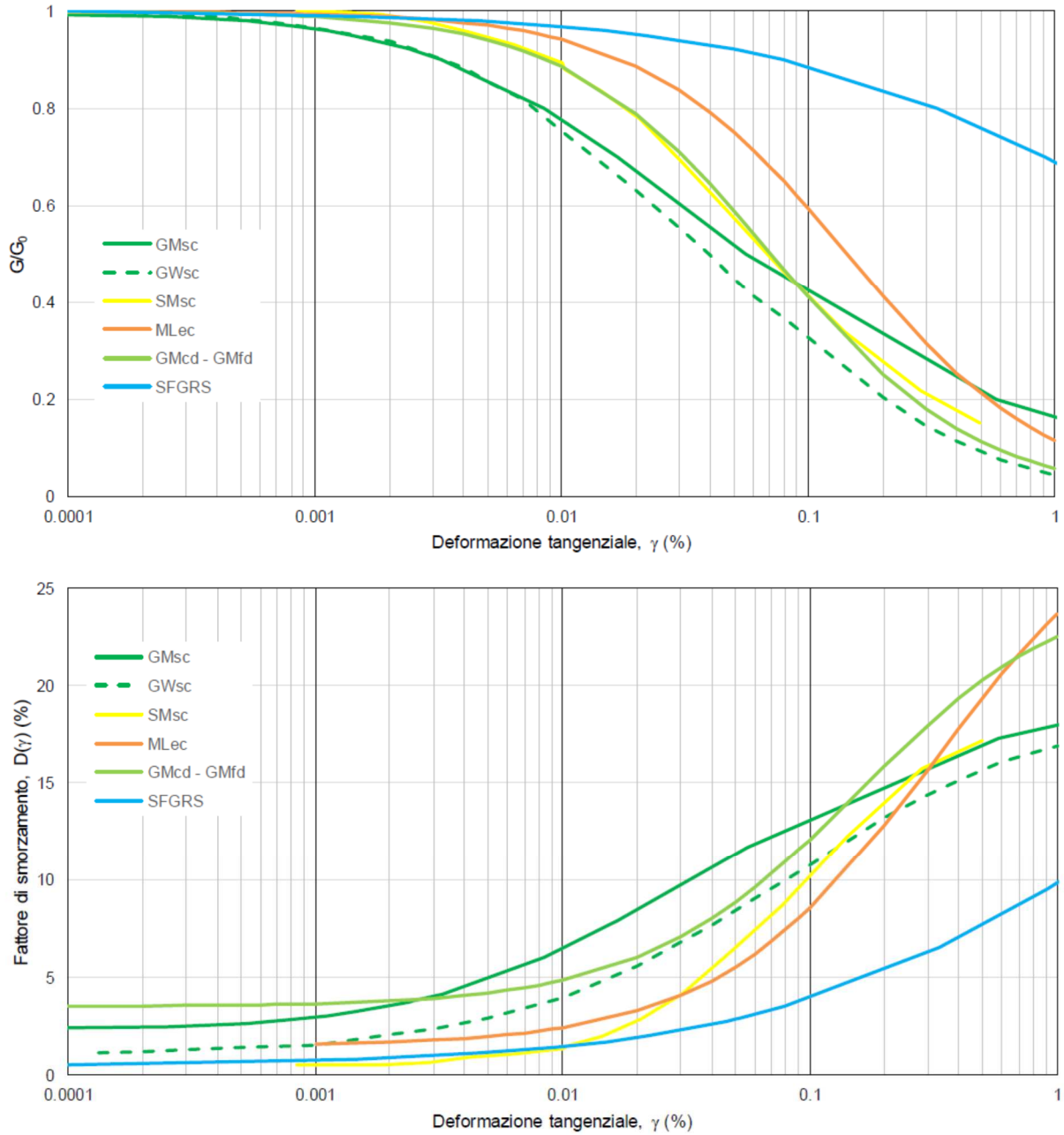



*Figura 146 - Curve del decadimento del modulo di taglio e dell'andamento del fattore di smorzamento con il livello di deformazione per la sezione GG'.*

### 7.1.3 Risultati

**Modellazione monodimensionale**

Sono state eseguite n. 7 analisi monodimensionali per ognuna delle 8 MOPS da sottoporre a modellazione (in tutto 56 analisi monodimensionali i cui risultati sono stati caricati sul server FTP) con il codice STRATA (Kottke et al., 2013), che modella una colonna di terreno come un continuo stratificato a comportamento visco-elastico lineare.

Le equazioni del moto sono risolte nel dominio della frequenza attraverso il calcolo e la successiva convoluzione delle funzioni di trasferimento di ogni strato, analogamente alla procedura seguita dal ben noto codice di calcolo SHAKE. La non linearità delle proprietà dinamiche, assunte indipendenti dalla frequenza, è portata in conto tramite l'approccio lineare equivalente.

Le analisi monodimensionali sono state effettuate secondo i criteri definiti dal Centro di Microzonazione Sismica sulla base del file Strata opportunamente predisposto. Dapprima è stato impostato un file di base per ogni MOPS definendo le opportune colonne stratigrafiche. In seguito per ognuna delle MOPS/colonne stratigrafiche sono stati prodotti sette file assegnando i sette diversi accelerogrammi di input individuati per il comune di Forio.
Il file strata utilizzato è stato impostato per ottenere i seguenti output principali, sia in termini grafici che numerici:

1. Spettro di risposta dell'accelerazione in superficie;
2. Spettro di risposta dell'accelerazione al bedrock.

I dati numerici ottenuti sono stati inseriti successivamente nei file .xls predisposti dal Centro di Microzonazione Sismica secondo quanto indicato. Il file calcolo_FA.xls, previo inserimento dei valori mediani degli spettri in superficie ed al bedrock ottenuti da strata, ha consentito di ottenere i fattori di amplificazione dell'accelerazione massima FA nel campo di periodi di interesse (0.1-0.5s, 0.4-0.8s, 0.7-1.1s) ed i relativi grafici che vengono di seguito riportati per ogni MOPS.
Di seguito vengono definiti i risultati per ogni modellazione realizzata:

**MOPS 2002**

*Tabella 51 - Dati di input MOPS 2002.*

| | Profondità (m) | Spessore (m) | Tipo suolo | Vs media (m/s) | Vs min (m/s) | Vs max (m/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| MOPS 2002 | 0 | 22.5 | 5 – SM_lh | 284 | 128 | 390 |
| | 22.5 | 30 | 22 – GM_cd | 320 | 170 | 500 |
| | 52.5 | 15 | 16 – SM_sp – SP_sp | 530 | 453 | 570 |
| | 67.5 | 35 | 30 – SFGRS-1 (TC allentati, Forio) | 456 | 450 | 500 |
| | 102.5 | 50 | 31 – SFGRS-2 (TVME allentato) | 550 | 500 | 600 |
| | 152.5 | Half – Space | Bedrock | 950 | 900 | 1000 |

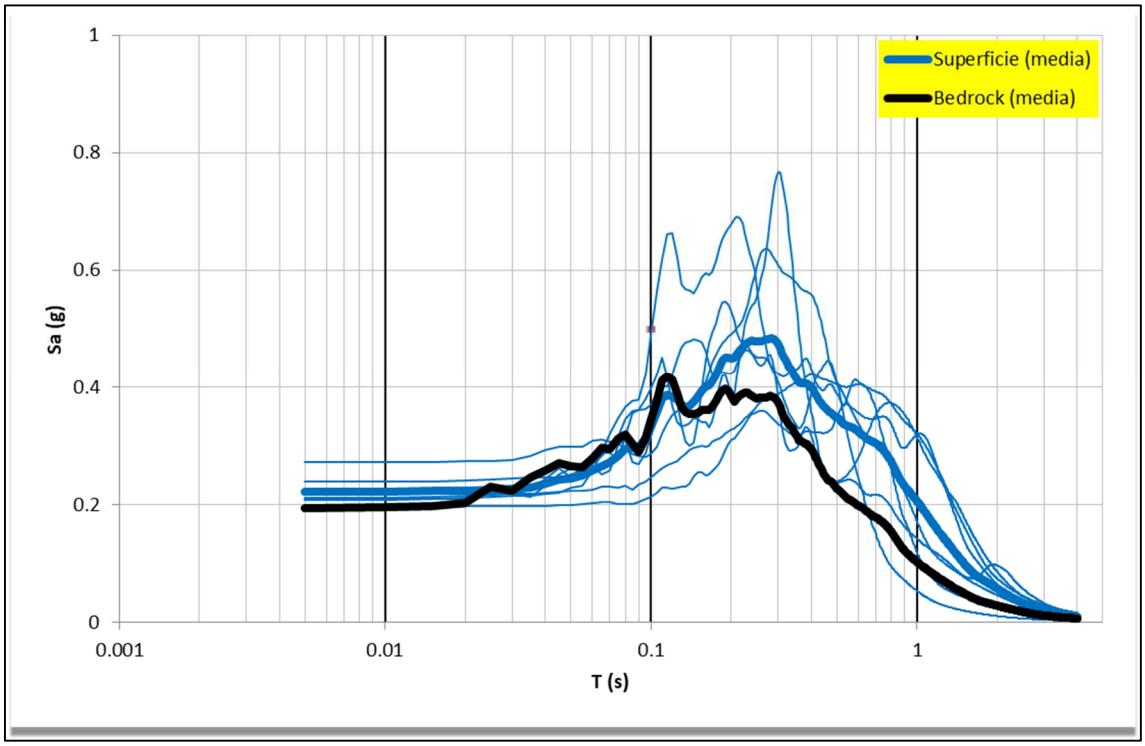



*Figura 147- Grafici spettri di risposta di accelerazione - MOPS 2002.*

*Tabella 52 - Valori di FA per singolo accelerogramma – MOPS 2002.*

| | FA 0.1-0.5 | FA 0.4-0.8 | FA 0.7-1.1 |
|---|---|---|---|
| Acc. 1 | 1.314889254 | 1.618636399 | 1.719435814 |
| Acc. 2 | 1.113742529 | 1.582118575 | 1.80733276 |
| Acc. 3 | 1.219033929 | 1.525489198 | 1.77631434 |
| Acc. 4 | 1.33433307 | 1.677653186 | 1.965238816 |
| Acc. 5 | 1.211880903 | 1.535795685 | 1.936363381 |
| Acc. 6 | 1.272296311 | 1.61774725 | 1.935597416 |
| Acc. 7 | 1.273229022 | 1.614525119 | 1.788310004 |
| Media | 1.246526 | 1.595243 | 1.844775 |

## MOPS 2003

*Tabella 53 - Dati di input MOPS 2003.*

| | Profondità (m) | Spessore (m) | Tipo suolo | Vs media (m/s) | Vs min (m/s) | Vs max (m/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| MOPS 2003 | 0 | 10 | 16 – SM_sp – SP_sp | 193 | 175 | 220 |
| | 10 | 10 | 5 – SM_lh | 275 | 240 | 400 |
| | 20 | 27.5 | 22 – GM_cd | 480 | 423 | 538 |
| | 47.5 | 15 | 16 – SM_sp – SP_sp | 530 | 423 | 653 |
| | 62.5 | 35 | 30 – SFGRS-1 (TC allentati, Forio) | 456 | 450 | 500 |
| | 97.5 | 50 | 31 – SFGRS-2 (TVME allentato) | 550 | 500 | 600 |
| | 147.5 | Half-Space | Bedrock | 950 | 900 | 1000 |

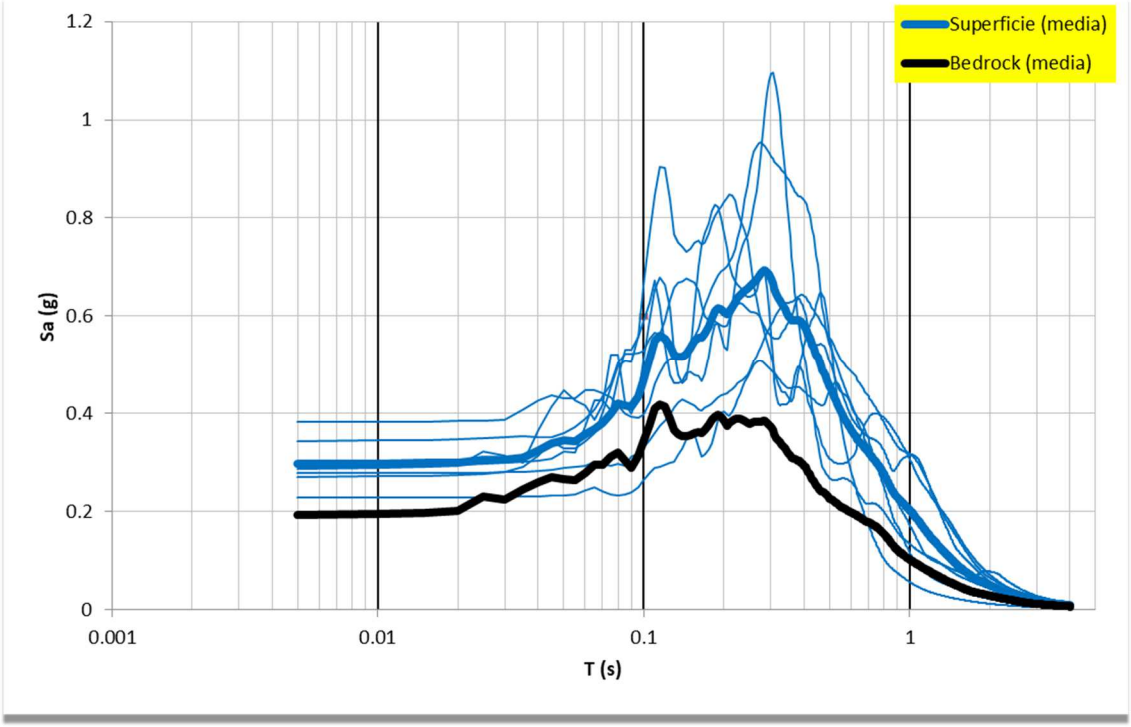



*Figura 148- Grafici spettri di risposta di accelerazione - MOPS 2003.*

*Tabella 54 - Valori di FA per singolo accelerogramma – MOPS 2003.*

| | FA 0.1-0.5 | FA 0.4-0.8 | FA 0.7-1.1 |
|---|---|---|---|
| Acc. 1 | 1.725909708 | 2.074708509 | 1.870490552 |
| Acc. 2 | 1.653760266 | 1.869707544 | 1.837089431 |
| Acc. 3 | 1.785423775 | 1.92333475 | 1.79918321 |
| Acc. 4 | 1.80345834 | 1.909504725 | 1.925317907 |
| Acc. 5 | 1.748277228 | 1.905916336 | 1.96104854 |
| Acc. 6 | 1.79762998 | 1.854615351 | 1.900534024 |
| Acc. 7 | 1.744054703 | 1.816782818 | 1.731012382 |
| Media | 1.750543 | 1.906318 | 1.859228 |

**MOPS 2004**

*Tabella 55 - Dati di input MOPS 2004.*

| | Profondità (m) | Spessore (m) | Tipo suolo | Vs media (m/s) | Vs min (m/s) | Vs max (m/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| MOPS 2004 | 0 | 35 | 22 – GM_cd | 320 | 170 | 500 |
| | 35 | 25 | 16 – SM_sp – SP_sp | 530 | 453 | 570 |
| | 60 | 35 | 30 – SFGRS-1 (TC allentati, Forio) | 456 | 456 | 653 |
| | 95 | 50 | 31 – SFGRS-2 (TVME allentato) | 550 | 550 | 653 |
| | 145 | Half-Space | Bedrock | 950 | 900 | 1000 |

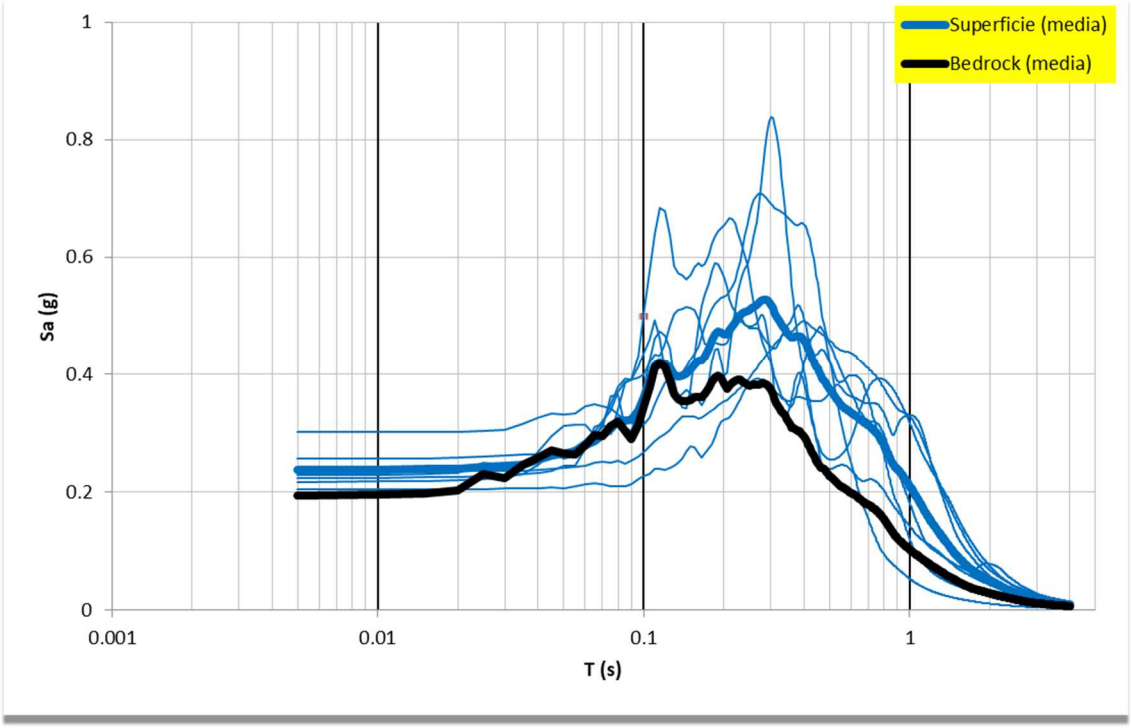



*Figura 149- Grafici spettri di risposta di accelerazione - MOPS 2004.*

*Tabella 56 - Valori di FA per singolo accelerogramma – MOPS 2004.*

| | FA 0.1-0.5 | FA 0.4-0.8 | FA 0.7-1.1 |
|---|---|---|---|
| Acc. 1 | 1.343998258 | 1.687357898 | 1.718183928 |
| Acc. 2 | 1.249826736 | 1.698249672 | 1.858349451 |
| Acc. 3 | 1.374334821 | 1.677883131 | 1.875919877 |
| Acc. 4 | 1.447361241 | 1.733381282 | 2.000750691 |
| Acc. 5 | 1.365280378 | 1.668217338 | 1.968635345 |
| Acc. 6 | 1.386660977 | 1.687001432 | 1.968548225 |
| Acc. 7 | 1.385435079 | 1.658813065 | 1.808727049 |
| Media | 1.363549 | 1.687125 | 1.883208 |

**MOPS 2005**

*Tabella 57 - Dati di input MOPS 2005.*

| | Profondità (m) | Spessore (m) | Tipo suolo | Vs media (m/s) | Vs min (m/s) | Vs max (m/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| MOPS 2005 | 0 | 7.5 | 4 – ML_ec | 189 | 180 | 250 |
| | 7.5 | 37.5 | 22 – GM_cd | 400 | 240 | 520 |
| | 45 | 25 | 30 – SFGRS-1 (TC allentati, Forio) | 456 | 456 | 653 |
| | 70 | 70 | 31 – SFGRS-2 (TVME allentato) | 550 | 550 | 653 |
| | 140 | Half-Space | Bedrock | 950 | 900 | 1000 |

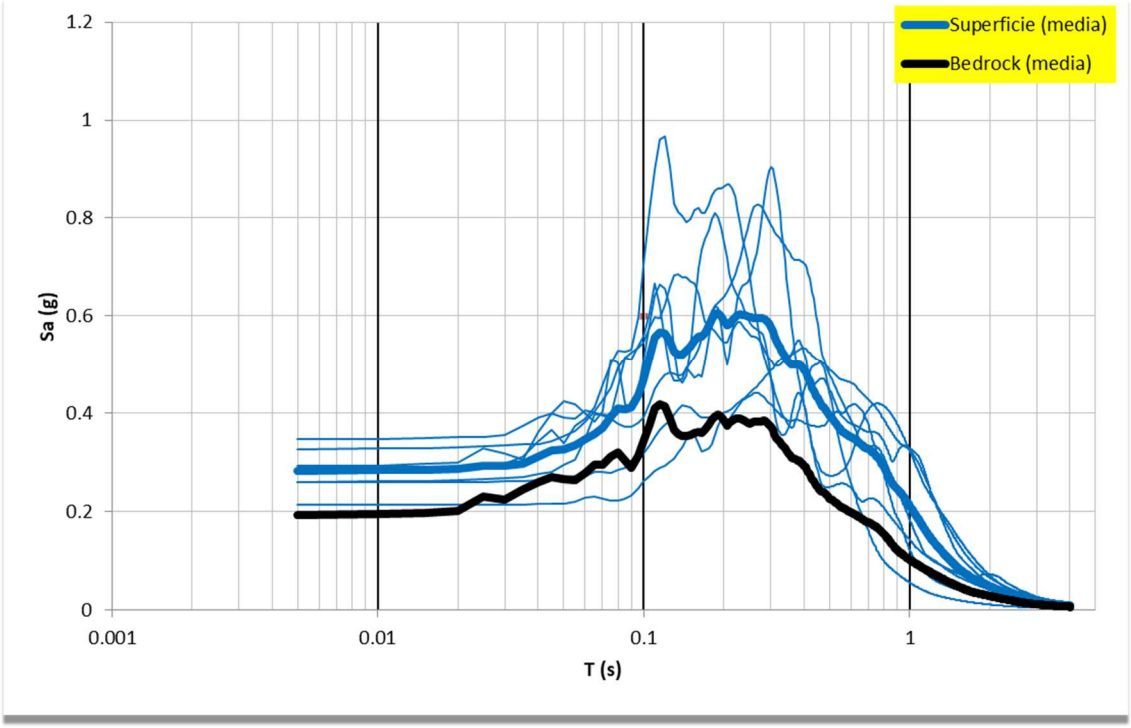



*Figura 150- Grafici spettri di risposta di accelerazione - MOPS 2005.*

*Tabella 58 - Valori di FA per singolo accelerogramma – MOPS 2005.*

| | FA 0.1-0.5 | FA 0.4-0.8 | FA 0.7-1.1 |
|---|---|---|---|
| Acc. 1 | 1.624090276 | 1.762059666 | 1.800744512 |
| Acc. 2 | 1.51068505 | 1.824055611 | 1.941011125 |
| Acc. 3 | 1.55784303 | 1.759501382 | 1.934085638 |
| Acc. 4 | 1.625142475 | 1.811853261 | 2.027041203 |
| Acc. 5 | 1.526793109 | 1.76598046 | 1.990442721 |
| Acc. 6 | 1.572795387 | 1.739494106 | 2.003173797 |
| Acc. 7 | 1.600631417 | 1.745494472 | 1.885557025 |
| Media | 1.573436 | 1.77238 | 1.938925 |

**MOPS 2007**

*Tabella 59 - Dati di input MOPS 2007.*

| | Profondità (m) | Spessore (m) | Tipo suolo | Vs media (m/s) | Vs min (m/s) | Vs max (m/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| MOPS 2007 | 0 | 8 | 20 – GM_sc | 236 | 210 | 260 |
| | 8 | 27 | 21 – GW_sc | 380 | 260 | 430 |
| | 35 | 20 | 30 – SFGRS-1 (TC allentati, Forio) | 770 | 767 | 900 |
| | 55 | 20 | 31 – SFGRS-2 (TVME allentato) | 770 | 767 | 900 |
| | 75 | Half-Space | Bedrock | 1900 | 1900 | 1900 |

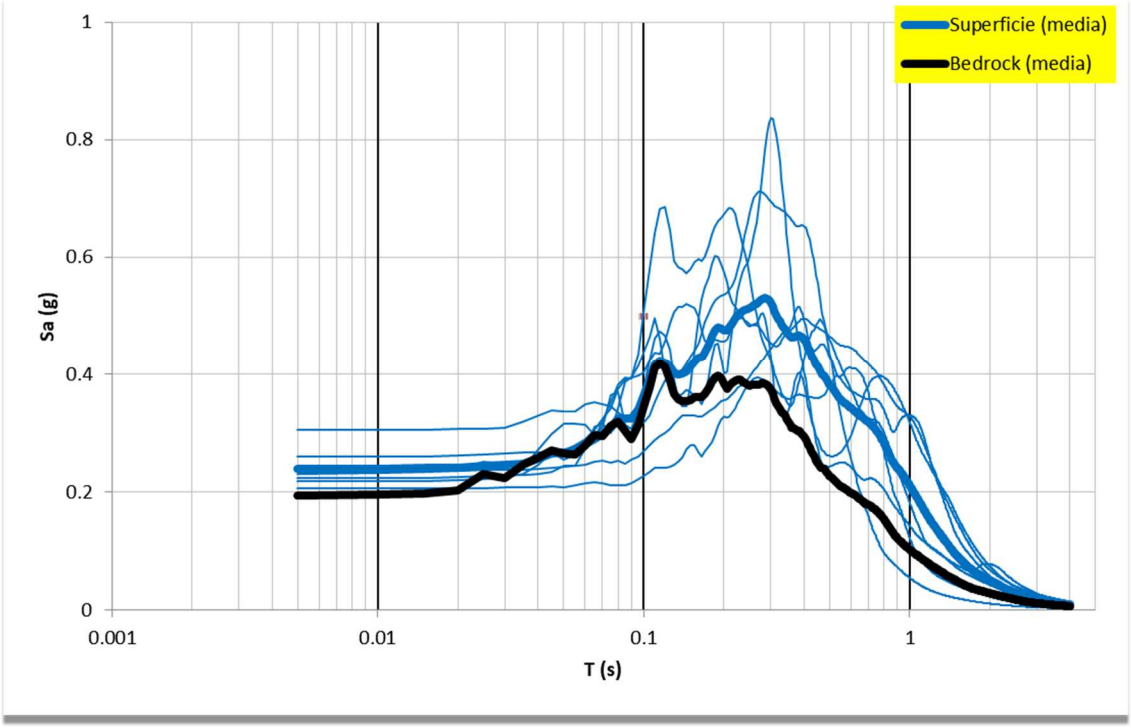



*Figura 151- Grafici spettri di risposta di accelerazione - MOPS 2007.*

*Tabella 60 - Valori di FA per singolo accelerogramma – MOPS 2007.*

| | FA 0.1-0.5 | FA 0.4-0.8 | FA 0.7-1.1 |
|---|---|---|---|
| Acc. 1 | 2.057861685 | 2.736967877 | 2.733503265 |
| Acc. 2 | 1.919335133 | 2.598653326 | 2.235663679 |
| Acc. 3 | 2.014292975 | 2.457460955 | 2.584143011 |
| Acc. 4 | 2.209247806 | 2.591050059 | 2.259441779 |
| Acc. 5 | 1.988310385 | 2.391745719 | 2.40742278 |
| Acc. 6 | 1.997202376 | 2.352302623 | 2.346634258 |
| Acc. 7 | 2.024045943 | 2.712331648 | 2.753191918 |
| Media | 2.02839 | 2.544763 | 2.466265 |

**MOPS 2008**

*Tabella 61 - Dati di input MOPS 2008.*

| | Profondità (m) | Spessore (m) | Tipo suolo | Vs media (m/s) | Vs min (m/s) | Vs max (m/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| MOPS 2008 | 0 | 8 | 4 – ML_ec | 189 | 180 | 250 |
| | 8 | 25 | 21 – GW_sc | 380 | 320 | 430 |
| | 33 | Half-Space | Bedrock | 1100 | 800 | 1900 |

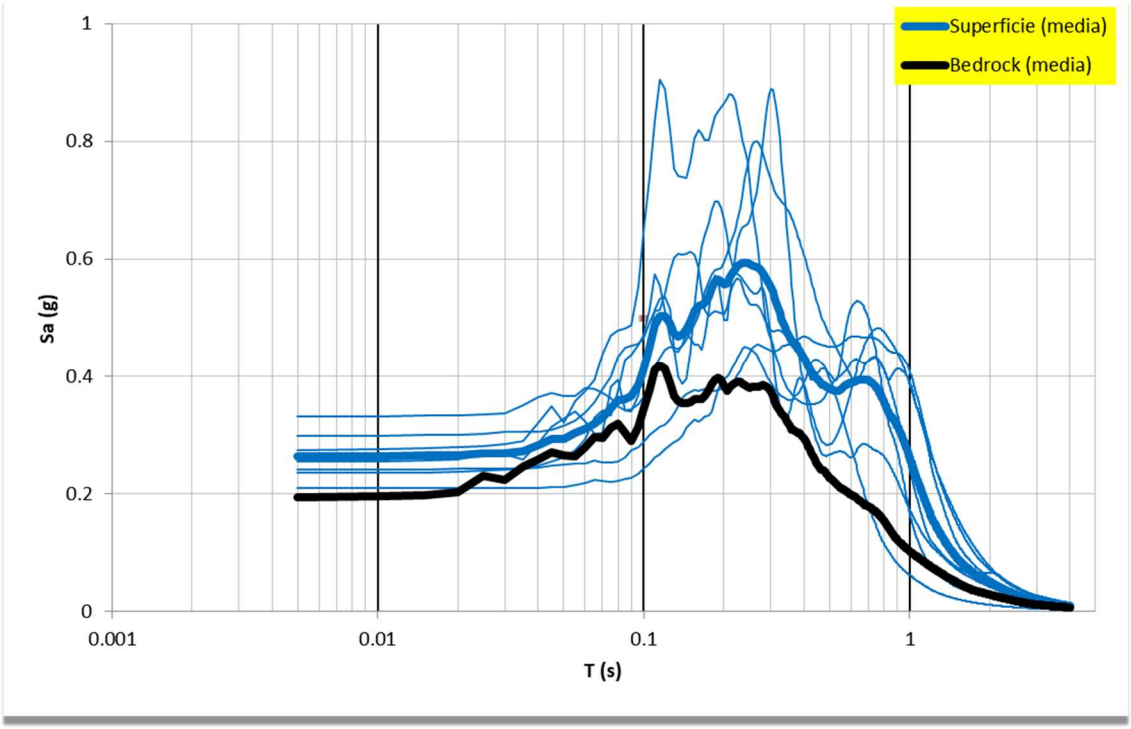



*Figura 152- Grafici spettri di risposta di accelerazione - MOPS 2008.*

*Tabella 62 - Valori di FA per singolo accelerogramma – MOPS 2008.*

| | FA 0.1-0.5 | FA 0.4-0.8 | FA 0.7-1.1 |
|---|---|---|---|
| Acc. 1 | 1.559470024 | 1.720515924 | 2.038953509 |
| Acc. 2 | 1.378323681 | 2.0351008 | 2.265782582 |
| Acc. 3 | 1.447772472 | 1.86665746 | 2.570182041 |
| Acc. 4 | 1.564726186 | 1.954847825 | 2.439552204 |
| Acc. 5 | 1.391171608 | 1.775929569 | 2.406490591 |
| Acc. 6 | 1.519793539 | 1.932710627 | 2.491653493 |
| Acc. 7 | 1.442172641 | 1.948062187 | 2.560943378 |
| Media | 1.470207 | 1.887754 | 2.389517 |

**MOPS 2010**

*Tabella 63 - Dati di input MOPS 2010.*

| | Profondità (m) | Spessore (m) | Tipo suolo | Vs media (m/s) | Vs min (m/s) | Vs max (m/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| MOPS 2010 | 0 | 10 | 6 – SM_sc | 220 | 180 | 260 |
| | 10 | 5 | 20 – GM_sc | 236 | 210 | 260 |
| | 15 | 25 | 21 – GW_sc | 380 | 260 | 430 |
| | 40 | 25 | 30 – SFGRS-1 (TC allentati, Forio) | 770 | 767 | 900 |
| | 65 | 35 | 31 – SFGRS-2 (TVME allentato) | 770 | 767 | 900 |
| | 100 | Half-Space | Bedrock | 1900 | 1900 | 1900 |

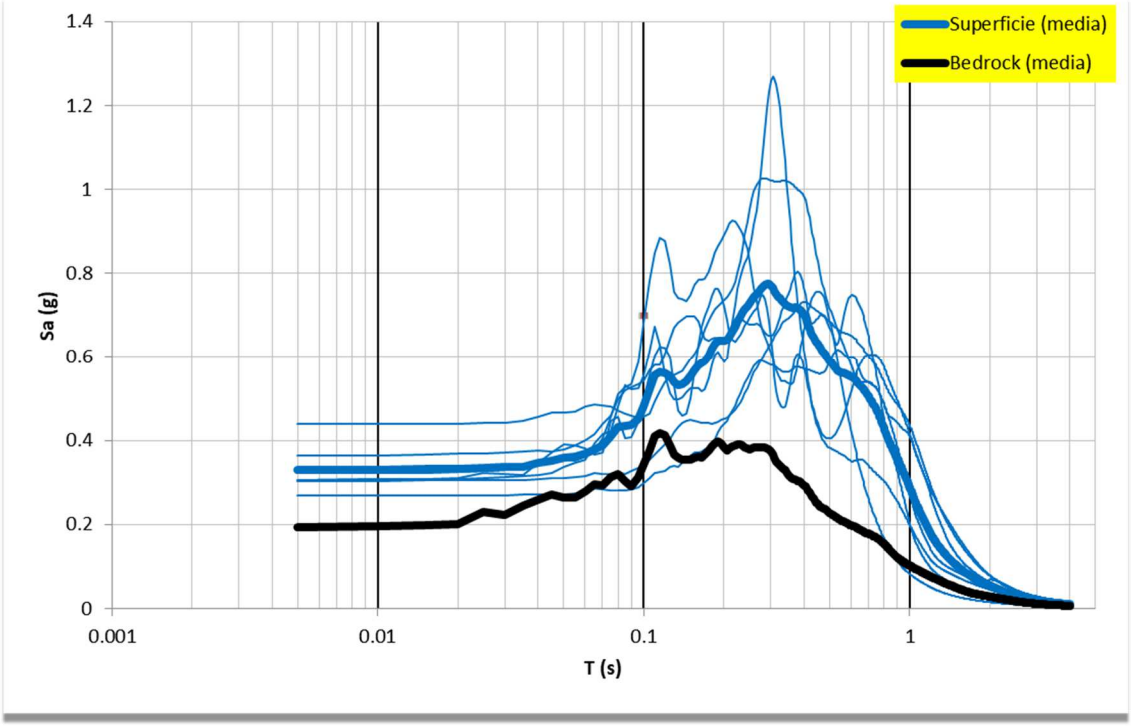



*Figura 153- Grafici spettri di risposta di accelerazione - MOPS 2010.*

*Tabella 64 - Valori di FA per singolo accelerogramma – MOPS 2010.*

| | FA 0.1-0.5 | FA 0.4-0.8 | FA 0.7-1.1 |
|---|---|---|---|
| Acc. 1 | 1.955289966 | 2.792608543 | 2.8782017 |
| Acc. 2 | 1.77951756 | 2.734687535 | 2.60400013 |
| Acc. 3 | 2.014885861 | 2.65127927 | 3.006159709 |
| Acc. 4 | 2.188640875 | 2.735653088 | 2.716081142 |
| Acc. 5 | 1.942878639 | 2.475855689 | 2.735476607 |
| Acc. 6 | 2.063093618 | 2.584302349 | 2.876436666 |
| Acc. 7 | 2.043831909 | 2.856602707 | 3.169907659 |
| Media | 1.994835 | 2.687423 | 2.849754 |

*Tabella 65 - Tabella riepilogativa dei valori di FA ottenuti nei periodi di interesse per ogni singola MOPS per l'analisi monodimensionale.*

| | FA 0.1-0.5 | FA 0.4-0.8 | FA 0.7-1.1 |
|---|---|---|---|
| Zona 2002 | 1.24 | 1.59 | 1.81 |
| Zona 2003 | 1.75 | 1.91 | 1.86 |
| Zona 2004 | 1.36 | 1.69 | 1.88 |
| Zona 2005 | 1.57 | 1.77 | 1.94 |
| Zona 2007 | 2.03 | 2.54 | 2.47 |
| Zona 2008 | 1.47 | 1.89 | 2.39 |
| Zona 2010 | 1.99 | 2.69 | 2.85 |

**Modellazione bidimensionale (fornita dal centro MS)**

Nelle analisi numeriche bidimensionali (2D) il substrato è modellato come semispazio visco elastico lineare, mentre il sottosuolo viene suddiviso in un numero finito di formazioni continue omogenee; per ognuna delle suddette la non linearità è portata in conto mediante analisi iterative lineari equivalenti.

Le analisi bidimensionali sono state eseguite con il codice di calcolo agli elementi finiti QUAD4M (Hudson et al., 2003).

I segnali di input forniti dal Centro di Microzonazione sono costituiti da un set di 7 accelerogrammi selezionati e scalati in modo tale che lo spettro medio risulti compatibile con quello di riferimento proposto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC18) allo stato limite SLV per la zona in esame. Per ogni accelerogramma e per ogni campo di periodi, si è ottenuto il profilo di variazione del fattore di amplificazione lungo le sezioni analizzate. Sono stati quindi calcolati i valori massimi e minimi (linee tratteggiate colorate) e la media logaritmica (linea continua colorata) di FA fra i 7 fattori di amplificazione dei singoli accelerogrammi. Per quest'ultimo valore, si è poi calcolato la media aritmetica lungo ogni Microzona Omogenea in Prospettiva Sismica (MOPS), valore che è stato assunto come rappresentativo dell'amplificazione 2D relativa alla MOPS considerata.

Per attribuire infine ad ogni MOPS gli spettri di risposta elastici relativi ad ogni segnale di input nonché il corrispondente spettro medio si è individuata, all'interno della porzione di sezione 2D competente alla medesima MOPS, la verticale caratterizzata dal valore di FA 0.1-0.5s più prossimo a quello medio della stessa porzione.

Nelle Figura 154 e Figura 155 si riportano gli stralci delle carte delle MOPS del comune di Forio attraversate dalle sezioni analizzate, mentre nelle Figura 156, Figura 157 e Figura 158 si riportano i risultati delle analisi 2D in termini di profilo del fattore di amplificazione per i 3 intervalli di periodo.

I risultati della sezione AA' mostrano come le massime amplificazioni si hanno per i periodi medi e alti e sono localizzate in corrispondenza dei rilievi, mentre per periodi più bassi si ha una minore amplificazione. Si noti come la valle sepolta posta fra le progressive 1500m e 2200m non dà luogo a considerevoli effetti bidimensionali. Ciò è dovuto al fatto che il contrasto d'impedenza fra le formazioni tufacee alterate (SFGRS 1 e 2), che rappresentano il bedrock geologico, e la formazione sedimentaria (SMsp) è pressoché unitario per SFGRS 2 e minore dell'unità per SFGRS 1. Pertanto la risposta locale è influenzata prevalentemente dall'amplificazione stratigrafica.

I risultati della sezione CC' mostrano un profilo del fattore di amplificazione, per tutti e 3 i campi di periodo, pressoché costante con le massime amplificazioni che ricadono nel campo di alti e medi periodi. Il contrasto di impedenza significativo e gli spessori esigui della formazione superficiale più deformabile posta alle pendici del monte Epomeo determinano una risposta amplificata ai bassi periodi in corrispondenza della MOPS 2004.

La stessa sembra essenzialmente condizionata dalla geometria del rilievo del monte Epomeo in corrispondenza dei medi e alti periodi. I risultati della sezione GG' mostrano anch'essi una maggiore amplificazione per i medi e alti periodi in corrispondenza dei rilievi. La risposta in superficie non sembra condizionata dalla presenza della faglia in corrispondenza della progressiva 1200m probabilmente perché il contrasto d'impedenza fra il bedrock sismico e la formazione tufacea alterata (SFGRS 1 e 2) non è molto elevato. Significativi effetti bidimensionali invece caratterizzano la risposta in superficie tra le progressive 1800m e 1900m, dove la presenza di una scarpata provoca una brusca riduzione del fattore di amplificazione, seguita da una repentina amplificazione in corrispondenza delle progressive successive alla scarpata.

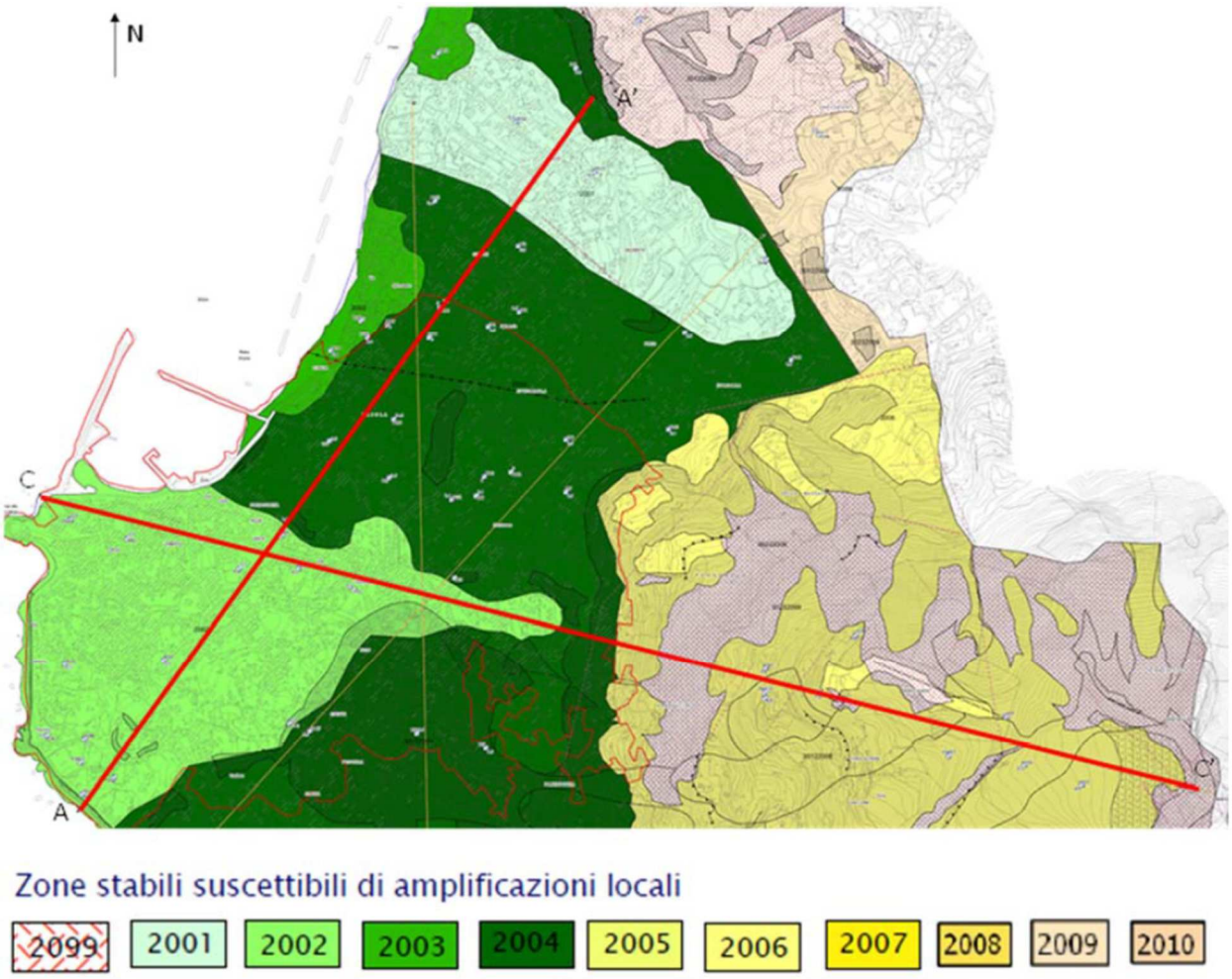



*Figura 154 - Carta delle MOPS (sez. A).*

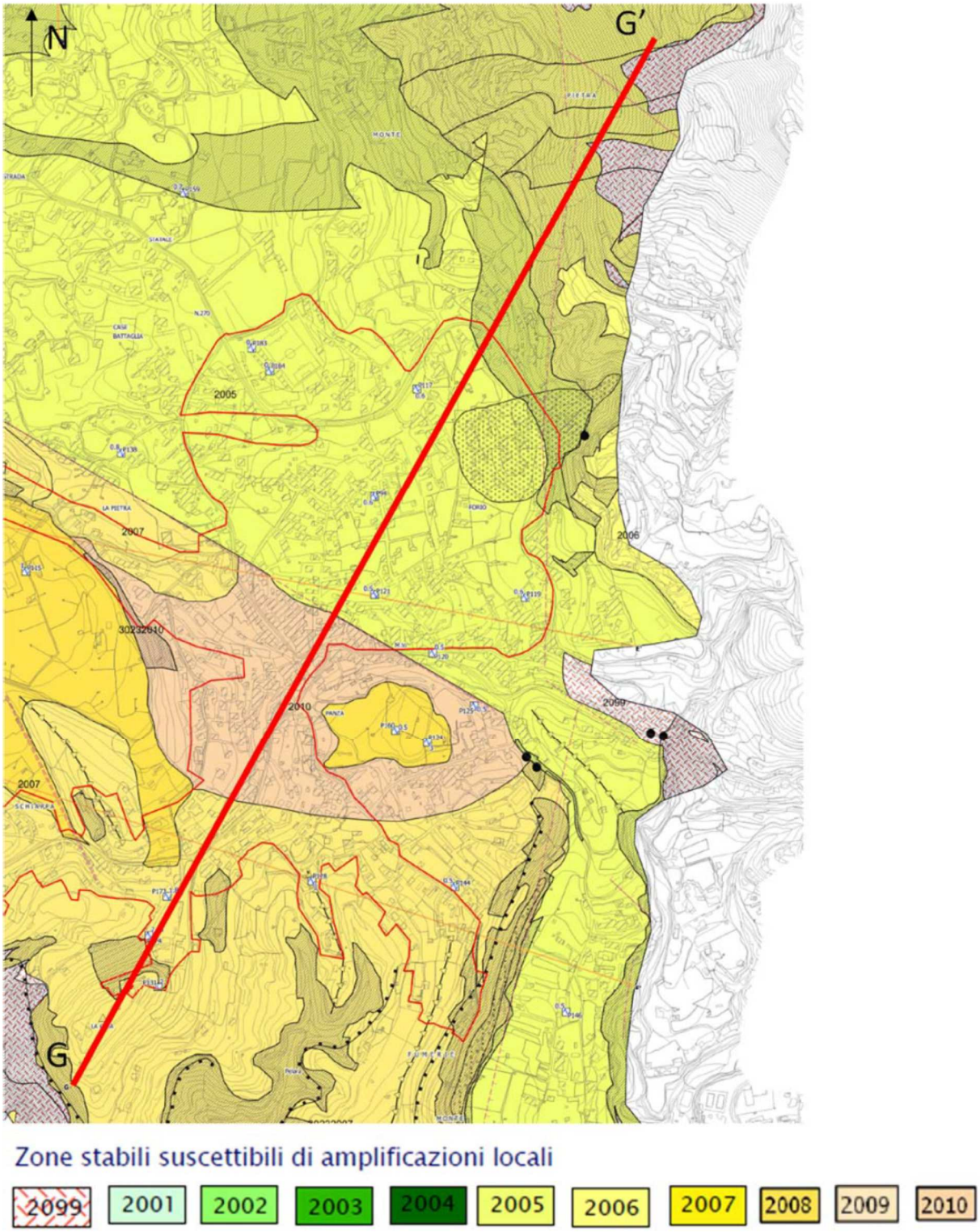



*Figura 155 - Carta delle MOPS (sez. B).*

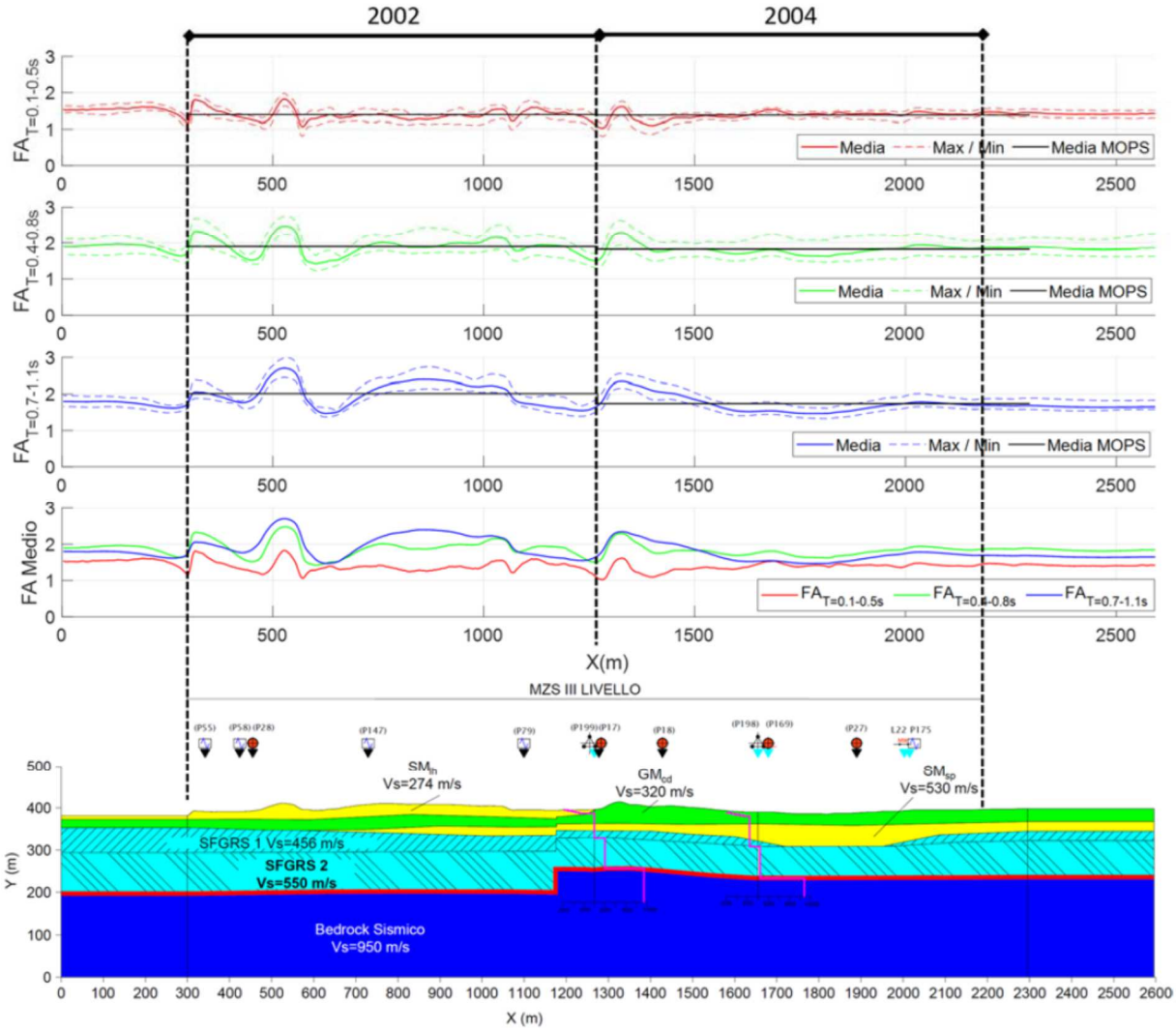



*Figura 156 - Profilo dei fattori di amplificazione per la sezione AA'.*

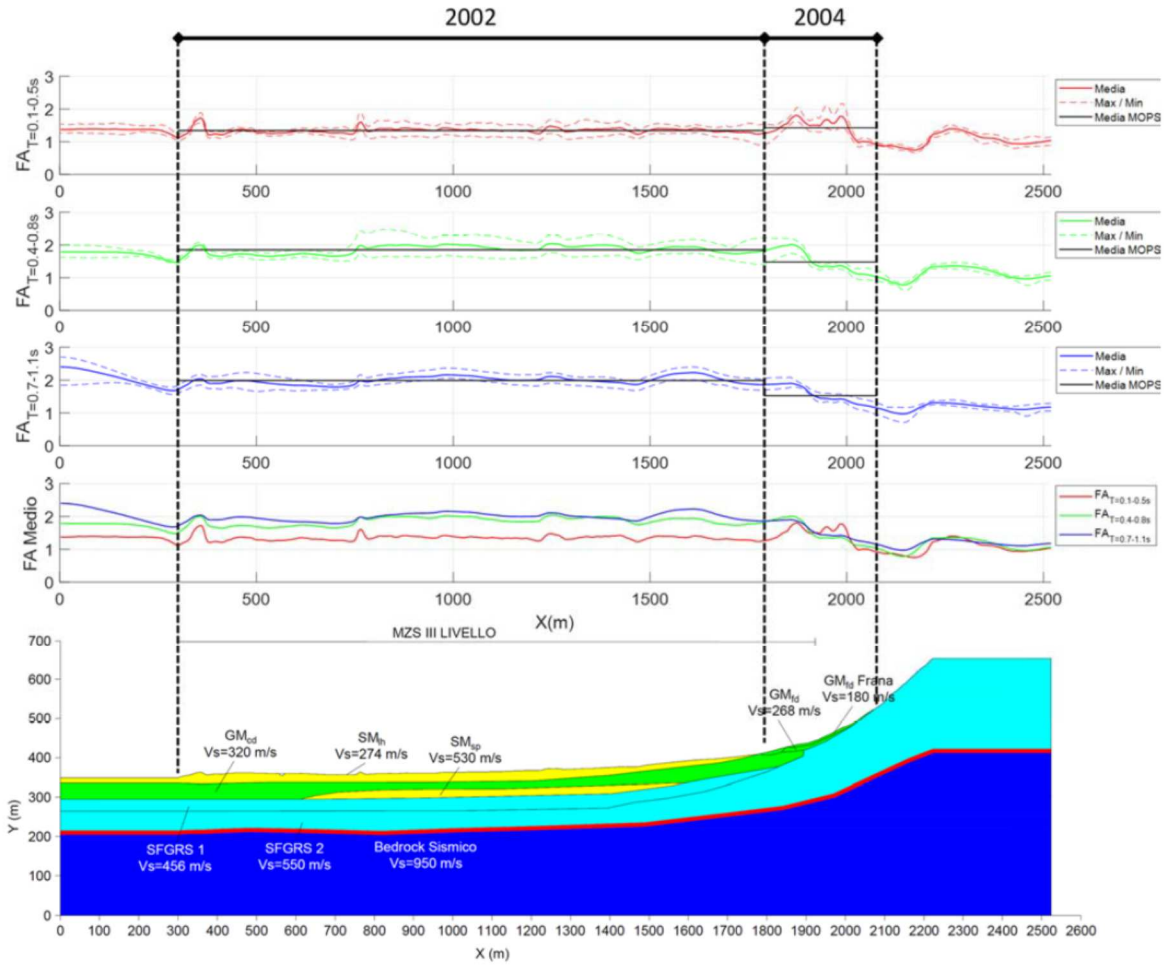



*Figura 157 - Profilo dei fattori di amplificazione per la sezione CC'.*

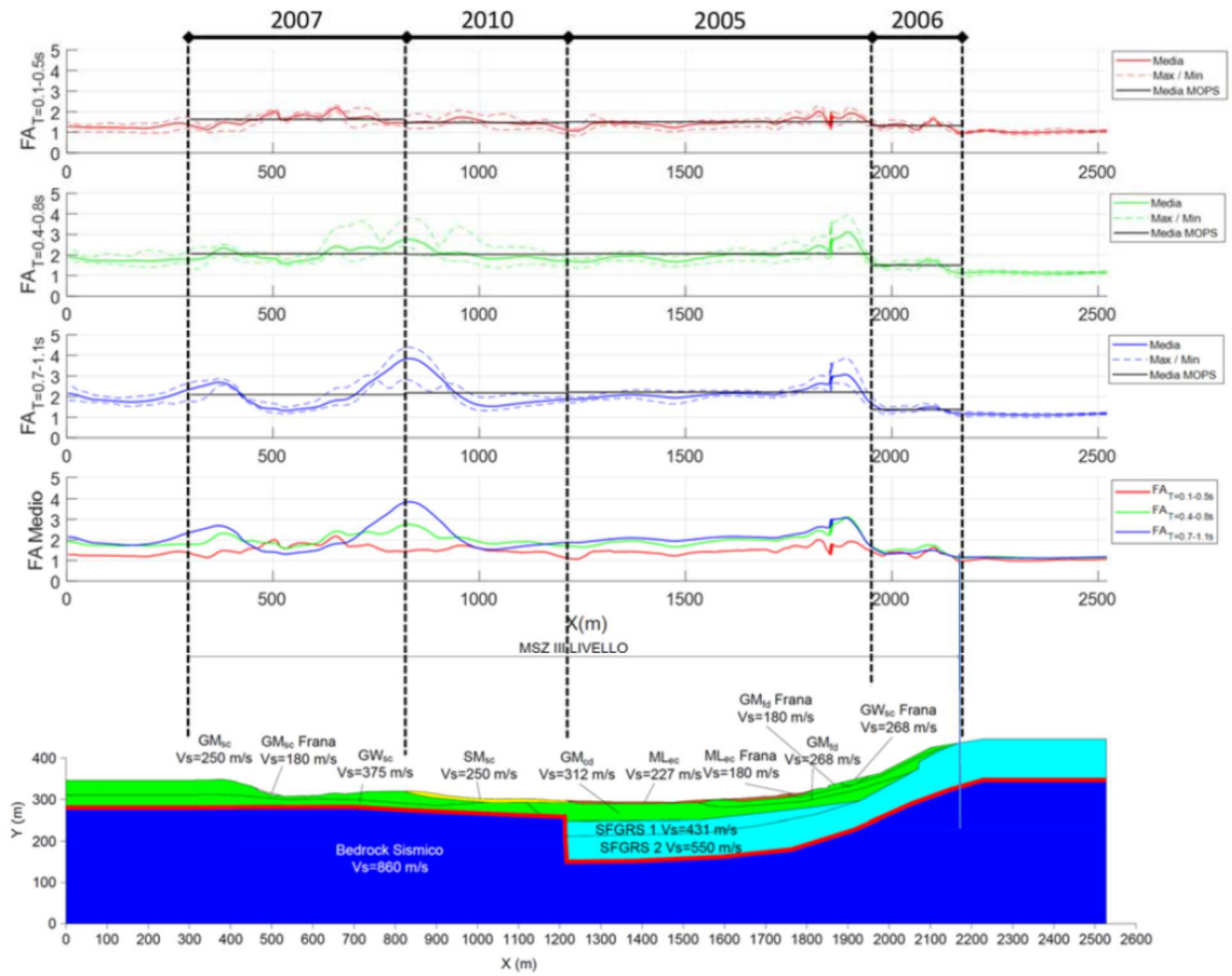



*Figura 158 - Profilo dei fattori di amplificazione per la sezione GG'.*

In Tabella 66 si riportano i valori dei fattori di amplificazione medi per i tratti di MOPS attraversati dalle due sezioni d'analisi, mentre in Tabella 67 si riportano i valori finali dei fattori di amplificazione attribuibili alle singole MOPS.

*Tabella 66 - Fattori di amplificazione medi per le MOPS attraversate dalle sezioni AA', CC' e GG'.*

| | Sezione AA' | | Sezione AA' | | Sezione GG' | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2002 | 2004 | 2002 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2010 |
| $FA_{0.1-0.5s}$ | 1.39 | 1.38 | 1.34 | 1.43 | 1.50 | 1.32 | 1.63 | 1.47 |
| $FA_{0.4-0.8s}$ | 1.90 | 1.82 | 1.85 | 1.48 | 2.06 | 1.50 | 2.06 | 2.03 |
| $FA_{0.8-1.1s}$ | 2.01 | 1.74 | 1.99 | 1.53 | 2.22 | 1.38 | 2.10 | 2.18 |

*Tabella 67 - Fattori di amplificazione attribuibili alle MOPS del comune di Forio.*

| | 2001 | 2002 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2099 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $FA_{0.1-0.5s}$ | 1.45 | 2.22 | 1.95 | 1.76 | 1.60 | 1.88 | 1.76 |
| $FA_{0.4-0.8s}$ | 1.85 | 3.21 | 2.43 | 1.94 | 1.88 | 1.69 | 1.94 |
| $FA_{0.8-1.1s}$ | 2.58 | 3.22 | 2.25 | 1.33 | 1.52 | 1.24 | 1.33 |

## 7.2 Zone instabili

### 7.2.1 Faglie attive e capaci (FAC)

Come già illustrato nel capitolo 3.4, l'assenza di faglie capaci nel territorio oggetto di studio è stata verificata consultando il catalogo delle faglie capaci ITHACA "ITaly HAzard from CApable faults" disponibile online (vedi Figura 82 - Faglie attive e capaci, da http://sgi2.isprambiente.it/ithacaweb/viewer/) consultabile dal sito internet della S.G.I.. Dal suddetto catalogo risulta che il territorio comunale di Forio non è interessato da faglie attive e capaci.

### 7.2.2 Liquefazioni (LQ)

Per "fenomeno di liquefazioni", nella letteratura scientifica, si intende la perdita della resistenza dei terreni saturi sotto sollecitazioni statiche o dinamiche in conseguenza delle quali il terreno raggiunge una condizione di fluidità pari a quella di una massa viscosa. Questo si verifica generalmente nei depositi di sabbie sciolte fini quando, sotto l'azione di sollecitazioni sismiche o di carichi applicati, la pressione dell'acqua nei pori aumenta progressivamente fino ad eguagliare la pressione totale di confinamento, quindi gli sforzi efficaci si riducono a zero.
Le aree a maggior rischio di fenomeni di liquefazioni sono associate alla presenza di termini squisitamente sabbiosi o limosi con bassa plasticità e densità. Alcuni terreni ghiaiosi possono essere vulnerabili ai fenomeni di liquefazione se interposti tra terreni che impediscono una rapida dissipazione della pressione dei pori indotta dai sismi.
Di seguito si riportano alcuni fattori che influenzano la liquefazione dei depositi incoerenti secondo la maggior parte degli autori; tali fattori sono:

- i terreni che manifestano fluidificazione ricadono in depositi deltizi, fluviali e marini recenti con falde superficiali, costituiti da materiale fine (sabbie fine sciolte) saturi, non consolidati, con granulometria uniforme (coefficiente di uniformità Uc<5) e con densità da media a bassa;
- la liquefazione difficilmente interessa strati di profondità maggiore di 15-20 m;
- la presenza di percentuali di argilla o di ghiaia possono ridurre in maniera rilevante la suscettibilità alla liquefazione dei depositi;
- la presenza di strati superficiali non liquefacibili con spessore maggiore di 3 m possono contrastare la liquefazione degli strati sottostanti;
- i terremoti che producono liquefazione in aree di pianura sono caratterizzati da magnitudo superiore a 6 e da durata prolungata;
- la storia sismica del territorio può dare indicazioni sulla fluidificazione dei depositi, cioè in aree dove si sono manifestati questi fenomeni si possono ripetere con maggiori probabilità.

Nell'ambito della redazione dello studio di Microzonazione Sismica di III Livello, in una prima fase erano state indicate come aree instabili per liquefazione le zone costiere di Montano, San Francesco e Citara, in quanto vedevano la presenza di depositi sabbiosi in falda. A seguito dei confronti avuti

con il gruppo di lavoro del Centro MS è stato appurato ce tale possibilità risulta molto remota. Di seguito si riporta la nota fornita dal Centro MS in merito alla valutazione alla liquefazione:

*Le "Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazioni (LIQ), versione 1.0" (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica 2018) riprendono, modificandole in parte, le indicazioni di AGI2005 e NTC2018 nelle quali vengono indicate le condizioni predisponenti lo sviluppo dei fenomeni di liquefazione:*

1. *nella successione litologica sono presenti orizzonti di terreni non coesivi saturi (limi sabbiosi, sabbie, sabbie limose, sabbie ghiaiose, sabbie argillose e ghiaie sabbiose) ad una profondità inferiore a 20 m dal p.c.;*
2. *la falda acquifera deve essere ad una profondità media stagionale inferiore a 15 m dal p.c.;*
3. *gli eventi sismici attesi al sito devono essere caratterizzati da valori magnitudo $M_w \geq 5$ ($I_{rif} \geq$ VII) e da un'accelerazione di picco in superficie del segnale di riferimento $a_{max} \geq 0.1$ g (IMCS ≥ VII).*

*Se sono verificate queste tre condizioni allora si rappresenta una $ZA_{lq}$ nel livello 1 di MS.*

*Nella Carta di MS di Livello 3 è necessaria una raccolta dati specifica e possono essere applicati metodi di analisi il più delle volte semplificati, al fine di produrre stime quantitative della pericolosità da liquefazione. Il parametro che permette di discriminare una $ZS_{lq}$ da una $ZR_{lq}$ è l'Indice di potenziale di Liquefazione medio "IL" (Iwasakiet al., 1982). Nel caso in cui l'indice IL>15 allora si procederà con livelli avanzati che si basano su analisi 1D o 2D della RSL. Verificate le altre condizioni necessarie, esistono diverse metodologie per il calcolo della magnitudo Mw da utilizzare per la valutazione della suscettibilità alla liquefazione.*

*Sono stati applicati due metodi classici di calcolo della Mw utili alla valutazione della suscettibilità alla liquefazione:*

- *Massima magnitudo dal catalogo DBMI 11;*
- *Massima magnitudo delle zone sismogenetiche e disaggregazione (GdL MS, 2008).*

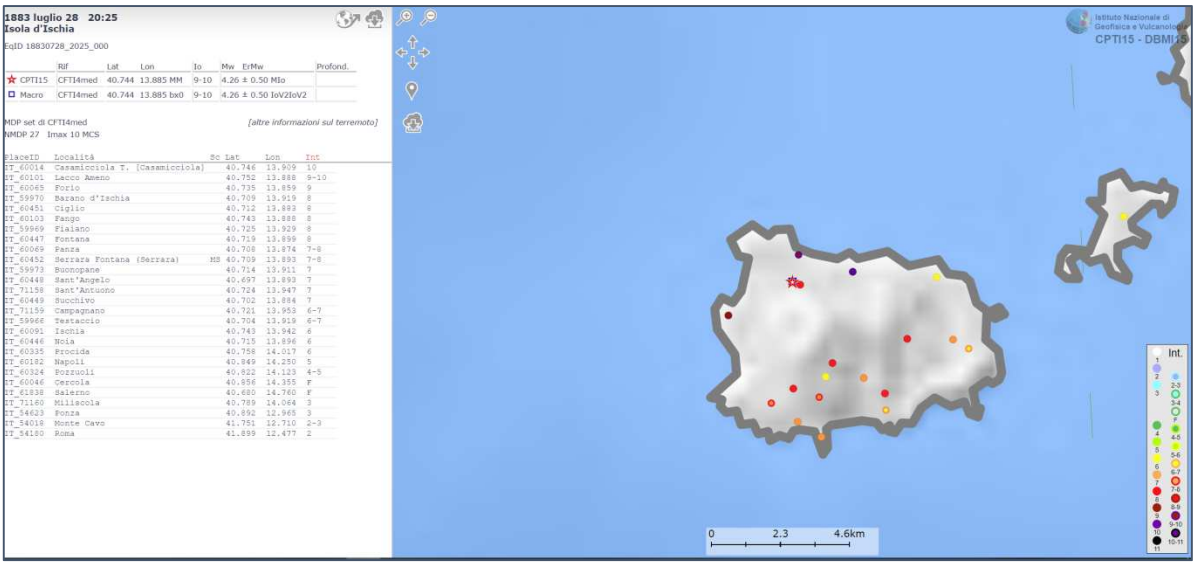



*Figura 159 - Intensità macrosismiche stimate per il terremoto del 1883 luglio 28 per l'Isola di Ischia (fonte: https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/eq/18830728_2025_000; Rovida et al., 2016)*

*Tabella 68 - Magnitudo massima stimata da DBMI11per il terremoto del 1883 luglio 28. Valore estratto dalla Figura precedente.*

| **Magnitudo massima Catalogo DBMI 11** | |
|---|---|
| CPTI (2015): IMCS Max= 10 | Mw Max= 4.26 |
| https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/query_place/ | |

*La zonazione sismogenetica utilizzata in queste analisi è la ZS9 (INGV, 2006). In particolare, per la zona sismogenetica ZS 928 in cui ricadono i tre comuni di Forio, Lacco Ameno e Casamicciola Terme, è indicato un valore massimo di Magnitudo Max di 5.91 (Linee guida per la liquefazione, pag. 31).*

*Tabella 69 - Magnitudo massima da Linee guida liquefazione.*

| **Magnitudo massima da zona sismogenetica (Linee guida liquefazione)** |
|---|
| MwMAX per l'isola di ISCHIA= 5.91 |

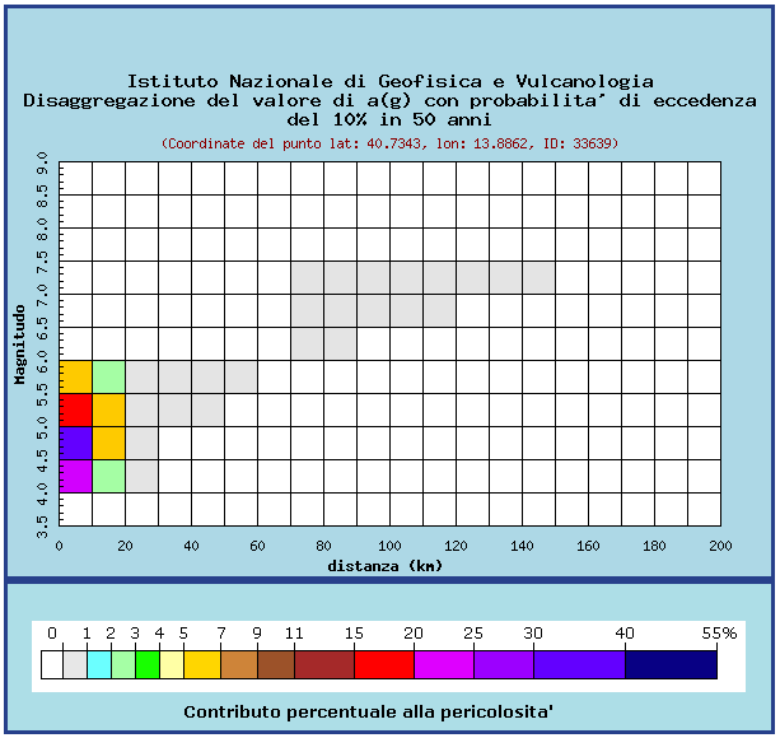
*In Tabella 70 sono riportati i valori medi e modali proposti per i comuni di Forio, Lacco Ameno e Casamicciola Terme estratti dall'allegato "Comuni_MR" del CD-ROM allegato a GdL MS (2008).*

*Tabella 70 - Magnitudo medie e modali per i tre comuni dell'isola di Ischia oggetto dell'Ordinanza n.1 del 27 novembre 2018.*

**Magnitudo metodo della disaggragazione (Allegato a ICMS2008)**

| CodIstat | Comune | DentroVicino | Mmedia | Rmedia | Mmoda | Rmoda |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 15063019 | Casamicciola Terme | V | 4.9 | 8 | 4.75 | 5 |
| 15063038 | Lacco Ameno | V | 4.9 | 8 | 4.75 | 5 |
| 15063031 | Forio | D | 4.9 | 8 | 4.75 | 5 |

A queste stime si è aggiunto il calcolo di coppie M-D basato su valutazioni della pericolosità media INGV (Figura 160).




| Valori medi | | |
|---|---|---|
| Magnitudo | Distanza | Epsilon |
| 4.910 | 7.580 | 0.699 |

*Figura 160 - Valori medi disaggregazione INGV per il comune di Forio (disponibile al sito web: http://esse1-gis.mi.ingv.it).*

*Infine, è stato poi applicato un metodo originale, utilizzando i dati ottenuti dall'implementazione del codice SASHA (D'Amico e Albarello, 2008). Questo codice è in grado di compiere una specifica "analisi di disaggregazione" volta ad identificare gli eventi sismici del passato più rappresentativi della pericolosità locale (Albarello, 2012). Il codice fornisce per ciascuna località capoluogo comunale i valori delle intensità macrosismiche caratterizzate da una fissata probabilità di eccedenza in un fissato tempo di esposizione (Irif) e identificando quegli eventi storici che hanno maggiormente contribuito alla definizione di questa pericolosità. Fra questi viene infine selezionato quell'evento che ha fornito il maggiore contributo per l'intensità Irif indicandone la magnitudo macrosismica e la distanza epicentrale così come riportate dal catalogo sismico di riferimento.*

*I dati indicati nell'Allegato alle linee guida per la liquefazione sono riportati in Tab. 5.2.4.*

*Tabella 71 - Magnitudo massima da codice SASHA (D'Amico e Albarello,2008).*

| **Metodo Originale (da codice SASHA)** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Nfelt** | **Irif** | **Mrif** | **Drif** |
| Casamicciola | 22 | 10 | 5.79 | 2 |
| Lacco Ameno | 22 | 10 | 5.79 | 1 |
| Forio | 6 | 9 | 5.79 | 2 |

*Per completezza e allo scopo di fornire un utile confronto con tutti i dati disponibili, sono stati forniti anche i valori delle coppie M-D del terremoto verificatosi il 21 agosto 2017 con epicentro a Casamicciola Terme (Tabella 72).*

*Tabella 72 - Magnitudo del terremoto e distanze per alcune località dell'isola di Ischia (Azzaro et. al., 2017).*

**Terremoto 21 agosto 2017**

**Mw** 3.9

| **Comune** | **Provincia** | **Distanza (km)** |
|---|---|---|
| Casamicciola Terme | NA | 1 |
| Lacco Ameno | NA | 2 |
| Serrara Fontana | NA | 3 |
| Forio | NA | 3 |
| Barano d'Ischia | NA | 3 |
| Ischia | NA | 4 |
| Procida | NA | 11 |
| Monte di Procida | NA | 15 |
| Bacoli | NA | 17 |

*Per le zone di instabilità per liquefazione è possibile ottenere gli scenari di Figura 161 nella quale, oltre ai punti rappresentativi dei singoli scenari, sono riportate le curve di Seed et al. 1984 e Galli (2000).*

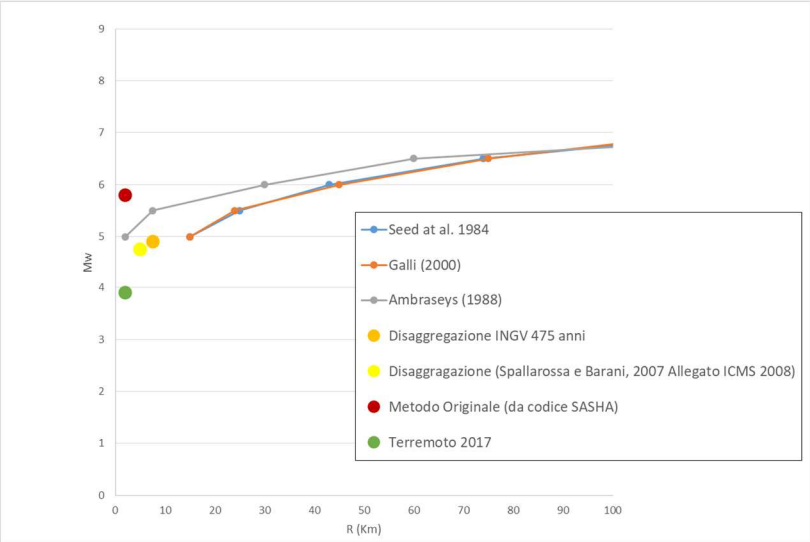



*Figura 161 -Applicazione delle linee guida relative alle instabilità per liquefazione (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica 2018). I punti sono rappresentativi delle coppie M-D più cautelative con riferimento ai tre comuni dell'isola di Ischia*

*Le metodologie proposte non contemplano uno dei parametri più importanti nella definizione della suscettibilità alla liquefazione, ovvero la durata dello scuotimento. Va inoltre osservato che la magnitudo massima di un catalogo storico comporta che la scelta sia completamente deterministica. Inoltre, la maggior parte delle magnitudo riportate nei cataloghi derivano da conversioni empiriche $I_{MCS}$-Me, dunque, possono presentare delle incertezze proprie di queste trasformazioni. Infine, la Mw stimata dalla zonazione ZS9 e dalla disaggregazione risente dell'incertezza della zonazione stessa e vista l'estensione areale delle zone ZS9 (denominata Ischia – Vesuvio), la Mw può essere sovrastimata.*

*In conclusione, per tutte le motivazioni sopraelencate, vista l'incertezza e la sovra-semplificazione del metodo per la verifica della suscettibilità alla liquefazione, l'applicazione delle linee guida relative alla liquefazione nel comune di Forio oggetto dell'Ordinanza n.1 del 28 novembre 2018 conduce alla scelta di definire nella carta delle MOPS una sola zona di attenzione per liquefazione, cioè l'area della spiaggia di Montano, a nord di Zaro, al confine con il comune di Lacco Ameno, in funzione di dati forniti dal gruppo di lavoro del Centro MS relativi alla verifica a liquefazione dell'area effettuata nell'ambito di uno studio geologico per committenti privati.*

### 7.2.3. Instabilità di versante sismoindotte (FR)

La Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica ad integrazione degli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica" (GdL MS, 2008) ha individuato dei metodi per lo studio delle Instabilità di versante sismo-indotte e le Liquefazioni.
L'obiettivo principale delle linee guida è definire criteri generali e procedure operative per amministratori e pianificatori, in coordinamento tra lo Stato, le Regioni e gli Enti Locali, al fine di

raccogliere informazioni su tali effetti per mitigare i rischi derivati o indotti nelle aree edificate o con previsioni di trasformazione, fornendo carte da utilizzare come strumenti di pianificazione e gestione del territorio.

Per lo studio delle instabilità sismo-indotte sono presenti tre livelli di approfondimento che permettono di individuare le seguenti tre zone: zona di attenzione (ZA), zona di suscettibilità (ZS) e zona di rispetto (ZR).

Lo schema illustrativo, applicabile a tutte le principali instabilità sismo-indotte, che sintetizza le attività, i risultati attesi e il tipo di zona di instabilità nell'ambito dei diversi livelli di approfondimento degli studi di MS è mostrato in Figura 162.

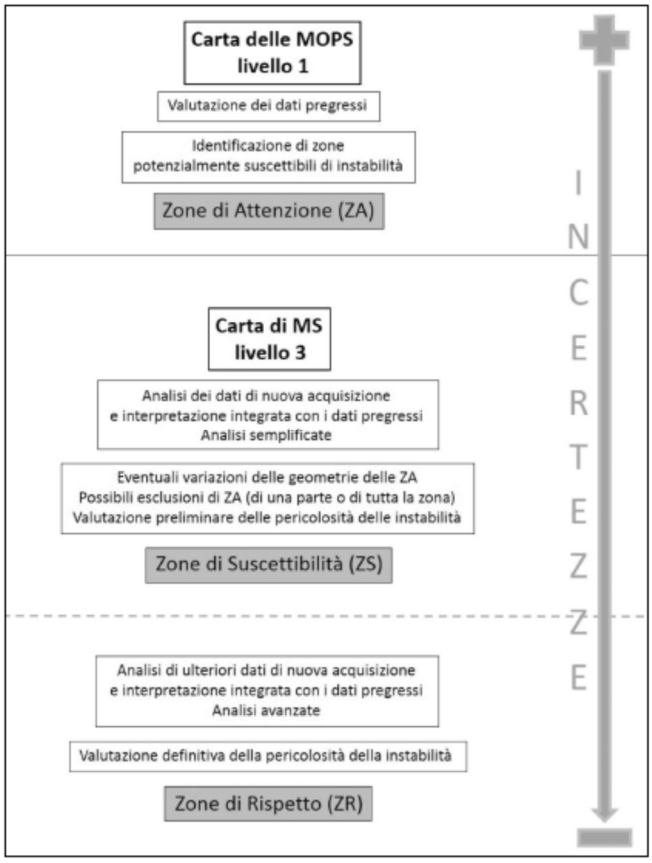



*Figura 162 - Schema illustrativo applicabile a tutte le principali instabilità sismoindotte che sintetizza le attività, i risultati attesi e il tipo di zona di instabilità nell'ambito dei diversi livelli di approfondimento degli studi di MS.*

Nelle "Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da instabilità di versante sismoindotte (FR), versione 1.0" (2017) vengono inoltre riportate con maggior dettaglio le procedure per lo studio delle instabilità di versante e le loro delimitazioni.

L'individuazione delle ZAfr, nel Livello 1 di MS, viene perseguita utilizzando gli elementi informativi minimi. Si ricercano le segnalazioni di aree in frana o potenzialmente franose in inventari esistenti (PAI/IFFI), si stabilisce la presenza e/o l'accadimento di eventuali fenomeni in occasione di eventi sismici passati e si esegue un confronto con i litotipi riportati nella Carta Geologico Tecnica ed

eventuali dati pregressi raccolti durante lo studio di MS di livello 1.Tra gli elementi informativi minimi che forniscono le informazioni di base vanno annoverati anche gli elementi geomorfologici.

Con riferimento allo studio oggetto della relazione, la Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Carta delle MOPS) e la carta Geologico – Tecnica è stata redatta includendo tutti i dati pregressi, presenti in letteratura o in database consultabili, definiti "elementi informativi minimi" che sono elementi necessari alle verifiche delle condizioni predisponenti le instabilità cosismiche definiti al capoverso precedente. Nell'identificazione e definizione delle "Zone di Attenzione (ZA) per le instabilità" nella Carta delle MOPS sono stati inoltre consultati anche i database IFFI della provincia di Napoli, ovvero i "Dati contenuti nel sistema informativo del Progetto IFFI, realizzato in esecuzione della Convenzione 18/01/2001 tra Regione Campania e Servizio Geologico Nazionale (ora ISPRA)" (disponibile al sito: http://www.difesa.suolo.regione.campania.it/content/view/64/1/) ed i Piani Stralcio per l'Assetto Idrogeologico dell'Autorità di Bacino distrettuale dell'Appennino meridionale, trasmessi dalla Regione Campania Direzione Generale dei LL.PP. (nota prot. 0251089 del 05/04/2017) all'Autorità di Bacino distrettuale, ai sensi dell'attribuzione degli elaborati dei vigenti Piani di Assetto Idrogeologico – Rischio da frana e Rischio Idraulico (G.U. n 27 del 02/02/2017 del D.M. 25 ottobre 2016).

Negli studi di livello 3 di MS, per la realizzazione della Carta di Microzonazione Sismica (Carta di MS) la definizione degli "elementi informativi specifici" su cui si basano le metodologie di analisi degli spostamenti cosismici è finalizzato a definire con metodi semplificati e/o avanzati: le "Zone di Suscettibilità (ZS) per le instabilità" e le "Zone di Rispetto (ZR) per le instabilità".

Per lo studio di dettaglio delle instabilità di versante al Livello 3, è necessario dunque procedere con i seguenti step: i) acquisire dati specifici, derivanti da indagini di sito e di laboratorio e valutare la possibilità di mobilizzazione del versante ipotizzando una forzante sismica specifica per l'area in esame; ii) distinguere se si tratta di frane in terra o di frane in roccia, cioè se coinvolgono rispettivamente pendii in terreni coerenti ed incoerenti oppure ammassi rocciosi fratturati e iii) scegliere un metodo, semplificato e avanzato, che permetta di stimare l'ordine di grandezza degli spostamenti massimi attesi e determinare in questo modo il tipo di zona ($ZS_{fr}$ o $ZR_{fr}$).

Nelle "Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da instabilità di versante sismoindotte (FR), versione 1.0" (2017), sia nel caso della determinazione delle $ZS_{fr}$ sia delle $ZR_{fr}$ si fa riferimento alle linee guida AGI (2005), nelle quali sono esposte le procedure semplificate o avanzate da adottare a seconda dell'analisi degli spostamenti calcolati/aree di accumulo se coinvolgono o meno le aree urbanizzate o urbanizzabili.

Per le frane in roccia i metodi semplificati utilizzati per il calcolo degli spostamenti attesi (runout distance) e per definire le $ZS_{fr}$ sono:

- metodo del cono d'ombra (Evans e Hungr, 1993)
- heightfuction model (Keylock e Domaas, 1999)
- α-β model (Heim, 1932e Korner, 1980)
- runout ratio model (McClung e Lied, 1987)

- simple dynamics rockfall model (Kirkby e Statham,1975).
- metodo dell'angolo di inclinazione del versante (Onofri e Candian, 1979)

Per le frane in terra l'analisi semplificata adottata per il calcolo degli spostamenti attesi e per individuare le $ZS_{fr}$ è quella di Newmark (1965) su pendio infinito.
Per la definizione delle $ZR_{fr}$ i metodi da utilizzare prevedono le analisi sforzi-deformazioni, condotte secondo AGI (2005) e circolare esplicativa NTC (2018). Tali analisi avanzate sono comunemente eseguite con tecniche di integrazione numerica, agli elementi o alle differenze finite, implementate in codici di calcolo commerciali.
Tuttavia, con riferimento ai tre comuni dell'isola di Ischia, il disciplinare di incarico afferma che le zone di instabilità rimangono definite zone di attenzione (ZAfr) anche nel livello 3 di analisi e quindi non devono essere caratterizzate da un fattore di amplificazione nella carta di livello 3. Ciò si rende opportuno vista la necessità di eseguire indagini specifiche e approfondimenti ulteriori per la caratterizzazione dei terreni che definiscono i pendii.
Ricadendo alcune di queste zone lungo le sezioni 2D sottoposte a modellazione numerica della risposta sismica locale, essendo alcune aree in $ZA_{fr}$ densamente edificate e danneggiate dal recente sisma, si è ritenuto comunque opportuno restituire solo in relazione, anche per questi poligoni, il calcolo del fattore di amplificazione. Il fattore di amplificazione è stato comunque immagazzinato negli opportuni campi FA dello shapefile "Instab", ma senza procedere all'analisi tipica del terzo livello (mantenendo vuoti i campi FRT, IL, DISL).

#### 7.2.3.1 Analisi dei dati

Le aree caratterizzate da un livello di pericolosità da frana R3 e R4 secondo la classificazione PAI sono state incluse nello shapefile "Instab" senza modifica dei perimetri relativi, così come individuato dai "Protocolli di acquisizione dati ed elaborazione relativi alle attività di Microzonazione di Livello III nei territori dei Comuni dell'isola di Ischia interessati dall'evento sismico del 21 agosto 2017".

Per le aree in frana segnalate nel database IFFI è stata effettuato lo screening di cui al paragrafo 7.2.3. In particolare, la metodologia con cui individuare le aree ove sia possibile escludere l'attivazione di frane sismo-indotte si basa su specifici parametri, ovvero coppie Magnitudo M – Distanza D e si articola nei due passaggi seguenti:

1) disaggregazione della pericolosità sismica, effettuata prendendo in riferimento tre fonti di dati differenti: i) INGV (http://esse1-gis.mi.ingv.it;; ii) Barani et al., 2009 (Allegati a Gdl MS, 2008) ; iii) Iervolino et al. 2009, (REXEL);

2) confronto degli scenari M-D con i valori di soglia derivati da Keefer (1984).

Nel caso in esame, sono stati determinati i valori di scenario rappresentativi dello scuotimento calcolato per valori del tempo di ritorno di 475anni.

Il codice di calcolo REXEL è stato utilizzato per la definizione dei valori di coppie M-D per ordinate spettrali diverse da Sa (T=0s). In particolare, sono state estratte per: PGA =Sa (T= 0s); Sa (T= 0.5s); Sa (T=1 s); Sa (T= 1.5s).

Per le aree in frana segnalate nel database IFFI è dunque possibile ottenere gli scenari di Figura 163 nella quale, oltre ai punti rappresentativi dei singoli scenari, sono riportate le curve di Keefer disponibili per tre differenti cinematismi: frane di crollo, frane di scorrimento laterale e frane in materiale coesivo. La curva che presenta valori di M più bassa a parità di distanza epicentrale è quella per le frane da crollo.

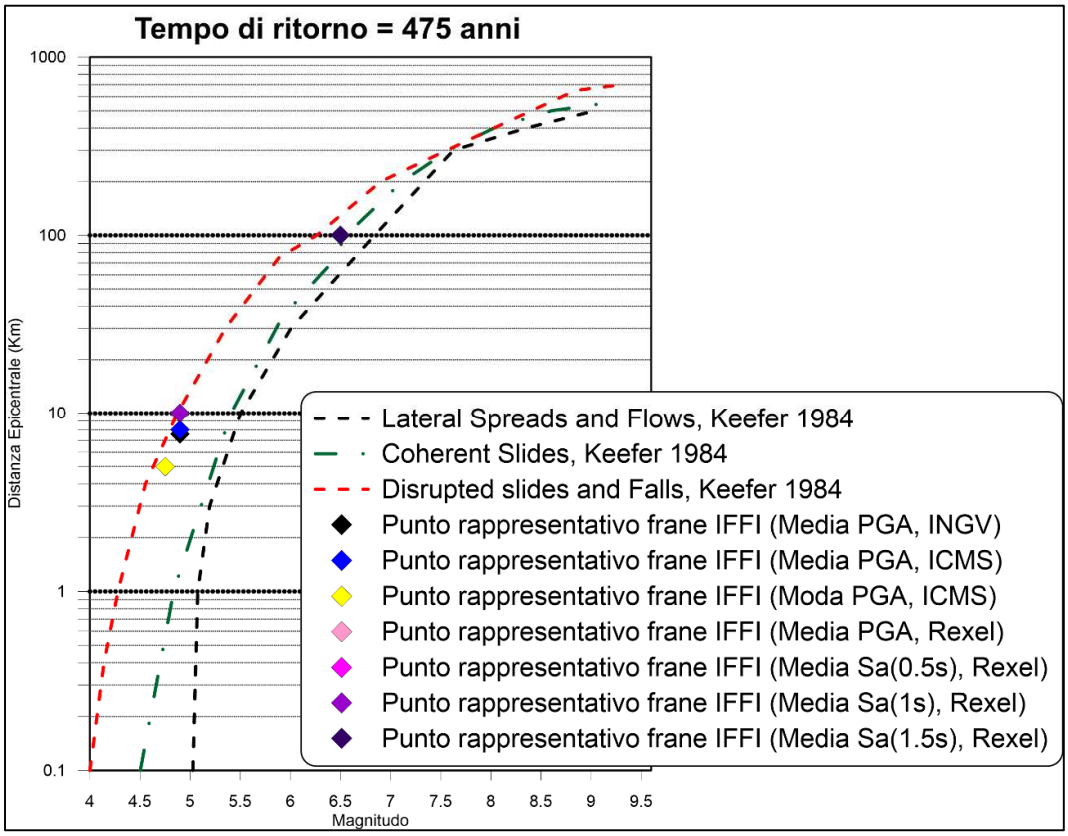



*Figura 163 - Applicazione delle linee guida relative alle instabilità di versante (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, 2017) con riferimento ai tre comuni dell'isola di Ischia*

### 7.2.3.2 Risultati

L'applicazione della metodologia summenzionata ha permesso di escludere le aree IFFI che, pur essendo in frana, non risultano sismo – inducibili. In particolare, l'analisi effettuata giustifica, secondo un criterio oggettivo, la scelta di non mantenere nella carta delle MOPS le zone di attenzione per frane IFFI quiescenti da scorrimento. Queste ultime sono state perimetrate solo in carta geologico - tecnica CGT e sono state rappresentate nella carta di Livello 3 anche in termini di Fattore di Amplificazione FA e spettri (sono state considerate aree stabili suscettibili di amplificazione). Viceversa, l'applicazione delle linee guida nel caso di frane IFFI attive da crollo comporta la loro rappresentazione come zona di instabilità anche nella carta delle MOPS (zone di attenzione). In questo caso, al poligono relativo nella carta di livello 3 non sono stati associati valori di FA, i quali sono stati comunque riportati in relazione, essendo l'area densamente edificata o danneggiata dal recente sisma.

## 8. Elaborati cartografici

Gli studi svolti per il lavoro di Microzonazione Sismica di Livello 3 sono stati restituiti mediante elaborati cartografici specifici, redatti seguendo gli ICMS 2008 e gli standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.1, utilizzando come base la Carta Tecnica Regionale in scala 1:5.000. La copertura del territorio comunale di Forio, ha richiesto n. 2 tavole per ciascuna carta tematica (Forio Nord e Forio Sud). Le Tavole sono state tutte stampate in formato A0.
Tutti gli elaborati cartografici prodotti, sono stati realizzati a partire dal progetto qgis formato .qgs fornito dal Centro di MS. Tale progetto, oltre a permettere l'editing dei singoli shape files ha consentito la composizione e l'esportazione in .pdf degli elaborati di seguito illustrati, data la presenza di alcuni template dedicati.

### 8.1 Carta delle indagini (CI)

In tale elaborato (realizzato in n. 2 tavole in scala 1: 5.000), sono state rappresentate tutte le indagini preesistenti reperite e quelle realizzate ex-novo nel corso degli studi di Microzonazione Sismica di Livello 3 e fornite da altri professionisti fino a giugno 2019. In particolare, partendo dalla cartografia di base rappresentata dalla Carta Tecnica Regionale sono state ubicate le indagini puntuali e lineari illustrate nel capitolo 4 e rappresentate in forma simbolica a seconda della tipologia (Cap. 2.2.3 degli I.C.M.S.).
Tutte le indagini (sondaggi, prove penetrometriche, misure di microtremore, Downhole ,ecc…), eventuali dati geotecnici ricavati e le indagini geofisiche lineari (MASW, SR) sono stati archiviati nella banca dati, attraverso il software SoftMS , versione 4.1, da cui è stato possibile esportare il database definitivo, allegato al presente lavoro di Microzonazione Sismica di Livello 3, assieme a tutta la documentazione in formato .pdf.

Le indagini considerate sono state complessivamente 219, di cui 189 siti puntuali e 30 siti lineari, sparse sull'intero territorio comunale.
I dati geologico-tecnici raccolti ed archiviati nel presente studio comprendono:

- n. 18 sondaggi a carotaggio continuo, di cui 8 con prelievo di campioni;
- n. 4 sondaggi a distruzione di nucleo;
- n. 124 stazioni di microtremore a stazione singola (HVSR);
- n. 3 array sismico (ESAC_SPAC);
- n. 8 prove penetrometriche dinamiche pesanti (DP);
- n. 5 prove sismiche in foro Down-Hole (DH);
- n. 11 profili sismici a rifrazione (SR);
- n. 19 prospezioni sismiche MASW;
- n. 1 sondaggi a carotaggio continuo per una lunghezza complessiva di 60 metri dal p.c., con prelievo di 4 campioni indisturbati e prove penetrometriche in foro (SPT);
- n. 1 prova sismica in foro Down-Hole fino alla profondità di 50 m dal p.c..

Le indagini reperite si concentrano nelle aree più urbanizzate di Forio, in particolar modo, andando da nord verso sud, nella zona di San Francesco, in loc. Baiola (Palazzetto dello sport e campo sportivo) a Forio capoluogo, nella zona di Citara ed a Panza. I sondaggi geognostici e le DH/masw si individuano in prossimità di strutture pubbliche (scuole e centri sportivi prevalentemente).
Nelle aree meno urbanizzate e/o prive di strutture pubbliche si individuano solo le indagini di nuova realizzazione per gli studi di MS effettuati dal gruppo di lavoro del Centro MS nel 2017 e dagli scriventi (prevalenza di prospezioni sismiche hvsr).
Nell'area del Monte Epomeo sono riportati una serie di hvsr concentrati in loc. Monte Nuovo desunti dallo pubblicazione di Della Seta et al., 2015, finalizzata allo studio della DPGV di Monte Nuovo.

Di seguito si riporta una tabella riepilogativa di tutte le indagini cartografate.

*Tabella 73 - Tabella riepilogativa di tutte le indagini eseguite*

| Indagini puntuali | Q.tà |
|---|---|
| Down-hole | 6 |
| Penetrometrica dinamica pesante | 8 |
| ESAC/SPAC | 3 |
| Microtremori a stazione singola (HVSR) | 124 |
| Sondaggio a carotaggio continuo | 16 |
| Sondaggio con prelievo di campioni | 5 |
| Sondaggio a distruzione di nucleo | 5 |
| Sondaggio a distruzione di nucleo che intercetta il substrato | 2 |
| Penetrometrica dinamica SPT | 1 |

| | |
|---|---|
| Sondaggio a carotaggio continuo che intercetta il substrato | 2 |
| Indagini lineari | Q.tà |
| MASW | 19 |
| Sismica a rifrazione | 11 |
| Sezione geologica | 7 |

## 8.2 Carta delle frequenze naturali dei terreni

La carta delle frequenze naturali è stata realizzata riportando le varie stazioni di misura di rumore ambientale, suddivise nelle diverse località di studio e per ogni misura è stato assegnato un simbolo circolare la cui dimensione è funzione dell'ampiezza del picco fondamentale, mentre la colorazione è legata al valore della frequenza fondamentale F0.

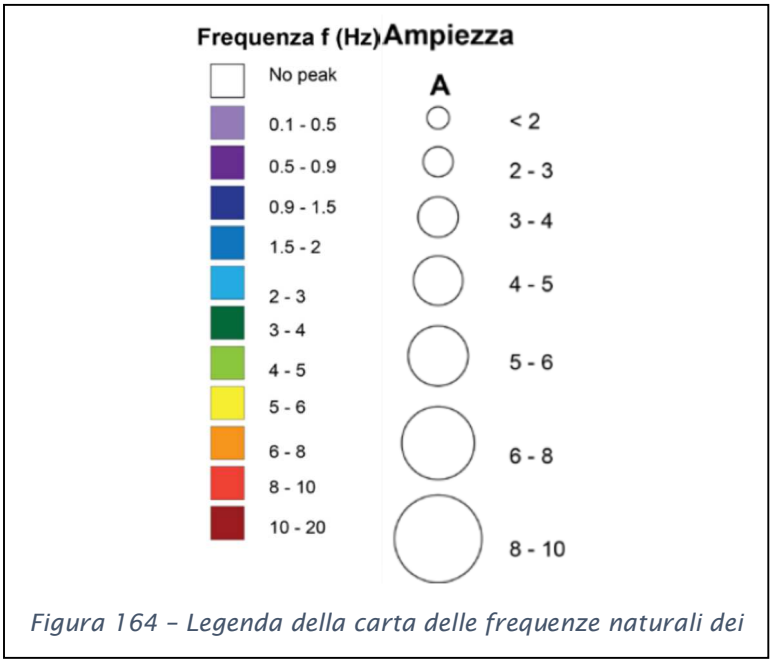



*Figura 164 – Legenda della carta delle frequenze naturali dei*

Le misurazioni HV sono state effettuate con l'obiettivo di stimare la frequenza di risonanza fondamentale della copertura sedimentaria attraverso la tecnica dei rapporti spettrali HVSR-Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Nakamura Y., 1989). Il metodo viene ritenuto uno strumento valido ed affidabile per l'identificazione di possibili effetti di risonanza dei terreni e la stima preliminare della frequenza di risonanza (F0) di sito.

Le registrazioni delle indagini eseguite ex-novo sono state realizzate e dai professionisti del RTP, attraverso acquisizioni di rumore ambientale da stazione singola. Le misure HV sono state effettuate con durata pari a 40 minuti, esplorando la variazione di F0 e l'ampiezza A0 in funzione del livello di rumore ambientale. Il processing delle registrazioni è avvenuto attraverso la scelta ragionata dei valori dei parametri di elaborazione, facendo riferimento a procedure standardizzate (SESAME, 2004) per l'elaborazione e validazione statistica delle curve HVSR.

Le carte delle frequenze dei terreni sono state realizzate partendo dall'inserimento puntuale di tutte le misure HVSR reperite ed effettuate nel corso degli studi di Microzonazione Sismica di Livello 3. In totale sono state inserite 124 misure.

Successivamente, la struttura della Banca dati geografica HVSR ha previsto l'archiviazione di n. 4 valori di frequenze e relative ampiezze: tali valori di rumore sono stati riportati nei campi F0, F1, F2 e F3 (Hz) a crescere in frequenza e relative Ampiezze (H/V) A0, A1, A2, e A3. Nel campo numerico Fr e della relativa ampiezza Ar sono stati invece riportati i valori di riferimento della Frequenza e dell'Ampiezza più rappresentative scelte tra F0, F1, F2, F3. Il valore 'No pick' della misura si ottiene dando un valore nullo o '0' (zero) nel campo numerico F0 o Fr.

Infine, sulla base dei dati di frequenza sono stati creati due tavole:

- una Carta delle Frequenze Naturali dei Terreni (F0), dove sono state rappresentate le frequenze "F0", intese come massimi significativi in più bassa frequenza;
- una Carta delle Frequenze Naturali dei Terreni, dove sono state rappresentate le frequenze "Fr", intese come massimi giudicati rappresentativi di un contrasto di impedenza tra le coperture e il Substrato Sismico.

Le Tavole delle frequenze naturali dei terreni F0 evidenziano la presenza di picchi inferiori ad 1 Hz (colori dal glicine al blu scuro) per tutta l'area centrale del territorio comunale, con l'esclusione dunque delle aree di Zaro e Campotese, condizioni interpretabili con la presenza di contrasti di impedenza significativi molto profondi, di gran lunga superiori ai 100 metri dal p.c..

L'area di Campotese – Panza presenta picchi con valori mediamente poco più elevati (contrasto significativo a profondità pari a circa 100m) mentre sul plateau di Zaro si individuano picchi con ampiezze significative e valori compresi tra 4 e 9Hz.

La Carta delle Frequenze Fr permette di definire le stesse condizioni di sito della predetta. Nella zona centrale del territorio comunale (Baiola, San Francesco, Monterone, Forio, Monte Epomeo, Citara) non si identificano picchi evidenti, segno dell'assenza di contrasti di impedenza significativi. Si differenziano come al solito le aree di Campotese-Panza (valori di frequenza compresi tra 1 e 3 Hz) e di Zaro (valori di frequenza compresi tra i 3 ed i 10 Hz).

Nella successiva tabella sono elencati i valori di frequenza e di ampiezza utilizzati per la realizzazione delle due carte.

*Tabella 74 - Valori di frequenza ed ampiezza dei picchi H/V per ogni misura.*

| Progressivo indagine | Codice indagine HVSR | Frequenza del picco più evidente (F0) | Ampiezza della curva HV (A0) | Frequenza rappresentativa in Hz (Fr) | Ampiezza della curva HV (Ar) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 063031P32 | 0.80 | 4.10 | 2.50 | 4.50 |
| 2 | 063031P34 | 0.70 | 3.40 | 0.00 | 0.00 |
| 3 | 063031P35 | 7.00 | 3.50 | 0.00 | 0.00 |
| 4 | 063031P36 | 0.50 | 3.00 | 0.00 | 0.00 |
| 5 | 063031P37 | 0.40 | 3.50 | 0.00 | 0.00 |
| 6 | 063031P38 | 0.40 | 5.00 | 0.00 | 0.00 |
| 7 | 063031P39 | 0.80 | 4.00 | 2.50 | 3.20 |
| 8 | 063031P43 | 0.80 | 3.00 | 0.00 | 0.00 |
| 9 | 063031P44 | 0.80 | 3.00 | 0.00 | 0.00 |
| 10 | 063031P47 | 0.80 | 3.00 | 0.00 | 0.00 |
| 11 | 063031P50 | 0.50 | 5.00 | 0.00 | 0.00 |

| Progressivo indagine | Codice indagine HVSR | Frequenza del picco più evidente (F0) | Ampiezza della curva HV (A0) | Frequenza rappresentativa in Hz (Fr) | Ampiezza della curva HV (Ar) |
|---|---|---|---|---|---|
| 12 | 063031P51 | 0.50 | 3.00 | 6.00 | 2.50 |
| 13 | 063031P54 | 0.50 | 5.50 | 4.50 | 2.90 |
| 14 | 063031P55 | 0.70 | 4.00 | 6.50 | 2.90 |
| 15 | 063031P56 | 0.50 | 5.00 | 3.00 | 2.00 |
| 16 | 063031P57 | 0.50 | 4.00 | 0.00 | 0.00 |
| 17 | 063031P58 | 0.50 | 6.00 | 10.00 | 2.00 |
| 18 | 063031P59 | 0.60 | 5.00 | 8.00 | 2.00 |
| 19 | 063031P60 | 0.40 | 4.50 | 0.00 | 0.00 |
| 20 | 063031P62 | 0.40 | 2.50 | 0.00 | 0.00 |
| 21 | 063031P63 | 0.80 | 3.50 | 0.00 | 0.00 |
| 22 | 063031P64 | 1.00 | 4.00 | 0.00 | 0.00 |
| 23 | 063031P65 | 0.40 | 3.50 | 0.00 | 0.00 |
| 24 | 063031P66 | 0.40 | 6.00 | 0.00 | 0.00 |
| 25 | 063031P67 | 1.00 | 3.50 | 0.00 | 0.00 |
| 26 | 063031P68 | 1.00 | 3.00 | 7.00 | 3.00 |
| 27 | 063031P69 | 0.90 | 6.00 | 0.00 | 0.00 |
| 28 | 063031P70 | 1.00 | 3.50 | 7.00 | 2.00 |
| 29 | 063031P71 | 1.10 | 3.00 | 0.00 | 0.00 |
| 30 | 063031P72 | 1.00 | 3.50 | 0.00 | 0.00 |
| 31 | 063031P73 | 0.60 | 2.50 | 0.00 | 0.00 |
| 32 | 063031P74 | 0.80 | 4.00 | 0.00 | 0.00 |
| 33 | 063031P77 | 4.00 | 6.00 | 0.40 | 3.00 |
| 34 | 063031P78 | 0.50 | 4.00 | 8.00 | 2.00 |
| 35 | 063031P79 | 0.50 | 3.50 | 0.00 | 0.00 |
| 36 | 063031P80 | 0.50 | 5.00 | 0.00 | 0.00 |
| 37 | 063031P81 | 0.50 | 5.00 | 0.00 | 0.00 |
| 38 | 063031P82 | 0.50 | 3.00 | 0.00 | 0.00 |
| 39 | 063031P84 | 0.50 | 4.00 | 0.00 | 0.00 |
| 40 | 063031P85 | 0.40 | 3.00 | 0.00 | 0.00 |
| 41 | 063031P86 | 0.40 | 3.00 | 4.00 | 2.00 |
| 42 | 063031P87 | 0.40 | 2.50 | 0.00 | 0.00 |
| 43 | 063031P92 | 0.90 | 5.00 | 0.00 | 0.00 |
| 44 | 063031P94 | 0.60 | 3.50 | 10.00 | 2.50 |
| 45 | 063031P96 | 0.50 | 3.50 | 0.00 | 0.00 |
| 46 | 063031P97 | 0.50 | 3.00 | 0.00 | 0.00 |
| 47 | 063031P98 | 0.40 | 5.00 | 0.00 | 0.00 |
| 48 | 063031P101 | 0.40 | 5.00 | 0.00 | 0.00 |
| 49 | 063031P102 | 0.60 | 2.50 | 1.00 | 2.30 |
| 50 | 063031P105 | 0.60 | 2.50 | 0.00 | 0.00 |
| 51 | 063031P108 | 1.20 | 4.00 | 0.00 | 0.00 |
| 52 | 063031P109 | 1.00 | 5.00 | 4.00 | 3.80 |
| 53 | 063031P112 | 1.50 | 3.00 | 0.00 | 0.00 |
| 54 | 063031P113 | 3.50 | 3.00 | 1.00 | 2.90 |
| 55 | 063031P114 | 1.60 | 5.00 | 0.00 | 0.00 |
| 56 | 063031P115 | 1.00 | 2.50 | 0.00 | 0.00 |
| 57 | 063031P116 | 1.60 | 4.50 | 0.00 | 0.00 |
| 58 | 063031P117 | 0.60 | 2.50 | 0.00 | 0.00 |
| 59 | 063031P119 | 0.60 | 2.50 | 0.00 | 0.00 |
| 60 | 063031P120 | 0.50 | 2.50 | 0.00 | 0.00 |
| 61 | 063031P121 | 0.50 | 3.50 | 0.00 | 0.00 |
| 62 | 063031P124 | 3.00 | 3.00 | 0.50 | 2.90 |
| 63 | 063031P125 | 0.50 | 3.50 | 0.80 | 3.00 |
| 64 | 063031P128 | 3.00 | 4.00 | 0.50 | 3.00 |
| 65 | 063031P129 | 2.50 | 4.00 | 0.00 | 0.00 |
| 66 | 063031P130 | 1.50 | 7.00 | 0.00 | 0.00 |
| 67 | 063031P131 | 2.00 | 4.00 | 0.00 | 0.00 |
| 68 | 063031P133 | 0.40 | 6.00 | 0.00 | 0.00 |

| Progressivo indagine | Codice indagine HVSR | Frequenza del picco più evidente (F0) | Ampiezza della curva HV (A0) | Frequenza rappresentativa in Hz (Fr) | Ampiezza della curva HV (Ar) |
|---|---|---|---|---|---|
| 69 | 063031P134 | 0.40 | 5.00 | 0.00 | 0.00 |
| 70 | 063031P135 | 0.50 | 4.00 | 0.00 | 0.00 |
| 71 | 063031P136 | 4.50 | 5.50 | 0.00 | 0.00 |
| 72 | 063031P137 | 0.40 | 3.00 | 11.00 | 3.00 |
| 73 | 063031P138 | 0.80 | 3.50 | 0.00 | 0.00 |
| 74 | 063031P140 | 0.90 | 4.00 | 0.00 | 0.00 |
| 75 | 063031P141 | 0.50 | 5.50 | 12.00 | 3.50 |
| 76 | 063031P142 | 0.50 | 3.00 | 6.50 | 2.30 |
| 77 | 063031P143 | 0.40 | 2.50 | 0.00 | 0.00 |
| 78 | 063031P144 | 0.50 | 3.00 | 0.00 | 0.00 |
| 79 | 063031P145 | 0.50 | 5.00 | 4.00 | 2.50 |
| 80 | 063031P146 | 0.50 | 3.00 | 0.30 | 2.80 |
| 81 | 063031P147 | 0.50 | 5.00 | 5.00 | 3.20 |
| 82 | 063031P148 | 7.70 | 3.00 | 4.50 | 2.50 |
| 83 | 063031P149 | 0.40 | 2.00 | 0.00 | 0.00 |
| 84 | 063031P150 | 6.00 | 4.00 | 0.40 | 2.90 |
| 85 | 063031P151 | 0.40 | 4.00 | 0.00 | 0.00 |
| 86 | 063031P153 | 0.40 | 5.00 | 0.00 | 0.00 |
| 87 | 063031P154 | 0.50 | 4.50 | 9.00 | 2.20 |
| 88 | 063031P155 | 0.80 | 4.00 | 2.50 | 2.60 |
| 89 | 063031P156 | 0.90 | 3.50 | 0.60 | 3.00 |
| 90 | 063031P157 | 8.00 | 2.50 | 0.30 | 3.00 |
| 91 | 063031P159 | 0.70 | 2.50 | 0.00 | 0.00 |
| 92 | 063031P160 | 0.50 | 3.00 | 3.00 | 3.00 |
| 93 | 063031P161 | 1.70 | 2.50 | 0.00 | 0.00 |
| 94 | 063031P162 | 1.20 | 6.00 | 0.00 | 0.00 |
| 95 | 063031P164 | 3.50 | 3.00 | 0.00 | 0.00 |
| 96 | 063031P165 | 9.00 | 3.50 | 0.40 | 2.00 |
| 97 | 063031P166 | 3.00 | 3.50 | 0.00 | 0.00 |
| 98 | 063031P167 | 6.70 | 4.00 | 0.00 | 0.00 |
| 99 | 063031P168 | 9.00 | 3.00 | 0.40 | 2.50 |
| 100 | 063031P171 | 1.65 | 3.20 | 0.00 | 0.00 |
| 101 | 063031P172 | 1.69 | 3.60 | 0.00 | 0.00 |
| 102 | 063031P173 | 1.85 | 2.30 | 0.00 | 2.80 |
| 103 | 063031P174 | 2.13 | 4.00 | 0.00 | 3.00 |
| 104 | 063031P175 | 0.00 | 5.30 | 0.00 | 0.00 |
| 105 | 063031P176 | 0.00 | 5.20 | 0.00 | 0.00 |
| 106 | 063031P177 | 0.00 | 2.80 | 0.00 | 0.00 |
| 107 | 063031P178 | 0.00 | 2.90 | 0.00 | 0.00 |
| 108 | 063031P179 | 9.27 | 3.70 | 0.00 | 0.00 |
| 109 | 063031P180 | 10.20 | 3.60 | 4.90 | 3.20 |
| 110 | 063031P181 | 0.00 | 4.40 | 0.00 | 0.00 |
| 111 | 063031P182 | 0.00 | 3.40 | 0.00 | 0.00 |
| 112 | 063031P183 | 0.00 | 2.70 | 0.00 | 0.00 |
| 113 | 063031P184 | 0.00 | 2.90 | 0.00 | 0.00 |
| 114 | 063031P185 | 18.40 | 2.00 | 0.00 | 3.40 |
| 115 | 063031P186 | 0.00 | 3.60 | 0.00 | 0.00 |
| 116 | 063031P187 | 0.00 | 4.30 | 0.00 | 0.00 |
| 117 | 063031P188 | 0.00 | 5.00 | 0.00 | 0.00 |
| 118 | 063031P189 | 0.00 | 5.40 | 0.00 | 0.00 |
| 119 | 063031P190 | 0.00 | 4.80 | 0.00 | 0.00 |
| 120 | 063031P191 | 5.40 | 5.20 | 0.00 | 3.00 |
| 121 | 063031P192 | 3.60 | 3.00 | 0.00 | 2.50 |
| 122 | 063031P193 | 0.00 | 4.70 | 0.00 | 0.00 |
| 123 | 063031P194 | 3.50 | 4.90 | 0.00 | 0.00 |
| 124 | 063031P195 | 14.60 | 1.90 | 0.00 | 4.50 |

## 8.3 Carta Geologico Tecnica per la MS (CGT_MS)

Per ottenere una Carta Geologico-Tecnica di dettaglio, adeguata allo studio di MS di livello 3, sulla base della Carta Geologica dell'Isola d'Ischia del Carg (Sbrana et al.) al 10.000, è stato realizzato un rilevamento geologico e geomorfologico di parte delle aree del territorio comunale, accompagnato dall'analisi delle fotografie aeree, delle immagini da satellite e del DTM fornito dal Cento MS. Il DTM, sulla base delle indicazioni fornite anche dal gruppo di lavoro del centro MS, è stato utilizzato per derivare anche delle carte di pendenza che hanno permesso di evidenziare le forme morfologiche, in particolar modo scarpate morfologiche e linee di cresta, che possono generare fenomeni di amplificazione.
Innanzitutto sono stati individuati litotipi del substrato e delle coperture.
Si deve tener presente che i terreni affioranti sono tutti attribuibili al Quaternario (le rocce laviche più antiche affioranti ad Ischia – scorie saldate di Punta della Signora – sono datate 147.000 yrs. B.P.), pertanto la differenza tra terreni di copertura e substrati geologici si è basata su criteri litostratigrafici ed analizzando i rapporti strutturali e gli ambienti di sedimentazione.
I terreni di copertura sono stati inoltre classificati valutandone in maniera speditiva la granulometria, lo stato di addensamento o la consistenza. I dati di terreno e quelli ottenuti con l'interpretazione delle immagini sono stati quindi confrontati ed integrati in ambiente GIS con i dati delle indagini già disponibili e con i risultati degli studi geofisici appositamente condotti, ottenendo una valutazione degli spessori delle coperture, anche in assenza di dati di affioramento o di sondaggio.
Come già ampiamente descritto nel Capitolo 3.3 sono stati individuati i seguenti Terreni di Copertura (immagine tratta dalla legenda della Carta Geologico – Tecnica):

*Figura 165 - Terreni di copertura inseriti nella Carta Geologico - Tecnica.nche capitolo 3.3).*

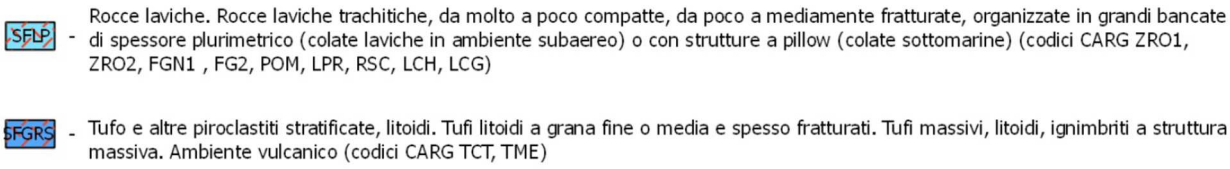



*Figura 166 - Substrati Geologici inseriti nella Carta Geologico – Tecnica.*

Tra i substrati (SFGRS) sono stati cartografati anche tutti gli olistoliti tufacei affioranti individuati da Sbrana all'interno dei depositi di debris.

Forme di superficie e sepolte

Sono state rilevate e segnalate, soprattutto con l'ausilio del DTM e della carta delle pendenze le seguenti forme:

- Conoidi alluvionali;
- Falde detritiche;
- Aree con cavità sepolte;
- Orlo di scarpata morfologica naturale o artificiale (10-20 m);
- Orlo di scarpata morfologica naturale o artificiale (>-20 m);
- Cresta;
- Asse di valle sepolta (C>0.25);
- Picco isolato;
- Cavità sepolta isolata.

Rivestono una significativa importanza ai fini dell'individuazione di amplificazioni sismiche gli orli di scarpata ed i picchi isolati.

L'asse di valle sepolta si individua in loc. Baiola, ed è stata definita dall'assenza del complesso del tufo di citara in alcuni dati geologici bibliografici (vedi anche il capitolo 5.2 relativo alla descrizione delle sezioni geologico-tecniche).

Le cavità sono state derivate dalla Carta Geologica di Sbrana e si individuano nei complessi piroclastici/lavici di Campotese.

Elementi tettonico strutturali

Sono stati riportati tutti i lineamenti tettonici evidenziati da bibliografia (vedi capitolo 3.4).

Sono state cartografate le seguenti faglie:

- faglia diretta potenzialmente attiva e capace (certa);
- faglia diretta potenzialmente attiva e capace (incerta);
- faglia con cinematismo non definito potenzialmente attiva e capace (certa);
- faglia con cinematismo non definito potenzialmente attiva e capace (incerta).

Non avendo reperito studi specifici sullo stato di attività delle faglie individuate e cartografate è stato scelto di classificarle tutte come potenzialmente attive e capaci.

È stato possibile evidenziare un sistema ad horst e graben lungo la direzione Nord-Sud, con gli alti di Zaro a nord e Campotese a sud e con il piccolo horst di Pietre Rosse, mentre andando da est verso ovest si notano faglie che ribassano verso il Mar Tirreno e che determino una condizione di instabilità per il versante ovest dell'Epomeo.

Elementi geologici e idrogeologici

Gli elementi geologici rappresentati sono costituiti dalle giaciture di strato, relative a dati bibliografici ed a misure fatte sullo Zaro. Inoltre son o stati riportati i sondaggi geognostici suddividendoli sulla base del raggiungimento del substrato geologico. Dalla tavola si vede

chiaramente che sono solo 4 i dati bibliografici che intercettano i substrati tufacei, concentrati nella parte meridionale del territorio comunale tra Citara e l'Epomeo.

Instabilità di versante

In questo tematismo sono state riportate le perimetrazione del PSAI vigente (Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico dei territori dell'ex Autorità di Bacino Campania Centrale, aggiornato nel 2015, adottato con delibera di Comitato Istituzionale n. 1 del 23 febbraio 2015, B.U.R.C. n.20 del 23/03/2015; Attestato, del Consiglio Regionale n° 437/2 del 10/02/2016, di approvazione della D.G.R.C. n.° 466 del 21/10/2015 - BURC n.14 del 29/02/2016) e le perimetrazioni riportate nel progetto IFFI, con le relative modifiche effettuate come descritto nel paragrafo 7.2.3
La legenda della Carta Tematica permette di riassumere le tipologie di frana perimetrate:

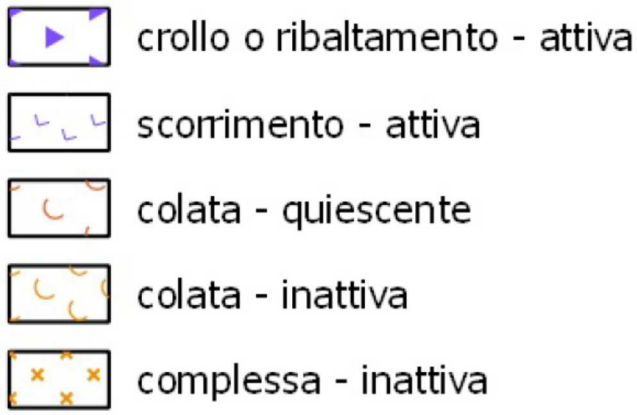



*Figura 167 - Tipologie di frana riportate nella Carta Geologico – Tecnica.*

## 8.4 Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)

In base allo studio della carta geologico-tecnica e a tutti i dati a disposizione sono state individuate 12 zone omogenee per caratteristiche litostratigrafiche e sismiche, le cui caratteristiche sono riepilogate nella seguente tabella.
Tutte le informazioni disponibili in merito ai parametri geotecnici e geofisici dei vari complessi descritti sono archiviate nel database CdI_Tabelle nella cartella Forio_41/Indagini.

*Tabella 75 – Riepilogo delle caratteristiche delle MOPS individuate (*TC: terreno di copertura; SG: substrato geologico; SS: substrato sismico.*

| | Spessore min | Spessore max | Unità geo-tecnica | LOG* | Vs media | Vs min | Vs max |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MOPS 2001 | 15 | 20 | SM lh | TC | 284 | 240 | 400 |
| | 20 | 35 | GM cd | TC | 320 | 170 | 500 |
| | – | 30 | SM sp | TC | 530 | 420 | 620 |
| | – | 30 | SFGRS-1 (TC allentati) | SG | 456 | 450 | 500 |
| | – | 50 | SFGRS-2 (TVME allentato) | SG | 550 | 500 | 600 |
| | – | – | SFGRS | SS | 950 | 900 | 1000 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MOPS 2002 | 15 | 30 | SM lh | TC | 284 | 128 | 390 |
| | 20 | 35 | GM cd | TC | 320 | 170 | 500 |
| | – | 30 | SM sp | TC | 530 | 453 | 570 |
| | – | 30 | SFGRS-1 (TC allentati) | SG | 456 | 450 | 500 |
| | – | 50 | SFGRS-2 (TVME allentato) | SG | 550 | 500 | 600 |
| | – | – | SFGRS | SS | 950 | 900 | 1000 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MOPS 2003 | 5 | 10 | SM sp | TC | 193 | 175 | 220 |
| | – | 20 | SM lh | TC | 275 | 240 | 400 |
| | 15 | 40 | GM cd | TC | 480 | 423 | 538 |
| | – | 30 | SM sp | TC | 530 | 423 | 653 |
| | – | 35 | SFGRS-1 (TC allentati) | SG | 456 | 450 | 500 |
| | – | 50 | SFGRS-2 (TVME allentato) | SG | 550 | 500 | 600 |
| | – | – | SFGRS | SS | 950 | 900 | 1000 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MOPS 2004 | 20 | 50 | GM cd | TC | 320 | 170 | 500 |
| | – | 40 | SM sp | TC | 530 | 453 | 570 |
| | – | 35 | SFGRS-1 (TC allentati) | SG | 456 | 456 | 653 |
| | – | 50 | SFGRS-2 (TVME allentato) | SG | 550 | 550 | 653 |
| | – | – | SFGRS | SS | 950 | 900 | 1000 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MOPS 2005 | – | 10 | ML ec | TC | 189 | 180 | 250 |
| | 20 | 50 | GM cd | TC | 400 | 240 | 520 |
| | | 30 | SM sp | TC | 450 | 420 | 620 |
| | – | 25 | SFGRS-1 (TC allentati) | SG | 456 | 456 | 653 |
| | – | 70 | SFGRS-2 (TVME allentato) | SG | 550 | 550 | 653 |
| | – | – | SFGRS | SS | 950 | 900 | 1000 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MOPS 2006 | – | 10 | ML ec | TC | 189 | 180 | 250 |
| | 20 | 50 | GM cd | TC | 400 | 240 | 520 |
| | – | 25 | SFGRS-1 (TC allentati) | SG | 456 | 456 | 653 |
| | – | 70 | SFGRS-2 (TVME allentato) | SG | 550 | 550 | 653 |
| | – | – | SFGRS | SS | 950 | 900 | 1000 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MOPS 2007 | 5 | 15 | GM sc | TC | 236 | 210 | 260 |
| | – | 35 | GW sc | TC | 380 | 260 | 430 |
| | – | 20 | SFGRS-1 (TC allentati) | SG | 770 | 767 | 900 |
| | – | 20 | SFGRS-2 (TVME allentato) | SG | 770 | 767 | 900 |
| | – | – | SFLP | SS | 1900 | 1900 | 1900 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MOPS 2008 | – | 10 | ML ec | TC | 189 | 180 | 250 |
| | – | 50 | GW sc | TC | 380 | 320 | 430 |
| | – | – | SFLP | SS | 1100 | 800 | 1900 |
| MOPS 2009 | – | 5 | SM fd | TC | 189 | 180 | 250 |
| | 3 | 15 | GM tm | TC | 400 | 240 | 520 |
| | 25 | 35 | GM cd | TC | 320 | 170 | 500 |
| | – | 25 | SFGRS-1 (TC allentati) | SG | 456 | 456 | 653 |
| | – | 70 | SFGRS-2 (TVME allentato) | SG | 550 | 550 | 653 |
| | – | – | SFGRS | SS | 950 | 900 | 1000 |
| MOPS 2010 | 5 | 10 | SM sc | TC | 220 | 180 | 260 |
| | – | 10 | GM sc | TC | 236 | 210 | 260 |
| | – | 30 | GW sc | TC | 380 | 260 | 430 |
| | – | 25 | SFGRS-1 (TC allentati) | SG | 770 | 767 | 900 |
| | – | 35 | SFGRS-2 (TVME allentato) | SG | 770 | 767 | 900 |
| | – | – | SFLP | SS | 1900 | 1900 | 1900 |
| MOPS 22099 | 5 | 25 | SFGRS-1 (TC allentati) | SG | 456 | 456 | 653 |
| | – | 70 | SFGRS-2 (TVME allentato) | SG | 550 | 550 | 653 |
| | – | 300 | SFGRS | SS | 950 | 900 | 1000 |
| MOPS 2099 | – | – | SFLP | SG | 370 | 350 | 400 |
| | – | – | SFLP | SS | 950 | 900 | 1000 |

Di seguito si riportano le descrizioni dettagliate di ogni singola zona individuata nella Carta delle MOPS allegata al presente studio.

- **ZONE STABILI:** non sono state cartografate zone stabili poiché sul territorio sono state individuate solo zone stabili suscettibili di amplificazioni locali.

- **ZONE STABILI SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI:**

**MOPS 2001:**

2001

Questa zona è ubicata nella porzione centro-settentrionale del comprensorio comunale indagato. Corrisponde all'area del lahar di San Francesco caratterizzata dalla presenza di depositi sabbiosi addensati al top con uno spessore non superiore ai 20 metri, seguiti dai depositi grossolani di debris con spessori compresi tra 25 e 40 metri. Al letto si individuano i livelli sabbiosi marini rinvenibili nel sottosuolo di Forio con spessori massimi pari a 40 metri. La successione è chiusa dai tufi di Citara/Tufo verde del Monte Epomeo con spessori superiori ai 300 metri. Sono possibili fenomeni di amplificazione locale dovuta alle caratteristiche litostratigrafiche dell'area.

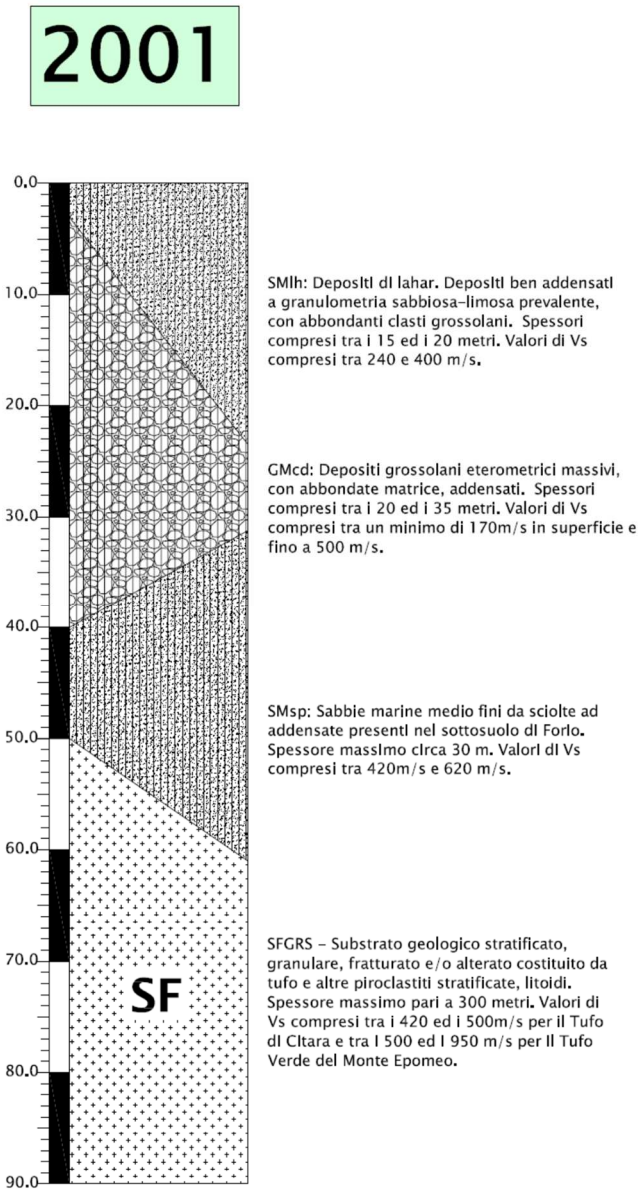



*Figura 168 - Colonna stratigrafica con schemi dei rapporti litostratigrafici MOPS 2001.*

**MOPS 2002:**

2002

Questa zona è ubicata nella parte orientale del comprensorio di Forio, in prossimità del centro urbano di Forio. La stessa corrisponde al lahar di Forio ed è caratterizzata dalla presenza dei depositi sabbiosi addensati al top con uno spessore non superiore ai 30 metri, seguiti da depositi grossolani di debris con spessori compresi tra 20 e 35 metri. Al letto, a luoghi, si individuano i livelli sabbiosi marini rinvenibili nel sottosuolo di Forio con spessori massimi pari a 40 metri. La successione è chiusa dai tufi di Citara/Tufo verde del Monte Epomeo con spessori non superiori ai 300 metri. Sono possibili fenomeni di amplificazione locale dovuta alle caratteristiche litostratigrafiche e topografiche dell'area (presenza di orli di terrazzi morfologici naturali ed aree perimetrate a pericolosità da frana/aree in frana).

2002

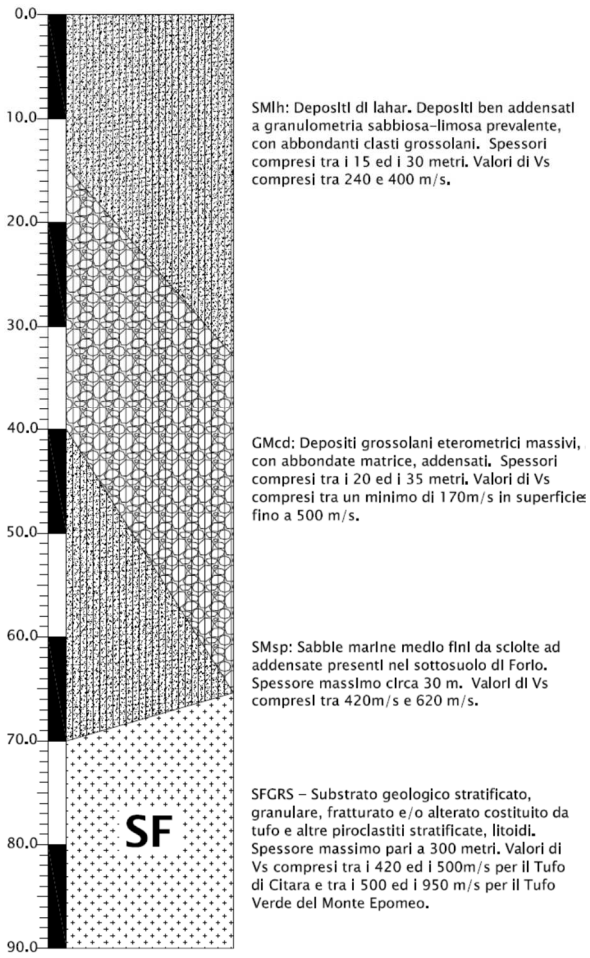



*Figura 169 - Colonna stratigrafica con schemi dei rapporti litostratigrafici MOPS 2002.*

**MOPS 2003:**

2003

Questa zona corrisponde alle fasce costiere/spiagge basse di San Francesco e di Citara. È caratterizzata dalla presenza al top di depositi e unità sabbiose

- Sabbie, sabbie limose e sabbie con ghiaia, sciolte o poco addensate, di ambiente marino costiero.
- Limi sabbiosi e sabbie limose sciolte di ambiente marino costiero/alluvionale con spessori compresi tra i 5 ed i 10 metri.

Al letto si individuano depositi di lahar, depositi di debris (seguiti dai livelli sabbiosi del sottosuolo di Forio) e il complesso dei Tufi di Citara. La successione è chiusa dal tufo verde del Monte Epomeo con spessori non superiori ai 300 metri. Sono possibili fenomeni di amplificazione locale dovuta alle caratteristiche litostratigrafiche dell'area. La spiaggia di Citara risulta suscettibile alla pericolosità da frana. La spiaggia di Montano, a nord dello Zaro, risulta caratterizzata instabilità potenziali per fenomeni di liquefazione.

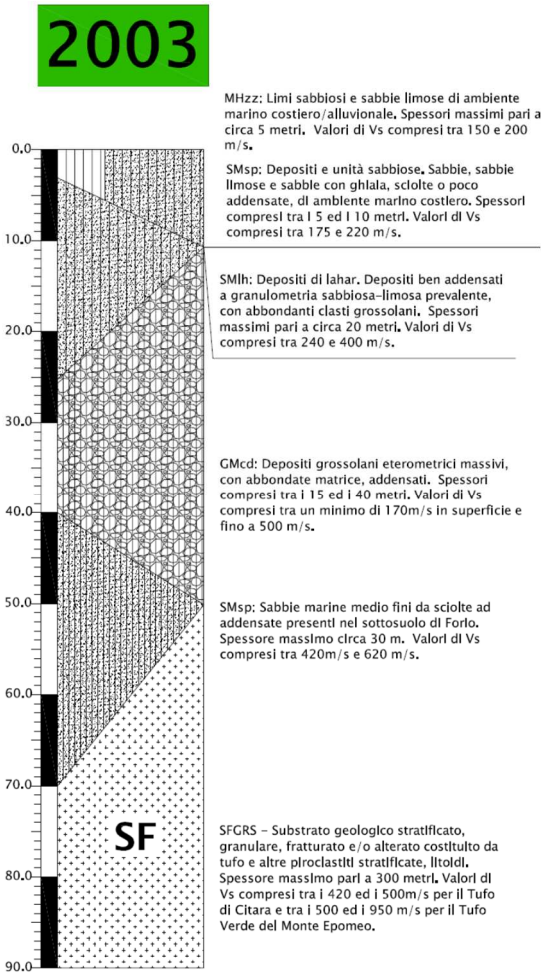



*Figura 170 - Colonna stratigrafica con schemi dei rapporti litostratigrafici MOPS 2003.*

**MOPS 2004**

2004

Questa zona si estende prevalentemente tra il promontorio di Zaro a nord, il Monte Epomeo ad est e termina con l'horst di Pietre Rosse a sud. La sua continuità è interrotta dalle MOPS 2001, 2002 3 2003. È caratterizzata dalla presenza di depositi grossolani eterometrici massivi, con abbondante matrice sabbiosa, addensati, con spessori massimi fino a 50 metri. La letto, a luoghi, si individuano i livelli sabbiosi marini rinvenibili nel sottosuolo di Forio con spessori massimi pari a 40 metri. La successione è chiusa dai tufi di Citara/Tufo verde del Monte Epomeo con spessori non superiori ai 300 metri. Sono possibili fenomeni di amplificazione locale dovuta alle caratteristiche litostratigrafiche e topografiche dell'area (in particolare si segnala la presenza della valle stretta di loc. Baiola e la presenza di strutture ad hummrock e falesie e paleofalesie, indicate come orli di scarpate morfologiche ed aree perimetrate a pericolosità da frana/aree in frana).

2004

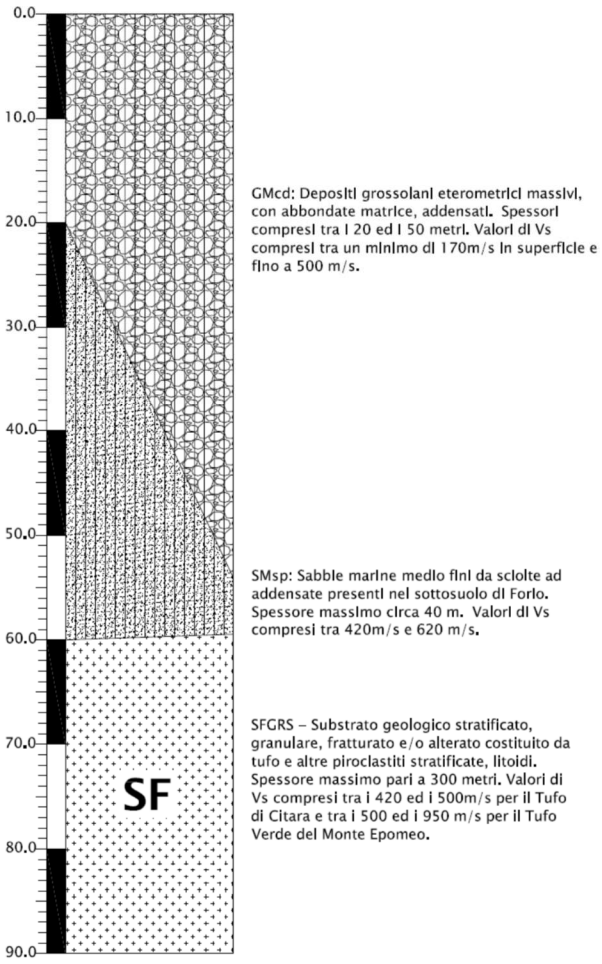



*Figura 171 - Colonna stratigrafica con schemi dei rapporti litostratigrafici MOPS 2004.*

**MOPS 2005:**

2005

Questa zona si estende tra gli horst di Pietre Rosse e di Campotese, nella porzione centro-meridionale del comune ed è caratterizzata dalla presenza di depositi grossolani eterometrici massivi, con abbondante matrice sabbiosa, addensati, con spessori massimi fino a 50 metri. Al top è presente localmente una copertura di limi sabbiosi e argillosi colluviali poco consolidati, a luoghi pedogenizzati. La successione è chiusa dai tufi di Citara/Tufo verde del Monte Epomeo con spessori non superiori ai 300 metri. Sono possibili fenomeni di amplificazione locale dovuta alle caratteristiche litostratigrafiche e topografiche dell'area (creste, orli di scarpate morfologiche, conoidi alluvionali ed aree perimetrate a pericolosità da frana/aree in frana).

2005

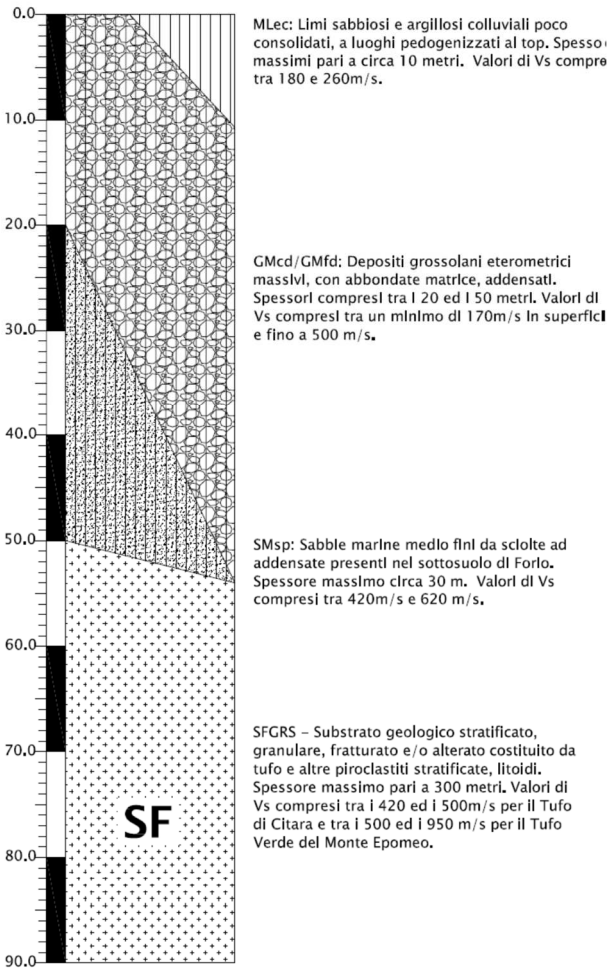



*Figura 172 - Colonna stratigrafica con schemi dei rapporti litostratigrafici MOPS 2005.*

**MOPS 2006:**

2006

Tale zona occupa la parte orientale del territorio comunale e si estende lungo il versante occidentale del Monte Epomeo. È caratterizzata dalla presenza di depositi grossolani eterometrici massivi, con abbondante matrice, addensati, con spessori massimi fino a 30 metri. Al top è presente localmente una copertura di limi sabbiosi e argillosi colluviali poco consolidati, a luoghi pedogenizzati. La successione è chiusa dai tufi di Citara/Tufo verde del Monte Epomeo con spessori non superiori ai 300 metri. Sono possibili fenomeni di amplificazione locale dovuta alle caratteristiche litostratigrafiche e topografiche dell'area (orli di scarpate morfologiche falde detritiche e soprattutto aree perimetrate a pericolosità da frana/aree in frana, in particolar modo l'area della DPGV di Monte Nuovo).

2006

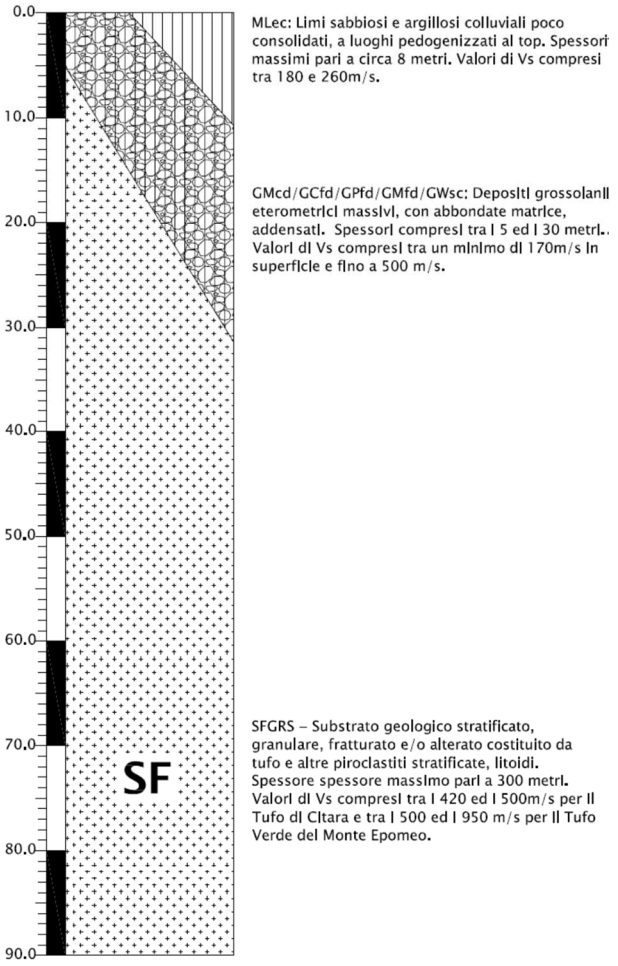



*Figura 173 - Colonna stratigrafica con schemi dei rapporti litostratigrafici MOPS 2006.*

**MOPS 2007:**

2007

Rappresenta la parte più estesa della porzione meridionale del territorio e corrisponde all'alto strutturale di Campotese. È caratterizzata dalla presenza di piroclastiti fittamente stratificate con alternanze di livelli di lapilli pomicei. Bombe e litici cineritici e depositi piroclastici sabbioso-limosi sciolti con livelli di ghiaia pomicea con spessori compresi tra i 5 e i 30 metri. Al top è presente localmente una copertura di limi sabbiosi e argillosi colluviali poco consolidati, a luoghi pedogenizzati. Al letto si individuano depositi di scorie e brecce saldati da massivi a grossolanamente stratificati. Spessori compresi tra i 10 e i 30 metri. La successione è chiusa dal substrato geologico lapideo fratturato e/o alterato costituito da rocce laviche. Spessori indeterminati. Sono possibili fenomeni di amplificazione locale dovuta alle caratteristiche litostratigrafiche e topografiche dell'area (creste, picchi isolati, orli di terrazzi morfologici, cavità ed aree perimetrate a pericolosità da frana/aree in frana).

2007

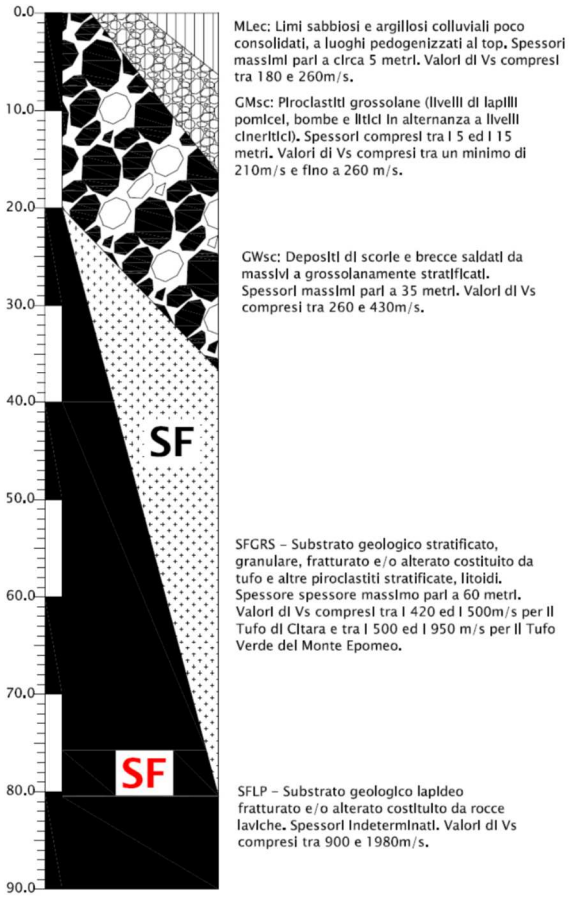



*Figura 174 - Colonna stratigrafica con schemi dei rapporti litostratigrafici MOPS 2007.*

**MOPS 2008:**

2008

La zona 2008 delimita i mahar di Campotese e Panza. È caratterizzata al top dalla presenza di limi sabbiosi e argillosi colluviali poco consolidati, a luoghi pedogenizzati con spessori massimi pari a circa 10 metri. Al letto si individuano o depositi di scorie e brecce saldate da massivi a grossolanamente stratificati con spessori massimi fino a 40 metri oppure il substrato geologico lapideo fratturato e/o alterato costituito da rocce laviche con spessori indeterminati. Sono possibili fenomeni di amplificazione locale dovuta alle caratteristiche litostratigrafiche dell'area.

2008

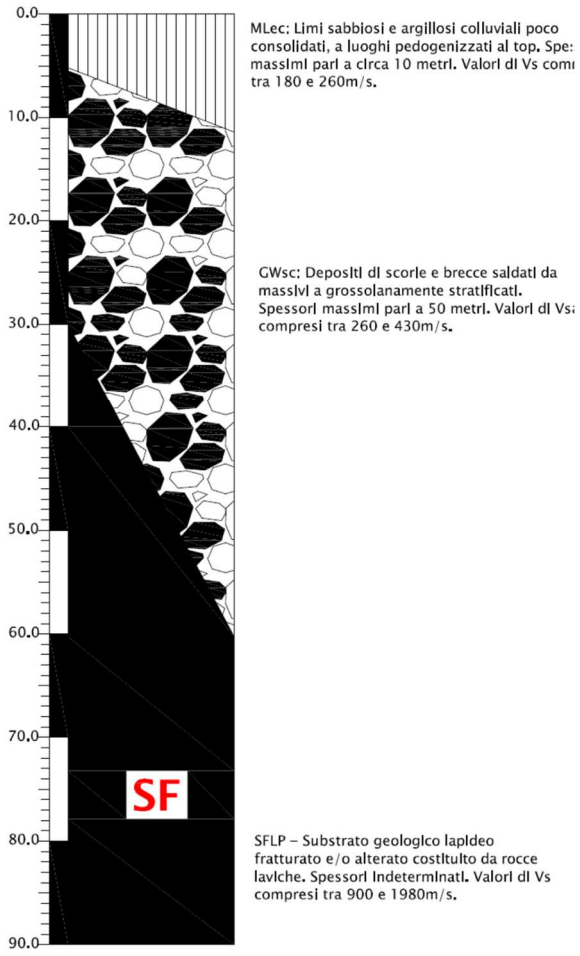



*Figura 175 - Colonna stratigrafica con schemi dei rapporti litostratigrafici MOPS 2008.*

**MOPS 2009:**

2009

Area di Mezzavia, definita sulla scorta dei dati forniti dal gruppo di lavoro del comune di Lacco Ameno, è caratterizzata dalla presenza al top di depositi costituiti da sabbie e argille sabbiose, terreni detritici caotici e depositi palustri intercalati a livelli piroclastici pomicei con spessori compresi tra i 5 e i 10 metri. Al letto si individuano depositi grossolani di debris con spessori di circa 35 metri, seguiti da depositi siltosi e argilloso-siltosi, fossiliferi, ad elevato stato di coesione e/o addensamento con spessore massimo di circa 20 metri. La successione è chiusa dal substrato geologico lapideo fratturato e/o alterato da rocce laviche con spessori indeterminati. Sono possibili fenomeni di amplificazione locale dovuta alle caratteristiche litostratigrafiche e topografiche dell'area (aree perimetrate a pericolosità da frana/aree in frana).

2009

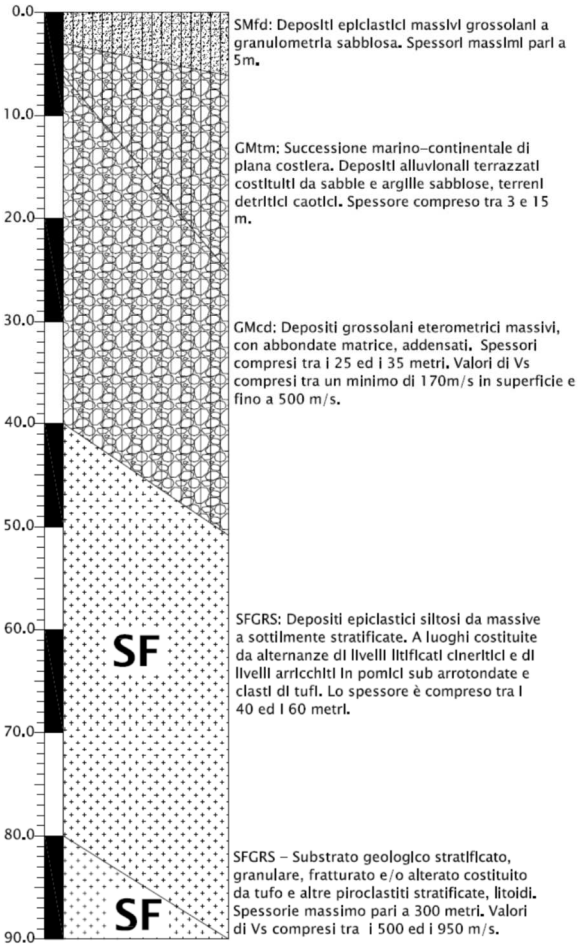



*Figura 176 - Colonna stratigrafica con schemi dei rapporti litostratigrafici MOPS 2009.*

**MOPS 2010:**

2010

Area caratterizzata dalla presenza di piroclastiti sciolte (cineriti stratificate) a grossolane (piroclastiti dell'anello di Panza) con spessori compresi tra i 2 e i 30/40 metri. Al top è possibile individuare anche terreni di riporto e/o limi sabbiosi e argillosi colluviali poco consolidati, a luoghi pedogenizzati. Al letto si individuano livelli di lapilli pomicei, bombe e litici con livelli cineritici e depositi piroclastici sabbioso-limosi sciolti con livelli di ghiaia pomicea con spessori compresi tra i 10 e i 30 metri. La successione è chiusa dal substrato geologico lapideo fratturato e/o alterato costituito da rocce laviche. Spessori indeterminati. Sono possibili fenomeni di amplificazione locale dovuta alle caratteristiche litostratigrafiche e topografiche dell'area (aree perimetrate a pericolosità da frana/aree in frana).

2010

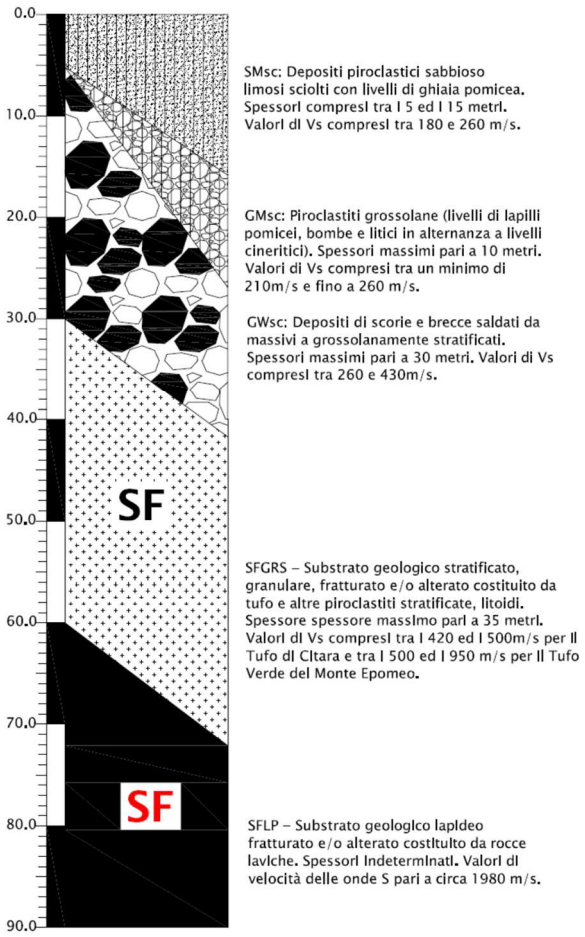



*Figura 177 - Colonna stratigrafica con schemi dei rapporti litostratigrafici MOPS 2010.*

**MOPS 2009:**

Area caratterizzata da substrato geologico(lavico o tufaceo) affiorante. Il substrato risulta fratturato e/o alterato al top. Gli spessori risultano indefiniti. Sono possibili fenomeni di amplificazione locale dovuta alle caratteristiche litostratigrafiche e topografiche dell'area (creste, , orli di terrazzi morfologici, cavità ed aree perimetrate a pericolosità da frana/aree in frana).

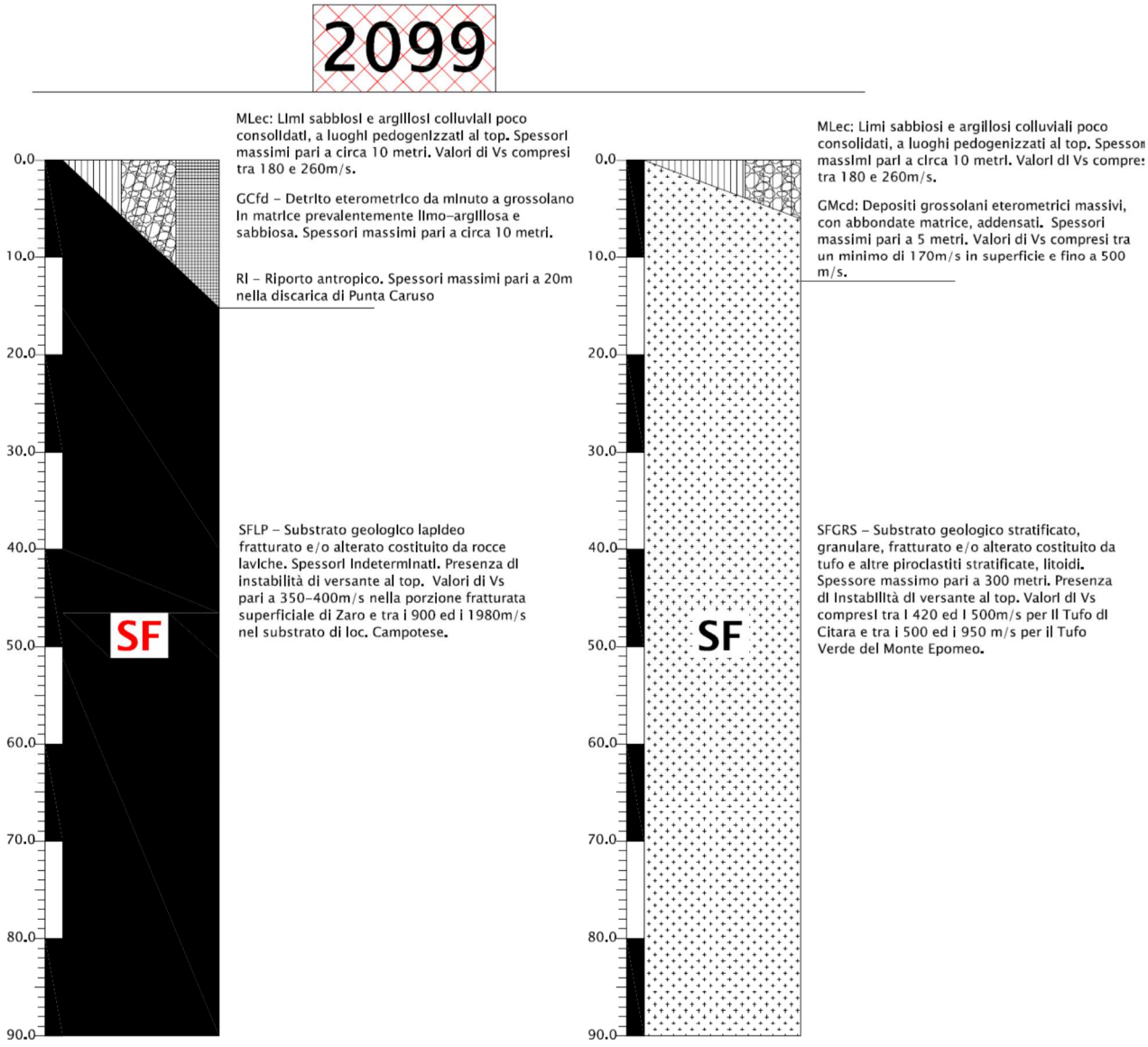



*Figura 178 - Colonne stratigrafiche con schemi dei rapporti litostratigrafici MOPS 2099.*

## 8.5 Carte di Microzonazione Sismica (MS) di III livello

Sono state prodotte ed allegate alla presente relazione illustrativa, n. 6 tavole in scala 1: 5.000, redatte secondo gli Standard ed i Protocolli di riferimento, in funzione dei valori dei Fattori di Amplificazione calcolati per i tre differenti periodi di interesse (0.1-0.5s, 0.4-0.8s, 0.7-1.1s), con le modalità descritte in precedenza. Dunque ad ogni Microzona individuata è stato assegnato un differente valore di FA per ognuna delle cartografie. Il valore di FA assegnato è relativo al confronto tra la modellazione monodimensionale e bidimensionale, da cui è stata scelta la terna di valori con l'FA massimo per il periodo 0.1-0.5s (considerato di maggior interesse ingegneristico per il territorio comunale di Forio).

1. La tavola relativa al periodo 0.1-0.5s mostra fattori valori di FA particolarmente elevati per le MOPS 2007 (mediamente pari a 2.03) e 2010 (1.99), mentre i valori più bassi sono attribuibili alle MOPS 2006 con valori pari a 1.32 e 2002 (1.39).
2. La tavola relativa al periodo 0.4-0.8s restituisce valori molto elevati di FA per la MOPS 2010 (2.69), e la MOPS 2007 (2.54). I fattori di amplificazione più bassi si riscontrano per le MOPS 2004 (1.48) e 2006 (1.50);
3. Nella tavola relativa al periodo 0.7-1.1s i valori più elevati di FA sono attribuiti alle MOPS 2010 (2.85), 2007 (2.47) e 2008 (2.39), ed i valori di FA più bassi si individuano per le MOPS 2006 (1.38) e 2004 (1.53).

Si riscontra facilmente che i valori più elevati di FA sono sempre attribuibili alle MOPS 2007, 2010 e 2008 (Area di Campotese - Panza), verosimilmente a causa dell'elevato contrasto di impedenza tra il substrato sismico lavico ed i terreni di copertura particolari.

Per la prospezione sismica down-hole in foro e per gli array sismici bidimensionali, è stato effettuato il calcolo delle Vs medie ai sensi del D.M. 17 gennaio 2018.

Il calcolo della media pesata ha fornito risultati che collocano i terreni oggetto d'indagine nelle categorie **B** e **C** del D.M. 17 gennaio 2018.

Questa categoria è stata ricavata, come da normativa, dalla relazione:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^{N} \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

dove $h_i$ e $V_i$ indicano lo spessore in metri e la velocità delle onde di taglio (per deformazioni di taglio $\gamma<10^{-6}$) dello strato i-esimo per un totale di N strati presenti fino ad individuare il bedrock sismico o qualora non individuato nei primi 30 metri di profondità al di sotto del piano fondale.

Risulta doveroso, a tal proposito, evidenziare che la valutazione della $Vs_{eq}$ calcolata è da ritenersi puntuale e valida soltanto per il punto oggetto d'indagine e non può essere estesa a tutta le MOPS in cui la prospezione ricade.

*Tabella 76 - Categorie Suoli di Fondazione (D.M. 17 gennaio 2018).*

## Categorie di sottosuolo

Decreto del 17 gennaio 2018 - Norme Tecniche per le Costruzioni

**Categoria A**
Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da **valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s**, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.

**Categoria B**
Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da **valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s**.

**Categoria C**
Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da **valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s**.

**Categoria D**
Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da **valori di velocità equivalente compresi tra 100 m/s e 180 m/s**.

**Categoria E**
Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30m.

*Tabella 77 - Categorie Suolo di fondazione ottenuta dalla prospezione sismica Down-hole ed array bidimensionali.*

| Prospezione sismica | $V_{s\,e\text{-}q}$ (m/s) | Categoria Suoli di Fondazione (D.M. 17/01/2018) |
|---|---|---|
| P169 | [318] | C |
| P198 | [357] | C |
| P199 | [391] | B |
| P200 | [345] | C |

## 8.6 Commenti finali e criticità

Lo studio di III terzo livello di Microzonazione Sismica per il territorio comunale di Forio è stato condotto con acribia sulla scorta di un continuo scambio di informazioni, dati ed interpretazioni, con la struttura di supporto coordinata da CNR IGAG per il centro MS, attraverso differenti fasi operative che possono essere così riassunte:

- Analisi geologica, geomorfologica, litostratigrafica e geologico tecnica e strutturale del territorio comunale sulla base degli studi forniti dal Cento MS, della bibliografia recente, e di studi geologici redatti per lavori pubblici e privati;
- Definizione di un accurato piano di indagini sia geognostiche che soprattutto geofisiche finalizzate a quantificare la risposta sismica locale in maniera omogenea per il territorio oggetto di studio, che ha integrato la campagna geofisica pregressa;
- Esecuzione delle indagini in situ, elaborazione dei dati ottenuti in cantiere con definizione del modello di sottosuolo e successiva redazione della Carta delle Indagini, della Carta delle Frequenze, della Carta Geologico Tecnica e della Carta delle MOPS;
- Elaborazione del Modello di sottosuolo definitivo;
- Elaborazione di simulazioni numeriche monodimensionali e bidimensionali (a cura del centro MS);
- Definizione della Modellazione sismica di III Livello per l'area di studio;
- Redazione delle tavole conclusive e della presente relazione illustrativa.

L'analisi effettuata ha permesso di suddividere il territorio d'interesse in n° 12 Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica, per le quali sono stati definiti sufficientemente i modelli geologici e sismici, sia delle coperture sia del substrato geologico.

Alle Microzone inserite nell'areale di Microzonazione Sismica di III Livello sono stati attribuiti i rispettivi fattori di amplificazione del moto sismico. Tutto lo studio di Livello 3, pertanto, ha avuto il fine di quantificare l'amplificazione sismica delle microzone ed è stato svolto rispettando quanto indicato dal disciplinare d'incarico utilizzando tutte le informazioni e le conoscenze disponibili derivanti dalle indagini pregresse e quelle svolte.

Le indagini effettuate hanno purtroppo confermato la difficoltà iniziale riscontrata nell'individuazione del bedrock sismico, presente ad elevate profondità in particolar modo nella porzione centrale del territorio comunale di Forio. Difatti, pur avendo spinto il sondaggio geognostico a profondità significative (60m), lo stesso si è attestato nei depositi sabbiosi del sottosuolo di Forio. Le ulteriori indagini hvsr eseguite hanno confermato i trend di valori di frequenza molto bassi, inferiori all'unità. Questa situazione, connesso a risultati delle prospezioni sismiche masw in cui si osservava la dispersione dell'onda di Rayleigh che mediamente raggiungeva i 10-12 Hz, non ha consentito di poter eseguire inversioni congiunti affidabili, tranne che per le aree di Zaro e Campotese, dove si registrano picchi superiori all'unità.

I valori di Vs misurati mostrano una generale presenza di termini sciolti con valori medi già a basse profondità (circa 10m); tali valori sono correlabili con i dati geotecnici reperiti che mostrano chiaramente elevati valori dei parametri geomeccanici.
Le condizioni topografiche e morfologiche sono state adeguatamente evidenziate nei vari elaborati e risulta molto elevata la predisposizione di buona parte del territorio alle amplificazioni ed agli effetti cosismici (instabilità di versanti).

In dettaglio, il presente studio di MS3 ha evidenziato una significativa predisposizione ad effetti di amplificazione sismica in alcune aree del territorio comunale. Dalle tre Carte di Microzonazione Sismica di Terzo Livello redatte si riscontra per le frazioni di Forio e Panza una situazione abbastanza diversificata. Infatti i valori più elevati di FA (per tutti e tre i differenti periodi di interesse calcolati) sono sempre attribuibili alle MOPS 2008, 2010 e 2008 relative all'area di Campotese - Panza, verosimilmente a causa delle particolari condizioni di amplificazioni dovute al contatto stratigrafico tra il bedrock sismico lavico particolarmente veloce ed i terreni di copertura geostrutturali che la caratterizzano.
Valori più bassi di FA sono attribuibili, invece, alle MOPS dell'area di Forio.
Di seguito si ripropongono la tabella ed una figura di sintesi dei fattori di amplificazione FA individuati per ciascuna zona cartografata.

*Tabella 78 – Tabella di sintesi dei fattori di FA per ogni Microzona.*

| | FA 0,1÷0,5 | FA 0,4÷0,8 | FA 0,7÷1,1 |
|---|---|---|---|
| Zona 2002 | 1.39 | 1.90 | 2.01 |
| Zona 2003 | 1.75 | 1.91 | 1.86 |
| Zona 2004 | 1.43 | 1.48 | 1.53 |
| Zona 2005 | 1.57 | 1.77 | 1.94 |
| Zona 2006 | 1.32 | 1.50 | 1.38 |
| Zona 2007 | 2.03 | 2.54 | 2.47 |
| Zona 2008 | 1.47 | 1.89 | 2.39 |
| Zona 2010 | 1.99 | 2.69 | 2.85 |

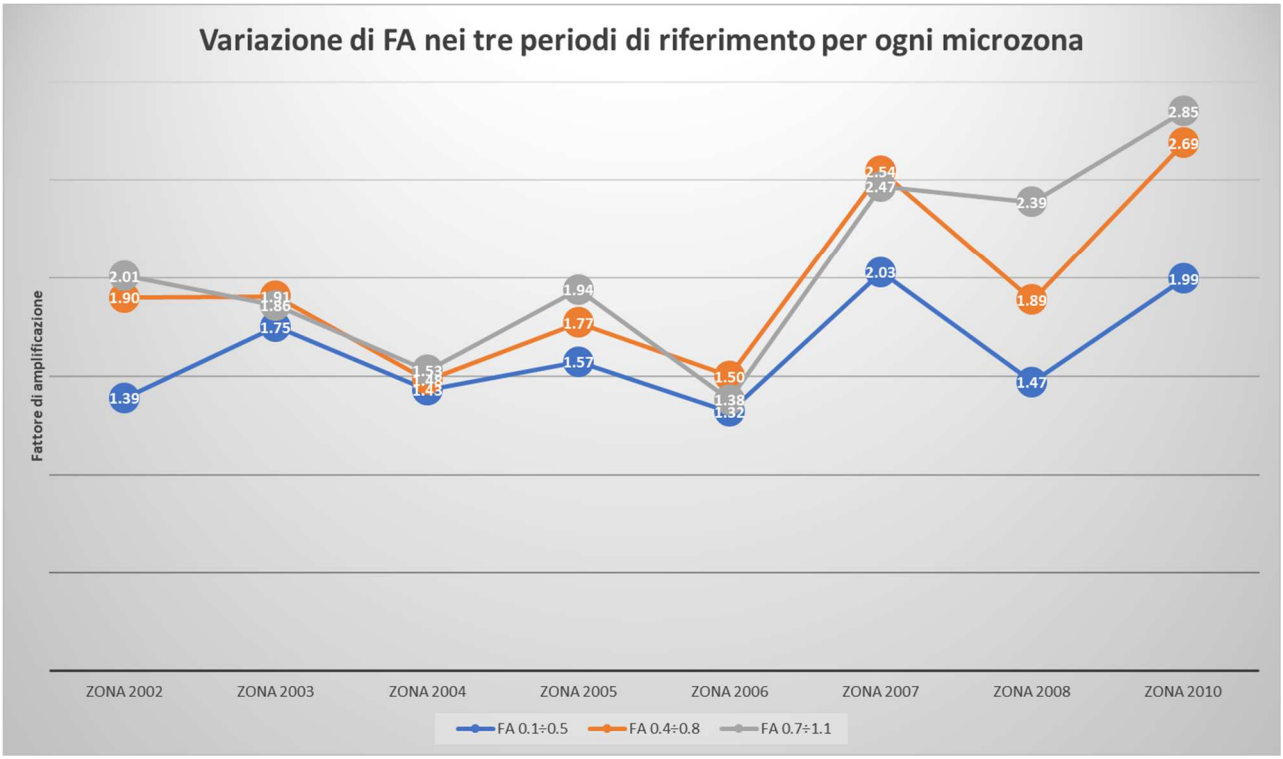



*Figura 179 - Variazione di FA nei tre periodi di riferimento per ogni Microzona.*

Circa le criticità relative alle indagini, si può notare un gran numero di prospezioni geofisiche realizzate e pregresse, mentre i sondaggi geognostici risultano in numero esiguo e andrebbero integrati.

Per le prospezioni sismiche down-hole in foro e per gli array sismici bidimensionali, è stato effettuato il calcolo delle Vs medie ai sensi del D.M. 17 gennaio 2018. Si sottolinea che la valutazione della $Vs_{eq}$ calcolata è da ritenersi puntuale e valida soltanto per il punto oggetto d'indagine e non può essere estesa a tutta le MOPS in cui la prospezione ricade.

Si tiene presente che in fase di progettazione di nuovi insediamenti e/o di verifica sismica di quelli esistenti è auspicabile effettuare analisi di Risposta Sismica Locale.

Si consiglia pertanto di verificare caso per caso la possibile insorgenza di fenomeni di amplificazione topografica soprattutto ove sono presenti situazioni morfologiche che si discostano in misura significativa rispetto al valore limite di acclività oppure dove si hanno condizioni morfologiche peculiari, tipo cresta, picco isolato, orli di scarpate etc.

# 9. Bibliografia

1. AA. VV. -INGV -Ricerca di risorse geotermiche finalizzata alla sperimentazione di un impianto pilota nel Comune di Serrara Fontana (ISOLA D'ISCHIA-NA), 2011.
2. AA.VV., Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche, Associazione Geotecnica Italiana (AGI) 1977.
3. Acocella, Funiciello, 1999, The interaction between regional and local tectonics during resurgent doming: the case of the island of Ischia, Italy. Journal of Volcanology and Geothermal Research. pp 109-123.
4. Alessio, G., Esposito, E., Ferranti, L., Mastrolorenzo, G., Porfido,S., 1996. Correlazione tra sismicità ed elementi strutturali nell'isola d'Ischia. II Quaternario 9, 303–308.
5. Baratta M. (1901). I terremoti d'Italia. Saggio di storia, geografia e bibliografia sismica italiana. (ristampa anastatica, Sala Bolognese 1979). Torino 1901.
6. Barra, D., Cinque, A., Italiano, A., Scorziello, R., 1992. II, Pleistocene superiore di Ischia: Paleoecologiae rapporti con l'evoluzione tettonica recente. Studi Geol. Camerti, Vol. Spec. 231–243.
7. Bazzurro P., Cornell C.A. (1999) Disaggregation of seismic hazard. Bulletin of the Seismological Society of America 89, 501–520.
8. Bonito, M., 1691. Terra tremante o vero continuatione dè terremoti dalla creatione del mondo fino al tempo presente, Napoli.
9. 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. Volcanol. 70(5), 583–603.
10. Capaldi, G., Civetta, L., Gasparini, P., 1976. Volcanic history of the Island of Ischia _South Italy.. Bull. Volcanol. 41, 11–22.
11. Carlino S., Cubellis E. Marturano A., 2008. Effetti del terremoto di Casamicciola del 1883 (isola d'Ischia): ruolo della geologia ed effetti di sito. Atti del 27°convegno nazionale GNGTS-2008.
12. 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.
13. 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, 39-51.
14. Cassignol C., Gillot P.Y. (1982). Range and effectiveness of unspiked potassium-argon dating: experimental groundwork and applications. In : G.S. Odin (Editor), Numerical Dating in Stratigraphy. Willey, Chichester, pp. 159-179.
15. Celico et ali, 1999. La complessità idrogeologica di un'area vulcanica attiva: l'isola di Ischia. Boll. Soc. geol., 188 (1999) 485-504;
16. Chiesa, S., Civetta, L., De Lucia, M., Orsi, G., Poli, S., 1987. Volcanological evolution of the island of Ischia. Rend. Acc. Sc. Fis. Mat. Napoli. Sp. Issue 69–83.

17. CNR-IGAG, CentroMS (2018) - "Primi interventi urgenti di protezione civile conseguenti all'evento sismico che ha interessato il territorio dei comuni di Casamicciola Terme, di Forio e di Lacco Ameno dell'Isola di Ischia il giorno 21 agosto 2017. Relazione Finale", OCDPC n. 476 del 29 agosto 2017
18. Cubellis, E., 1985. II. 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.
19. 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.
20. 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.
21. Del Prete S. & Mele R. (1999) - L'influenza dei fenomeni di instabilità di versante nel quadro morfoevolutivo della costa dell'isola d'Ischia. Boll. Soc. Geol. It., 118 (2), 339-360.
22. Della Seta M., Marotta E., Orsi G., De Vita S., Sansivero F. & Fredi P. (2011) - Slope instability induced by volcano-tectonics as an additional source of hazard in active volcanic areas: the case of Ischia island (Italy). Bull. Volcanol. DOI 10.1007/s00445-011-0501-0.
23. Della Seta M., Marotta E., Orsi G., de Vita S., Sansivero F., Fredi P. (2011) - Slope instability induced by volcano-tectonics as an additional source of hazard in active volcanic areas: the case of Ischia island (Italy). Bull. Volc. DOI 10.1007/s00445-011-0501-0.
24. Faccenna, C., Funiciello, R., Bruni, A., Mattei, M., Sagnotti, L. (1994). Evolution of a transferrelated basin: The Ardea basin (Latium, central Italy). Basin Res. 6, 35-46.
25. Fedi, M., Rapolla, A., 1987. The campanian volcanic area: Analysis of the magnetic and gravimetric anomalies. Boll.Soc. Geol. Ital. 106, 793-805.
26. Finetti I., Morelli C., 1974. Esplorazione sismica a riflessione dei Golfi di Napoli e Pozzuoli. Boll. Geof: Teor.Appl., 16, 175-222.
27. Funiciello, R., Locardi, E., Parotto, M., 1976. Lineamenti geologici dell.area sabatina orientale. Boll. Soc. Geol. Ital. 95, 831-849.
28. Fusi N., Tibaldi A. & Vezzoli L. (1990) - Vulcanismo, Risorgenza calderica e relazioni con la tettonica regionale nell'isola d'Ischia. 75° Conv. Soc. Geol. Ital.
29. Gatta L., 1883. Il disastro di Casamicciola. Gazzetta Letteraria di Torino. 11 agosto, Torino. B.N.R.
30. Gillot P.Y., Chiesa S., Pasquare G., Vezzoli L., 1982. 633,000 yr K-Ar dating of the volcano-tectonic horst of the isle of Ischia, Gulf of Naples. Nature 229, 242-24
31. Grablovitz, G., 1889. Funzionamento degli apparecchi in occasione di un terremoto nell'Isola d'Ischia. Ann. Uff. Centr. Meteor. Geodin., s. II, 11, p. III (1893), pp. 175-180
32. Grünthal, G. ( Ed. ) (1998): European Macroseismic Scale 1998 EMS-98, (Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie

33. Guadagno, F.M., Mele, R., 1995. I. Movimenti franosi indotti da terremoti nell'Isola d'Ischia. In: Bonardi, G., De Vivo, B., Gasparini, P., Vallario, A., Cinquant'anni di attività didattica e scientifica del Prof. Felice Ippolito. Liguori Editore, Napoli.
34. Guadagno F.M. & Mele R. (1995) - La fragile isola d'Ischia. Geol. Appl. e Idrogeol., 30 (1), 177-187 – Atti I Conv. G.N.G.A., Taormina.
35. Iervolino I., Baltzopoulos G., Chioccarelli E. (2017). Preliminary engineering report on ground motion data of the Aug 21st 2017 Ischia earthquake V1.0.. DOI: 10.13140/RG.2.2.31712.99842, available at http://www.reluis.it.
36. Ippolito F., D.Argenio B., Pescatore T., Scandone P., 1973a. Unità stratigrafico-strutturali e schema tettonico dell'Appennino Meridionale. Istituto di Geologia e Geofisica dell'Università di Napoli, pubbl. num.15.
37. Johnston Lavis H. J. 1885. Monograph of the earthquakes of Ischia, London-Naples.
38. 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.
39. Luongo, G., Cubellis, E., Di Vito, M., Cascone, E., 1995. L'isola d'Ischia: dinamica e struttura del M. Epomeo. In: Bonardi, G., De Vivo, B., Gasparini, P., Vallario, A., Cinquant'anni di attività didattica e scientifica del Prof. Felice Ippolito. Liguori Editore, Napoli.
40. 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.
41. Mariani, M., Prato, R., 1988. I bacini neogenici costieri del margine tirrenico: approccio
42. sismicostratigrafico. Mem. Soc. Geol. It., 41, 519-531.
43. Marmoni, G. M., S. Martino, M. J. Heap, and T. Reuschlé (2017) Gravitational slope-deformation of a resurgent caldera: New insights from the mechanical behaviour of Mt. Nuovo tuffs (Ischia Island, Italy) J. Volcanol. Geoth. Res. 345, 1–20.
44. McGuire, R. K. (1995). Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: closing the loop, Bull. Seism. Soc. Am. 85, 1275-1284.
45. Meletti C., Patacca E., Scandone P., (2000): Construction of a seismotectonic model: the case of Italy. Pageoph, 157, 11-35.
46. Mercalli G., 1881. I terremoti dell'Isola d'Ischia. Atti Soc.Ital. Sc. Nat. 24, 20-37.
47. Mercalli G., 1883. Vulcani e fenomeni vulcanici in Italia. Vallard, Milano. B. N.N.
48. Mercalli G., 1884. I terremoti e le eruzioni dell'Isola d'Ischia. La Rassegna Nazionale, 17, 40-52.
49. Molin P., Acocella V., Funiciello R., Structural, seismic and hydrothermal features at the border of an active intermittent resurgent block: Ischia Island (Italy). Journal of Volcanology and Geothermal Research 121 (2003) 65^81.
50. Nakamura Y. (1989) - A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI), Vol. 30, No. 1.

51. 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.
52. 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
53. 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.
54. Penta P. – Conforto B., 1951 Risultati di sondaggi e di ricerche geominerarie nell'isola d'Ischia dal 1939 al 1943 nel Campo del vapore, delle acque termali e delle « forze endogene » in generale pp. 159 -190
55. Piochi M., 1995 - The Ischia magmatic system in the last 10 ka: geochemical and geophysical evidence. Plinius 13, 190-196
56. Rittmann A. (1930) - Geologie der Insel Ischia. Z f Vulkanol Erganzungsband, 6.
57. Rittman A., Gottini, V., 1980. L'isola di Ischia-Geologia. Boll. Ser. Geol. Ital. 101, 131^274.
58. Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (eds), 2016. CPTI15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPTI15.
59. Safen, 1951. Ricerche di Acqua termale e di vapore nei Campi Flegrei e nell'Isola d'Ischia. University of Rome 'La Sapienza'.
60. Santacroce R., Cristofolini R., La Volpe L., Orsi G., Rosi M. (2003). Italian Active Volcanoes. Episodes, 26 (3): 227-234.
61. Sbrana A., Marianelli P., Pasquini G., 2018, Volcanological map of Ischia - Scala 1:10.000.
62. Sbrana, A., Toccaceli, R.M. (2011) - Carta Geologica della Regione Campania alla scala 1:10.000. Foglio 464 Isola d'Ischia. Progetto CARG Campania, Assessorato Difesa del Suolo. Litografia artistica cartografica, Firenze. 216 pp + 1 carta.
63. Slejko D., Peruzza L. and Rebez A.; (1998): Seismic hazard maps of Italy. Annali di Geofisica, 41, 183 - 214.
64. Stucchi, M., Meletti, C., Montaldo, V., Crowley, H., Calvi, G. M., & Boschi, E. (2011). Seismic hazard assessment (2003–2009) for the Italian building code. Bulletin of the Seismological Society of America, 101(4), 1885-1911.
65. Tibaldi A. & Vezzoli L. (1998) - The space problem of caldera resurgence: an example from Ischia Island, Italy. Geol. Rundsch. 87, 53-66.
66. Tibaldi, A., Vezzoli, L., 2000. Late Quaternary monoclinal folding induced by caldera resurgence at Ischia, Italy. In: Cosgrove, J.W., Ameen, M.S. (Eds.), Forced Folds and Fractures: Geol. Soc. Spec. Publ., London, vol. 169, pp. 103–113.
67. Tibaldi, A., Vezzoli, L., 2004. A newtype of volcanoflank failure: the resurgent caldera sector collapse, Ischia, Italy. Geophys. Res. Lett. 31, L14605. doi:10.1029/2004GL020419.
68. Vezzoli L (1988) Island of Ischia. In: Vezzoli L (ed) CNR Quaderni de La ricerca scientifica, 114-10, 122 pp.

69. Ugati U., 2017. STUDIO GEOLOGICO – SISMICO - Rel. B.16 – Relazione Tecnico – Illustrativa allegata al PUC di Forio.
70. Vezzoli L. et al., 2009. Modes and times of caldera resurgence: The b10 ka evolution of Ischia Caldera, Italy, from high-precision archaeomagnetic dating. Journal of Volcanology and Geothermal Research 186 (2009) 305–319.
71. 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 tsunami and its effects on a densely inhabited area (2013). Bulletin of Volcanology, 75 (11).
72. Zuppetta, A., Sava, A., Zuppetta, C. (1993). Evoluzione vulcano-tettonica dell'isola d'Ischia: un modello per gli ultimi 33 ka di attività. Boll. Soc. Geol. It., 112, 353-369.

Siti web:

1. Banca dati DISS, Database of Individual Seismogenic Sources dell'INGV http://diss.rm.ingv.it/dissmap/dissmap.phtml.
2. Cartografia allegata al Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico dell'Autorità di Bacino Campania Centrale http://www.adbcampaniacentrale2.it/;
3. Catalogo parametrico terremoti italiani dell'INGV, https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/.
4. https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/ Database macrosismico nazionale- INGV.
5. http://www.questingv.it/index.php/rilievi-macrosismici/34-ischia-21-08-2017-md-4-0-rapporto- finale/file.
6. INGVTERREMOTI, https://ingvterremoti.wordpress.com/.
7. ITACA release 2.2 dell'INGV, http://itaca.mi.ingv.it/.
8. Mappa interattiva pericolosità sismica INGV http://esse1-gis.mi.ingv.it/.
9. Progetto IFFI (banca dati inventario fenomeni franosi d'Italia), dal sito ufficiale del Servizio Geologico Italiano, http://sgi.isprambiente.it/GMV2/index.html.
10. Progetto ITHACA, dal sito ufficiale del Servizio Geologico Italiano http://sgi.isprambiente.it/GMV2/index.html.
11. QUEST- Rilievo macrosismico per il terremoto dell'isola di Ischia del 21 agosto 2017. Rapporto finale.

# 10. Allegati

- Carta delle indagini in scala 1:5.000 (sez. A – sez. B);
- Carta delle frequenze naturali dei terreni (f0) in scala 1:5.000 (sez. A – sez. B);
- Carta delle frequenze naturali dei terreni (fr) in scala 1:5.000 (sez. A – sez. B);
- Carta Geologico-Tecnica per la MS (CGT_MS) in scala 1:5.000 (sez. A – sez. B);
- Sezioni geologico-tecniche in scala 1:5.000;
- Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) in scala 1:5.000 (sez. A – sez. B);
- Carta di Microzonazione Sismica FA (0.1-0.5s) in scala 1:5.000 (sez. A – sez. B);
- Carte di Microzonazione Sismica FA (0.4-0.8s) in scala 1:5.000 (sez. A – sez. B);
- Carte di Microzonazione Sismica FA (0.7-1.1s) in scala 1:5.000 (sez. A – sez. B);
- Spettri di risposta in accelerazione.