



PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile



REGIONE  
TOSCANA



CONFERENZA DELLE REGIONI E  
DELLE PROVINCE AUTONOME

Attuazione dell'articolo 11 dalla legge 24 giugno 2009, n.77

# MICROZONAZIONE SISMICA

## Relazione illustrativa

### Regione Toscana Comune di Abbadia San Salvatore



Regione	Soggetto realizzatore	data
	Gruppo MS-CLE Amiata-Val d'Orcia Fondazione Parsec (Mandatario) Dott. Geol. Andrea Borri (Mandante) Ing. I. Luca Bechi (Mandante)  Tecnico Responsabile: Dott. Geol. Andrea Fiaschi	Luglio 2018



Comune di Abbadia San Salvatore  
Studio di Microzonazione Sismica (MS) – Livello 1  
Relazione illustrativa



## INDICE

INTRODUZIONE	pag. 4
1. PERICOLOSITÀ DI BASE	pag. 5
2. INDAGINI PREGRESSE E NUOVE INDAGINI	pag. 11
2.1. Raccolta dei dati esistenti	pag. 11
2.2. Nuova campagna geofisica	pag. 12
3. GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA	pag. 17
3.1. Carta geologica e geomorfologica	pag. 17
3.2. Modello del sottosuolo	pag. 19
3.2.1. Capoluogo	pag. 20
3.2.2. Aree artigianale Val di Paglia	pag. 23
4. ELABORATI CARTOGRAFICI	pag. 24
4.1. Carta delle indagini	pag. 25
4.2. Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica	pag. 26
4.3. Carta delle frequenze fondamentali dei depositi	pag. 28
4.4. Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica	pag. 32
5. QUALITÀ DEGLI ELABORATI CARTOGRAFICI	pag. 40
6. CONFRONTO CON LA DISTRIBUZIONE DEI DANNI DEL PASSATO	pag. 40
7. BIBLIOGRAFIA	pag. 41



## INTRODUZIONE

Il presente lavoro è stato eseguito sulla base di quanto previsto dalla normativa regionale e nazionale in materia. In particolare, l'allegato A del DPGR 25/10/2011 n. 53/R (Regolamento di attuazione dell'art. 62 della legge Regionale n. 1/2005 in materia di indagini geologiche) prevede che la pericolosità sismica sia basata su studi di microzonazione sismica (MS) almeno di livello 1, consistenti in una raccolta ragionata di dati di natura geologica, geofisica e geotecnica e delle informazioni preesistenti e/o acquisite appositamente al fine di suddividere il territorio in microzone qualitativamente omogenee dal punto di vista del comportamento sismico (MOPS – Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica). Inoltre lo studio risponde ai requisiti richiesti dalle Linee Guida per la Microzonazione Sismica Nazionali (Indirizzi e criteri generali per la microzonazione sismica approvati dal Dipartimento della Protezione civile e dalla Conferenza Unificata delle Regioni e delle Province autonome il 13 novembre 2008) e Regionali (DGRT n. 971/2013 - Redazione delle specifiche tecniche regionali per l'elaborazione di indagini e studi di microzonazione sismica) per quanto riguarda sia le modalità di realizzazione, sia la restituzione dei risultati in formato digitale (Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica, versione 4.0b, di seguito indicati come standard).

L'Unione dei Comuni Amiata - Val d'Orcia ha espressamente indicato come aree di studio l'abitato di Abbadia San Salvatore e quello dell'area artigianale Val di Paglia. Quali indagini specifiche di supporto allo studio è stata svolta una campagna di 519 misure di microtremori a stazione singola (HVSR), una prospezione sismica a rifrazione in onde P ed SH e 22 prospezioni sismiche MASW-ESAC.

La scala dei rilievi degli elaborati è 1:10.000 per tutto il territorio esaminato, con utilizzo della CTR 1:2000 nelle zone ove disponibile per un



migliore posizionamento dei punti di indagine e dell'individuazione della loro quota altimetrica.

Il lavoro si è pertanto articolato nelle seguenti fasi:

- raccolta delle indagini pregresse e dei dati di base geologici disponibili;
- esecuzione di nuove misure di microtremori a stazione singola (HVSR);
- esecuzione delle prospezioni MASW-ESAC;
- esecuzione della prospezione sismica a rifrazione (in onde P e SH);
- creazione del database delle indagini;
- realizzazione degli elaborati cartografici (Carta geologica e geomorfologica, Carta delle indagini, Carta geologico tecnica per la microzonazione sismica, Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica, Carta delle frequenze fondamentali dei depositi);
- redazione della Relazione illustrativa dei risultati dello studio.

## 1. PERICOLOSITÀ DI BASE

Il vulcanesimo della Toscana Meridionale, che tra 300000 e 180000 anni fa ha determinato la formazione del Monte Amiata, costituisce la manifestazione più recente delle complesse vicende geologiche che a partire dal Miocene hanno interessato l'Appennino Settentrionale, determinando la sua migrazione verso E e l'apertura del Mar Tirreno. Tutta la zona è caratterizzata da bacini Miocenici-Pliocenici con orientazione NW-SE sviluppatasi lungo sistemi di faglia normali e successivamente intersecati da sistemi di faglie orientate NE-SW. Associata a questa intensa attività tettonica è presente una importante attività sismica evidente nei numerosi terremoti che hanno interessato tutta la zona in epoca storica.

Dall'esame dei cataloghi che raccolgono le notizie sui terremoti avvenuti in epoca storica, si evidenzia che l'attività sismica nell'area del monte Amiata e



Comune di Abbadia San Salvatore  
Studio di Microzonazione Sismica (MS) – Livello 1  
Relazione illustrativa

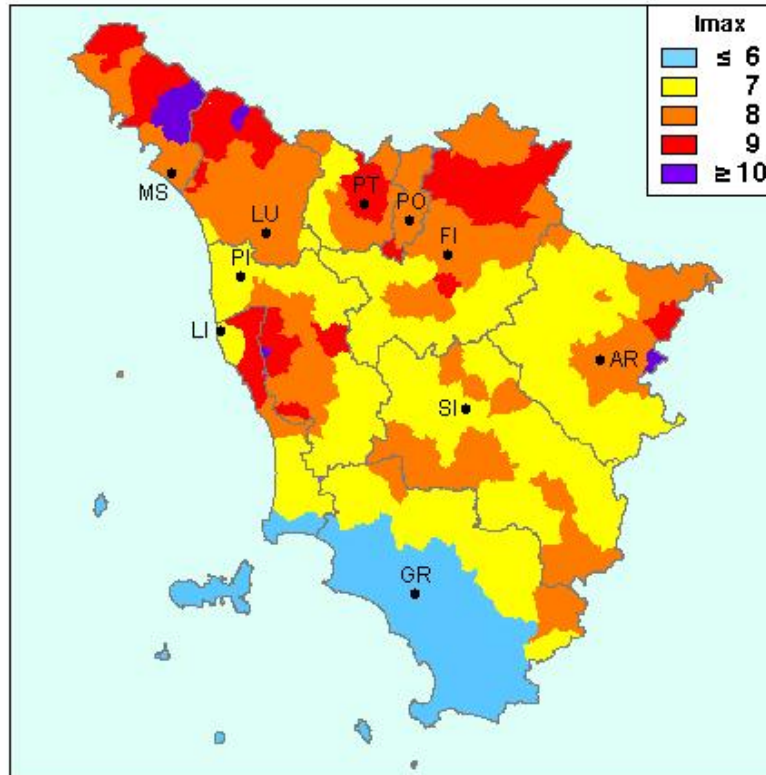
della Val d'Orcia contiene le registrazioni di almeno 29 terremoti, di cui 13 con epicentro nella zona del Monte Amiata, 7 nella zona della Val di Paglia e 9 nella Val d'Orcia. I terremoti più forti sono stati quelli di Pienza del 1545 (Magnitudo equivalente 5.3), di Radicofani del 1777 (Magnitudo equivalente 5.2), di Piancastagnaio del 1919 (Magnitudo equivalente 5.3) e di Celle sul Rigo del 1940 (Magnitudo equivalente 5.3).

Data	Intensità risentita	Località epicentrale	Intensità epicentrale	Magnitudo eq.
1287	6-7	Abbadia San Salvatore	6-7	4.7
24/12/1509	6	Radicofani	6	4.6
27-29/11/1545	6	Pienza	7-8	5.3
24/03/1679	4	Monteoliveto	6-7	4.8
05/02/1700	7	Radicofani	7	4.8
01/11/1755	6	Acquapendente	6	4.4
15/05/1774	6	Santa Fiora	6	4.6
05/10/1777	7	Radicofani	8	5.2
08/09/1798	6	Montalcino	6-7	4.8
30/10/1802	7	Pienza	7	5.1
11/01/1815	6-7	Piancastagnaio	6-7	4.9
17/06/1868	6-7	Arcidosso	5-6	4.4
15/11/1897	5	Pienza	5	4.1
17/12/1902	6	Santa Fiora	7	4.7
12/02/1905	5	Santa Fiora	6-7	4.4
10/09/1919	6	Piancastagnaio	8	5.3
09/04/1924	5	Acquapendente	5	4.4
03/09/1925	6	Santa Fiora	6	4.4
08/01/1926	7	Abbadia San Salvatore	7	4.4
24/04/1928	6	Castelnuovo	6	4.4
19/06/1940	6	Radicofani	6-7	4.3
16/10/1940	7-8	Celle sul rigo	7-8	5.3
03/11/1948	5-6	Monte Amiata	7	4.7
30/05/1958	4	Radicofani	6	4.2
16/10/1972	5-6	Piancastagnaio	5-6	3.8
16/04/1975	6	Piancastagnaio	6	4.2
09/02/1994	5	Proceno	5	3.5
21/03/1997	6	Abbadia San Salvatore	6	3.5
01/04/2000	6	Piancastagnaio	6	4.5

Le intensità massime risentite in generale non hanno superato il valore di 8 come riportato nella mappa estratta dal catalogo delle "Massime intensità macrosismiche osservate nei comuni italiani | GNDT-ING-SSN (1996)":



Comune di Abbadia San Salvatore  
Studio di Microzonazione Sismica (MS) – Livello 1  
Relazione illustrativa



I cataloghi storici dai quali sono stati estratti i dati precedenti sono pubblicati sul sito dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. Sono stati consultati i seguenti:

↳ Archivio storico macrosismico italiano | ASMI;

↳ Catalogo parametrico dei terremoti italiani dal 1000 al 2014 | CPTI15;

↳ Database macrosismico italiano dal 1000 al 2014 | DBMI15;

↳ Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.-1997) e nell'area Mediterranea (760 a.C.-1500) |CFTI5Med;

↳ Massime intensità macrosismiche osservate nei comuni italiani | GNDT-ING-SSN (1996).

Accanto ai cataloghi storici è disponibile il catalogo basato sulle registrazioni strumentali di terremoti eseguite sia dalle reti nazionali dell'INGV, sia dalle principali reti sismiche permanenti regionali e locali. In particolare è stato sviluppato il "Catalogo della Sismicità Italiana", integrato



Comune di Abbadia San Salvatore  
Studio di Microzonazione Sismica (MS) – Livello 1  
Relazione illustrativa

fino al 2002 nella versione CS11.1, con l'obiettivo principale di costituire una base per il calcolo di modelli di velocità tridimensionali per la crosta ed il mantello superiore della regione italiana. Il catalogo raccoglie 91.797 terremoti localizzati dei 136.850 registrati nel periodo dal 1981 al 2002 e 39.020 stime di magnitudo superiori a 1.5., su un totale di oltre 400 stazioni.

Oltre a questo è presente il Bollettino Sismico Italiano, che ha lo scopo di fornire le migliori informazioni verificate sulla sismicità molto recente, insieme all'aggiornamento delle conoscenze sulla sismicità del passato. Al momento è pubblicato solo il Bollettino Sismico Italiano a partire dal 16 aprile 2005; il database è, comunque, in continuo aggiornamento progressivo. Da queste due fonti sono stati estratti gli epicentri presenti entro un raggio di 30 km dal capoluogo.

Il comune di Abbadia San Salvatore risulta citato in quasi tutti i record presenti nei cataloghi con intensità risentite comprese tra 4 e 7 della scala Mercalli (presenza di edifici lesionati). In particolare oltre al terremoto del 1287 si ricordano i seguenti che hanno prodotto risentimenti significativi:

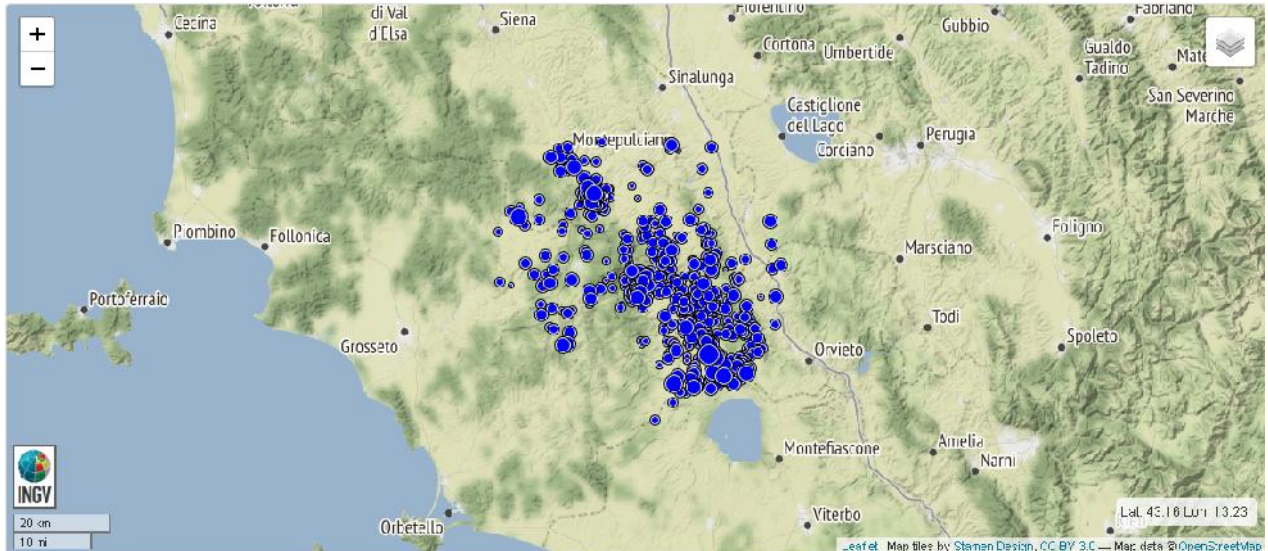
Data					Effetti	Area epicentrale:		
Ye	Mo	Da	Ho	Mi	Is (MCS)	Area epicentrale	Ix	Ms
1777	10	05	15	45	70	RADICOFANI	80	52
1926	01	08	09	14	70	ABBADIA S. SALV.	70	44
1287					65	ABBADIA S. SALV.	65	47
1940	10	16	13	17	65	RADICOFANI	75	51
1902	12	17	05	21	60	SANTA FIORA	70	47
1919	09	10	16	57	60	PIANCASTAGNAIO	80	52
1940	06	19	14	10	60	RADICOFANI	65	43
1909	08	25	00	22	55	MURLO	75	51
1948	11	03	11	40	55	MONTE AMIATA	70	47
1905	02	12	08	28	50	SANTA FIORA	65	44
1958	05	30	06	26	40	RADICOFANI	60	42
1969	08	11	13	55	30	TRASIMENO	70	48
1971	02	06	18	09	NF	TUSCANIA	85	42





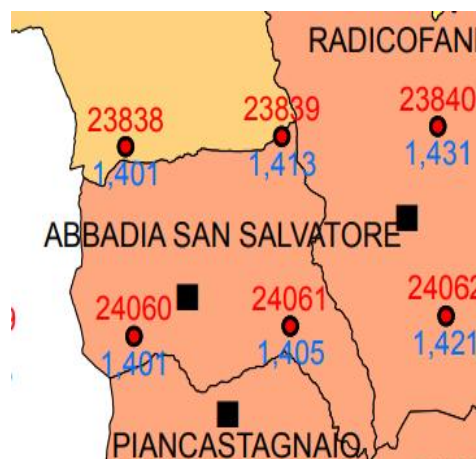
Comune di Abbadia San Salvatore  
Studio di Microzonazione Sismica (MS) – Livello 1  
Relazione illustrativa

Dal Catalogo della Sismicità Italiana inoltre risultano 649 terremoti avvenuti tra il 2005 ed il 2018 con magnitudo massima  $M_I = 3.4$ :



A partire dai dati storici precedentemente esposti la legislazione nazionale, classifica il territorio comunale di Abbadia San Salvatore in Zona 2 fin dal 1927. La Regione Toscana non ha modificato la legislazione nazionale e anzi con DGRT 421/14 ha confermato tale classificazione.

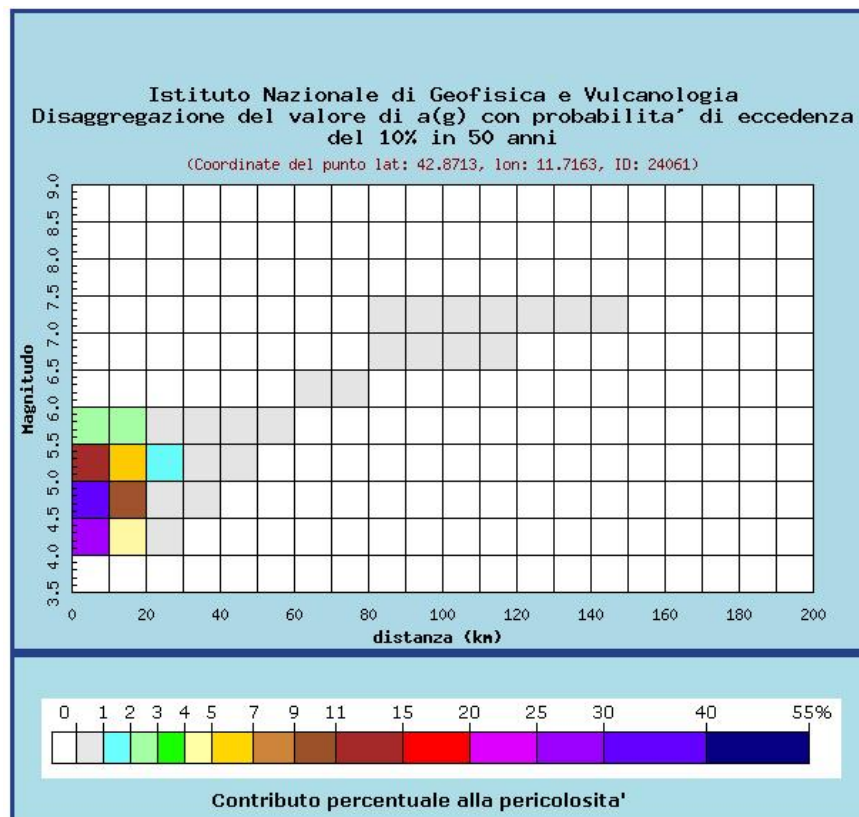
Gli studi di pericolosità svolti dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia per conto del Dipartimento Nazionale della Protezione Civile evidenziano che le accelerazioni massime attese per il periodo di riferimento Tr475 variano tra 1.40 e 1.41.





Comune di Abbadia San Salvatore  
Studio di Microzonazione Sismica (MS) – Livello 1  
Relazione illustrativa

Mentre il grafico di disaggregazione del valore di accelerazione con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni evidenzia che il contributo maggiore alla pericolosità è fornito da eventi con magnitudo tra 4.5 e 5 a distanze epicentrali entro i 10 km (valore medio Magnitudo 4.8, distanza 7.7 km).



Nel complesso dal dataset raccolto risulta evidente l'elevato livello di sismicità dell'area, con intensità risentite che in certi casi hanno comportato il superamento della soglia del danno.

Infine si evidenzia come nel territorio comunale non sia al momento segnalata la presenza di faglie attive e/o capaci (catalogo ITHACA - ITaly HAZard from CAPable faults - del Servizio Geologico d'Italia – ISPRA) né la presenza di sorgenti sismiche (catalogo DISS – Database of Individual Seismogenic Sources – dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia).



## 2. INDAGINI PREGRESSE E NUOVE INDAGINI

### 2.1. Raccolta dei dati esistenti

I dati pregressi disponibili sono innanzitutto quelli prodotti in occasione dello studio regionale VEL per il comune di Abbadia, che nel caso specifico sono risultati particolarmente abbondanti, successivamente sono stati esaminati gli archivi pubblici presenti sul web dove sono stati reperiti tutti i dati relativi al Piano Strutturale comunale, i dati dell'ISPRA e della Regione Toscana (Lamma e Arpat), infine è stata fatta una ricognizione presso gli uffici tecnici comunali per verificare la presenza di pratiche edilizie supportate da indagini e studi geologici.

La ricerca ha portato al reperimento delle seguenti indagini geognostiche e geofisiche effettuate in passato (tra parentesi i codici relativi allo standard di rappresentazione):

- 63 Sondaggi geognostici a carotaggio continuo (codici S se non hanno raggiunto il substrato [41] e SS se lo hanno raggiunto [22]);
- 21 Trincee esplorative (codice T);
- 120 Prove SPT (codice SPT);
- 15 Prove penetrometriche dinamiche medie (codice DN);
- 2 Prove penetrometriche dinamiche super pesanti (codice DS);
- 33 Prove penetrometriche dinamiche leggere (codice DL);
- 18 Prove sismiche a rifrazione in onde P, alcune anche in onde SH (codice SR);
- 1 Prove sismiche a riflessione in onde P (codice SL)
- 1 Prova triassiale consolidata drenata (codice CD);
- 4 Prove triassiali consolidate non drenate (codice CU);
- 8 Prove di colonna risonante (codice CR);



- 8 Prove Down – Hole (codice DH);
- 11 Prove edometriche (codice ED);
- 2 Espansioni laterali libere (codice ELL);
- 36 Analisi di campioni (codice SM);
- 13 Tagli diretti (codice TD);
- 1 Taglio torsionale ciclico (codice TTC);
- 1 Prova triassiale non consolidata non drenata (codice UU).

## 2.2. Nuova campagna geofisica

Le indagini pregresse del VEL hanno riguardato esclusivamente il capoluogo. Per migliorare il quadro conoscitivo è stata predisposta una campagna di indagine basata su misure HVSR (n. 519, di cui 115 ripetute nelle medesime ubicazioni, v. oltre), sismica a rifrazione (n. 1) e sismica in onde superficiali ESAC-MASW (n. 22).

La scelta dell'ubicazione delle nuove indagini è stata operata avendo cura dei seguenti obiettivi:

- rappresentatività territoriale (misure estese alle aree di interesse, capoluogo e area artigianale della Val di Paglia);
- esame delle diverse situazioni lito-stratigrafiche presenti;
- confronto con i dati pregressi (taratura del metodo) e loro integrazione.

Una prospezione sismica, in onde P e SH, con profili di 24 geofoni per 92 m di lunghezza, con lo scopo di verificare lo spessore delle coperture al di sopra dell'eventuale substrato sismico è stata realizzata nella zona artigianale della Val di Paglia. La prospezione è stata curata dalla ditta Trigeo snc di Soci (AR), che ha impiegato un sismografo Geode della Geometrics a 24 canali con geofoni a 10 Hz verticali e orizzontali (in questo caso dotati di bolla livellante).

L'ubicazione degli ulteriori 404 punti di misura di microtremore a stazione singola (HVSR) è avvenuta secondo una maglia regolare che ha coperto uniformemente tutto l'abitato del capoluogo e la zona artigianale della Val di



Paglia. Lo strumento utilizzato è il Tromino Engi Plus della Moho SRL (ex Micromed SpA).

Le misure HVSR sono state eseguite nel periodo Marzo – Maggio 2018, evitando i giorni di precipitazione e/o vento forte, avendo cura di appoggiare lo strumento con i piedini in dotazione direttamente sul suolo rimuovendo la copertura erbosa, ove presente, e orientandolo a Nord mediante bussola. Ogni misura ha rispettato gli standard previsti dagli indirizzi e criteri nazionali che prevedono l'integrazione dei criteri SESAME (2006) con indicatori di qualità della misura (Albarello e Castellaro, 2011). I dati raccolti sono stati analizzati mediante il software Grilla (vers. 6.2) della medesima azienda produttrice dello strumento, con ripulitura delle tracce dai disturbi transienti. L'elaborazione del rumore sismico acquisito è eseguita mediante la tecnica di Nakamura (1989), che consente una stima attendibile delle frequenze di amplificazione del moto sismico da parte dei terreni, basandosi sul rapporto spettrale tra le componenti orizzontali e verticali dei microtremori. L'ampiezza dei picchi di amplificazione evidenziati è poi qualitativamente correlata all'entità del contrasto di impedenza sismica esistente al passaggio tra terreni con caratteristiche dinamiche differenti (Haghshenas et al., 2008).

In definitiva, le misure sono state assegnate alle seguenti classi di qualità:

Tab. 2.1 – Numero di misure di microtremori HVSR per classe di qualità

Misure/Classe	A1	A2	B1	B2	C1	TOTALI
Numero	107	59	308	41	4	519
Percentuale (%)	20,7	11,3	59,3	7,8	0,9	100,0

Dalla tabella possiamo osservare come gran parte delle misure (80%) presenta picchi ben individuati (classi A1 e B1). Tra le misure della classe B1 103, pur rispettando pienamente i criteri SESAME, mostrano la possibile occorrenza della variabilità azimutale del rapporto H/V maggiore del 30%. Questa circostanza in ambiente montano può essere legata alle complesse



situazioni morfo-stratigrafiche esistenti, senza dover ipotizzare l'esistenza di sorgenti esterne del rumore fortemente direzionali che ne minerebbero la significatività. Per tale motivo riteniamo che buona parte di queste misure possa essere utilizzata senza particolari controindicazioni, facendo però riferimento ai relativi commenti presenti sul database SoftMS a segnalare eventuali anomalie.

Le misure per le quali non vi sono evidenze di picchi di risonanza (classi A2 e B2) sono risultate il 19% circa del totale.

Delle 519 misure eseguite, in accordo con la Regione Toscana, 115 sono state ripetute su siti già esaminati con le misure precedenti. L'opportunità di eseguire misure ripetute rende possibile verificare la variabilità e l'affidabilità dei risultati in relazione alla grande mole di misure concordate nel disciplinare.

In generale si è osservata una buona ripetibilità dei risultati, tuttavia, con l'esclusione dei casi in cui la variabilità rientra all'interno della deviazione standard della misura principale, ci sono misure per le quali si osservano differenze che possono rientrare nelle seguenti macrocategorie:

- 1) picchi che hanno mantenuto lo stesso valore in frequenza ma con diversa ampiezza del picco;
- 2) picchi spuri per rumore antropico;
- 3) picchi eccitati da condizioni ambientali particolari.

Nel primo caso la misura mantiene comunque inalterato il suo valore conoscitivo, nel secondo e nel terzo si è cercato di capire quale delle misure presentasse i migliori requisiti anche esaminando le caratteristiche spettrali delle singole componenti. In ogni caso nella carta delle frequenze è stata riportata la misura con la maggiore affidabilità.

Ognuna delle analisi HVSR è illustrata in una scheda nella quale sono riportate le seguenti informazioni (schede raccolte nella sottocartella "Documenti" della cartella "Indagini" della struttura dati):

- Nome della misura, mediante il codice relativo al punto di indagine del software SoftMS (indicativo comune + progressivo punto indagine) e all'identificativo dell'indagine (progressivo indagine puntuale);





- Indirizzo, coordinate WGS 84 UTM 33N, data-ora inizio misura, durata e percentuale utilizzata nell'analisi, frequenza di campionamento, lunghezza della finestra, tipo e percentuale del lisciamento, condizioni meteo, tipo di superficie;
- grafico del rapporto spettrale orizzontale su verticale;
- grafico degli spettri delle singole componenti;
- grafici della serie temporale e della direzionalità del rapporto H/V;
- foto e ubicazione del punto di misura su CTR 1:10.000;
- verifica del rispetto o meno dei criteri SESAME per il picco principale.

Insieme alle misure HVSR sono stati eseguiti n. 22 profili ESAC – MASW con geometria a "L" e lati asimmetrici. La lunghezza di ciascun lato è stata nella quasi totalità dei casi di m 80 x m 35 con spaziatura intergeofonica di 5 m, unica eccezione rappresentata dallo stendimento n. 19 di lati pari a 68 e 24 m con spaziatura intergeofonica di 4 m.

In tutti i profili al termine delle registrazioni con modalità ESAC, sul lato lungo della L è stato eseguito un profilo MASW utilizzando 12 geofoni distanziati ogni 5 metri (con l'eccezione della MASW n.19 che ha spaziatura di 4 m) ed eseguendo le energizzazioni con mazza battente da 10 kg a distanze pari a 5 e 10 m da entrambe le estremità.

La strumentazione utilizzata è costituita da geofoni verticali con frequenza propria a 4.5 hz e sismometro MAE - X610S o Geometrics GEODE. I parametri di acquisizione utilizzati per la registrazione delle ESAC sono i seguenti:

- tempo di acquisizione 33 m;
- frequenza di campionamento 250 hz.

Mentre i parametri di acquisizione utilizzati per la registrazione delle MASW sono stati i seguenti:

- tempo di acquisizione 2 s;
- frequenza di campionamento 1000 hz.



In merito alle interpretazioni si osserva:

- Sia le ESAC che le MASW sono state interpretate avvalendosi del software commerciale WinMASW (versione Accademy 2018), che sfrutta i principi delle reti neurali per l'inversione delle curve di dispersione vincolando il modello sulla base delle informazioni al contorno fornite dall'utente oppure eseguendo inversioni congiunte con le misure HVSR.
- Le curve di dispersione delle ESAC sono state ottenute dopo aver valutato la qualità delle registrazioni di ogni singolo canale, considerando lo scostamento in termini di rumore medio tra un canale e procedendo all'eventuale esclusione del geofono con offset eccessivi;
- Le interpretazioni ESAC si sono dimostrate efficaci in particolar modo sui terreni alluvionali e sulle coperture detritiche, con spettri di potenza ben definiti fino a 4Hz, cui corrispondono, date le velocità in gioco, profondità di indagine dell'ordine dei 50 metri. Questo ha consentito in tutte le indagini di ricavare i valori di Vs30. Anche gli stendimenti eseguiti sulle formazioni vulcaniche hanno dato risultati soddisfacenti, mentre in tre casi (ESAC n.2, n.8 e n.16) tutti su terreni appartenenti alla formazione di Sillano, si sono avuti spettri di potenza poco definiti o con curve di dispersione a partire da 8-10 Hz;
- Le curve di dispersione MASW sono state calcolate previo ritaglio manuale della traccia con una finestra centrata solo sulle onde superficiali acquisite, escludendo le tracce che non avessero registrato in maniera adeguata il segnale di interesse;
- Le interpretazioni MASW sono state tutte di buona qualità con curve di dispersione ben strutturate, senza incertezze modali soprattutto sui modi più bassi.
- Tutte le interpretazioni sono state eseguite congiuntamente considerando sia la curva di dispersione ottenuta dalle ESAC si quella ottenuta dalle MASW. In numerosi casi è stata ottenuta un'unica curva di dispersione sulla quale è stato poi eseguito il picking manuale.
- Tutte le inversioni sono state effettuate modellando il sottosuolo sulla base delle informazioni geologiche e stratigrafiche disponibili. In tutti i casi è





stata tenuta in considerazione la misura HVSR più vicina, cercando di costruire un modello di partenza che fittasse al meglio il relativo spettro H/V.

- La profondità del modello di velocità è variabile ed è in funzione della frequenza più bassa raggiunta dalla curva di dispersione delle onde sismiche.

### 3. GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

#### 3.1. Carta geologica e geomorfologica

Sulla base dei rapporti strutturali e dell'analisi delle sequenze stratigrafiche, le formazioni affioranti nel territorio esaminato possono essere distinte in:

- Depositi quaternari;
- Rocce magmatiche del Monte Amiata;
- Depositi marini pliocenici;
- Dominio Ligure.

In particolare, in accordo con quanto riportato sul Database Geologico della Regione Toscana in scala 1:10.000, nelle zone in esame si individua la seguente successione stratigrafica:

#### Depositi quaternari (Olocene):

- Detriti di frana attiva (a1a), quiescente (a1q) o indeterminato (a1);
- Depositi di versante (aa): accumuli lungo i versanti di frammenti litoidi, eterometrici, angolosi, talora stratificati, con matrice sabbiosa o sabbioso-limosa;



- Detriti di falda (a3a): falde di detrito, talus detritici, coni di detrito coalescenti, anche a grossi blocchi, prevalentemente al piede delle pareti in roccia;
- Depositi eluvio-colluviali (b2a): Coperture di materiale a granulometria fine (limi e sabbie), con rari frammenti litoidi grossolani; processi di alterazione e/o trasporto di entità limitata o non precisabile;
- Depositi alluvionali attuali (b): ghiaie, sabbie e limi dei letti fluviali attuali, soggetti ad evoluzione con ordinari processi fluviali;
- Depositi alluvionali terrazzati (bna): ghiaie, sabbie e limi dei terrazzi fluviali;

#### Rocce Magmatiche del Monte Amiata

- Formazione di Quaranta (QRT): colate laviche clastogenetiche e colate laviche a blocchi di composizione trachidacitica (Pleistocene);

#### Depositi marini Pliocenici

- Argille azzurre: argille e argille siltose grigio azzurre localmente fossilifere (FAA) e argille con blocchi di calcari liguri (FAAf) (Zancleano-Piacenziano);

#### Dominio Ligure

- Formazione di Sillano (SIL): argilliti grigio bruno e calcilutiti (Cretacico sup.-Paleocene);
- Argille a Palombini: argilliti grigie e calcilutiti, anche in litofacies arenacea (APAb), (Cretacico inf.)
- Basalti (BRG) con strutture a pillow-lava: (Giurassico sup.).

Dal punto di vista geomorfologico si rileva come le elevate pendenze dei rilievi, legate alla litologia essenzialmente lapidea del substrato, abbia portato allo sviluppo di fenomeni di instabilità in ampie aree del territorio, favoriti anche dalla diversa erodibilità dei litotipi presenti. Dove individuata, la tipologia franosa più frequente è associata a meccanismi di scorrimento-colamento di materiale detritico di alterazione su substrato rigido.



Particolarmente critica la situazione nella zona N di Abbadia (loc. Esassetta) e nella zona S (area intorno al cimitero) dove sono presenti alcune frane attive particolarmente estese che provocano danni agli edifici ed estesi dissesti sul terreno. Sul territorio esaminato non è stata rilevata la presenza di scarpate morfologiche o di terrazzi fluviale con altezze di interesse ai fini della risposta sismica (superiori ai 10 m).

La carta è stata predisposta considerando sia il database geologico della Regione Toscana frutto dell'aggiornamento ed evoluzione del precedente continuum geologico, sia la cartografia geologica regionale in scala 1:10000 (CARG).

La carta geologica è stata predisposta in formato digitale, sulla falsariga degli standard adottati per le carte successive espressamente previste dalla normativa nazionale e regionale. Nel dettaglio sono stati creati i seguenti file shape, riuniti nella cartella "Geologia" sotto la base dati:

- Geo\_etichette: sigle cartografiche unità geologiche;
- Geo\_geomorfologia\_areale: elementi geomorfologici areali;
- Geo\_geomorfologia\_lineare: elementi geomorfologici lineari;
- Geo\_contatti\_tettonici: lineazioni tettoniche;
- Geo\_tracce\_sezioni: tracce delle sezioni geologiche;
- Geo\_frane: raccoglie le aree di frana con l'indicazione, ove disponibile, dello stato di attività e del tipo di movimento;
- Geo\_coperture: raccoglie le aree dei depositi di versante, eluvio-colluviali e i detriti di falda;
- Geo\_formazione: riporta le aree di affioramento del substrato litoide e dei depositi pliocenici e alluvionali.

### 3.2. Modello del sottosuolo

La ricostruzione del modello geologico del sottosuolo dipende strettamente dal numero e dalla tipologia delle indagini che lo hanno indagato e, pertanto, presenta gradi di dettaglio e accuratezza diversi nelle



varie aree considerate dallo studio. In particolare va osservato come nella zona centrale dell'abitato di Abbadia si concentrino molte delle indagini del programma VEL, composte da una grande quantità di sondaggi e stese sismiche di buona qualità, mentre nella zona artigianale della Val di Paglia sono stati reperiti alcuni sondaggi che non hanno raggiunto il substrato e alcune penetrometrie.

Le indicazioni desumibili dalle indagini pregresse sono state integrate, oltre che dalla prospezione sismica a rifrazione, dalla campagna di misure per l'analisi HVSR e dalla campagna di stese sismiche ESAC-MASW.

Dalle misure HVSR, sfruttando la nota relazione  $f_0 = V_s/4H$  (dove  $f_0$  è la frequenza fondamentale in Hz,  $V_s$  la velocità delle onde S nel terreno in m/s e H il suo spessore in m; Ibs Von Seht & Wohleberg, 1999), possiamo ricavare informazioni circa lo spessore della copertura (H) partendo dal valore di  $f_0$  fornito dall'analisi HVSR e dalla  $V_s$  ricavata direttamente dalle indagini MASW o a rifrazione in onde SH. Si ricorda, comunque, che tale relazione semplificata è valida solo per situazioni ideali, nel caso di picchi isolati e ben chiari nelle misure HVSR, dovendo ricorrere a modellazioni più accurate nella maggior parte dei casi reali. Tuttavia, le indicazioni fornite rappresentano una importante fonte di conoscenza, seppure a livello qualitativo, nelle aree sprovviste di altre indagini.

Per quanto riguarda la metodologia utilizzata le diverse tipologie di indagini sono state considerate in base alla loro affidabilità e coerenza con riferimento alle classi definite nel SoftMS. Alcune delle indagini pregresse provenienti dalla banca dati BDIG non sono state attribuite a una classe di affidabilità alta a causa delle possibili incertezze sulla loro localizzazione e/o interpretazione. In particolare, a parità di affidabilità (alta), i sondaggi sono stati utilizzati per acquisire informazioni dirette sulle stratigrafie tramite le quali vincolare le indagini geofisiche; le penetrometrie, che presentano un'affidabilità molto minore, sono state utilizzate per avere indicazioni di massima da confermare sulla base del contesto. Tra le penetrometrie, inoltre, si è distinto tra dinamiche e statiche, con un'ulteriore distinzione tra le dinamiche leggere, pesanti e super pesanti. Considerata la scarsa



affidabilità delle penetrometrie dinamiche leggere si è deciso di non considerarle del tutto. Per quanto riguarda saggi e trincee sono state considerate affidabili, ma solo in relazione alle coperture. Le indagini di sismica attiva a rifrazione, superficiali e profonde, sono state valutate ad alta affidabilità e utilizzate anch'esse per vincolare l'inversione delle MASW/ESAC. Infine la maggior parte delle indagini di nuova esecuzione sono state ritenute ad alta affidabilità.

In generale il modello ricostruito è basato sull'uso delle indagini ad alta e media affidabilità, tralasciando quelle di affidabilità bassa.

### 3.2.1. Capoluogo

L'abitato di Abbadia San Salvatore è costruito quasi interamente sulle vulcaniti del Monte Amiata, solo le parti periferiche della zona N sono edificate su terreni appartenenti alla formazione di Sillano, interessati da estese frane di scivolamento attive.

Le indagini evidenziano la presenza di una diffusa fascia di alterazione superficiale del sottostante substrato litoide, localmente di spessore rilevante, anche nelle aree dove è segnalato l'affioramento delle formazioni rocciose. In particolare i 22 sondaggi che hanno raggiunto il substrato hanno riscontrato la presenza di spessori della coltre di alterazione variabili tra 5 e 60 m con una prevalenza di spessori intorno ai 40 m. Al di sotto il substrato può essere rappresentato dalle vulcaniti non alterate oppure da calcari e argilliti appartenenti alla formazione di Sillano. Quest'ultimo caso si riscontra in particolar modo nelle zone di margine vicine al contatto tra le due formazioni. Le prospezioni sismiche in onde P e in onde SH confermano questa situazione individuando il bedrock sismico a profondità comprese tra 5 e 40 m, con valori di  $V_s$  superiori a 800 m/s. Analogo risultato è stato ottenuto con prospezioni ESAC-MASW che hanno individuato il substrato tra 24 e 50 m di profondità con velocità superiori a 700 m/s. All'esterno delle vulcaniti, sulle coperture e sulla formazione di Sillano la profondità del substrato risulta compresa tra 18 e 29 m con velocità delle onde S in generale inferiore rispetto alle vulcaniti (<700 m/s).



Anche le misure HVSR sono coerenti con questa situazione, infatti nella parte centrale dell'abitato di Abbadia intorno allo stadio fino all'ex area mineraria, dove gli spessori delle coltri detritiche sono maggiori e con elevate differenze di velocità tra gli strati superficiali e il substrato sismico, si verificano i maggiori effetti amplificativi con picchi spettrali tra 1 e 8 Hz e ampiezze superiori a 3; viceversa nelle zone di margine, vicino al contatto tra le formazioni, dove spessori e contrasti di velocità sono minori si osservano picchi spettrali meno pronunciati e frequenze distribuite in un intervallo leggermente più ampio.

La zona N di Abbadia, tra le località delle Ferraiole e di Esassetta, è interessata da un esteso corpo di frana che giace sulle formazioni di Sillano e delle Argille a Palombini. La massa mobilizzata è considerevole e interessa una vasta porzione del versante con profondità variabili fino a qualche metro dal p.c. Le misure HVSR eseguite presentano picchi spettrali modesti o assenza di picco, con frequenze distribuite tra 0.5 e 40 Hz, in accordo con la presenza di una massa detritica che presenta velocità crescenti con la profondità senza contrasti netti con il substrato sottostante.

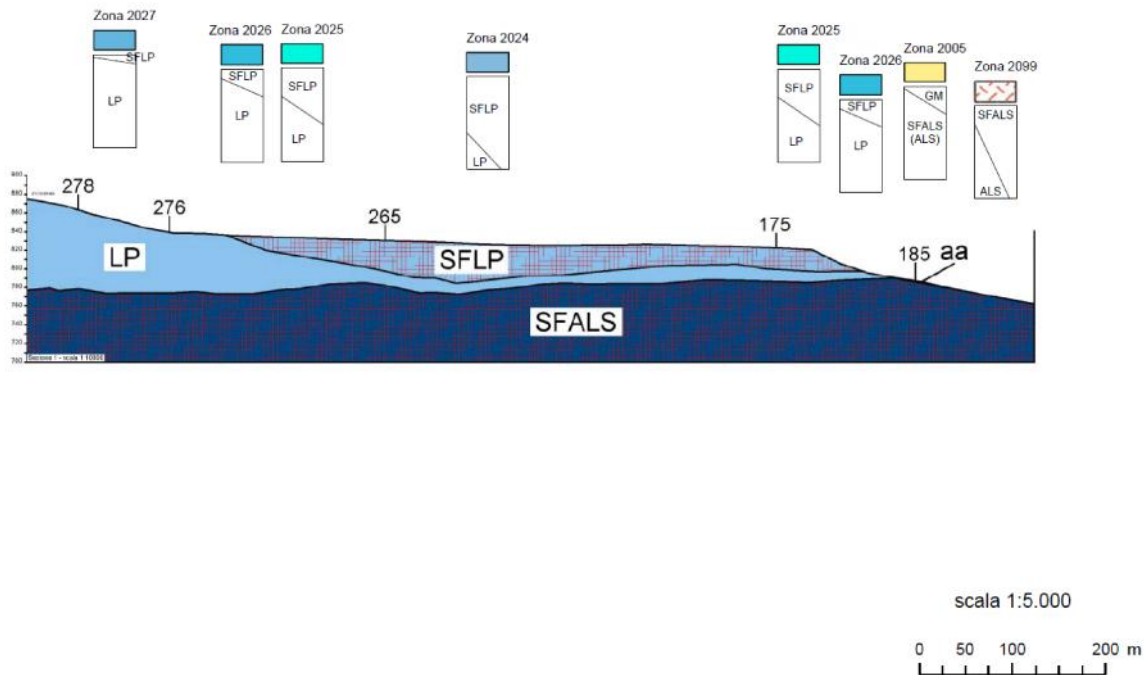
Infine la zona SE presenta una fascia di vulcaniti con coperture detritiche di spessore compreso tra 7 e 18 m ben inquadrata dalle misure HVSR che mostrano picchi spettrali quasi esclusivamente tra 8 e 20 Hz e ampiezze in molti casi superiori a 3.

In definitiva possiamo affermare che il substrato geologico rappresenta solamente in pochi casi anche il substrato sismico caratterizzato da valori di  $V_s$  francamente superiori a 800 m/s; perlopiù, invece, il substrato, ove presente entro profondità significative dalla superficie topografica, è caratterizzato da valori di  $V_s$  che non danno luogo a importanti contrasti di impedenza sismica rispetto ai livelli soprastanti, giustificando la relativa scarsità di misure HVSR con rilevante ampiezza dei picchi.

Dall'insieme dei dati raccolti è stata ricostruita la seguente sezione geologico-tecnica valida per il capoluogo (per i riferimenti e le altre sezioni relative alle singole frazioni comunali si rimanda alla cartografia allegata):



Comune di Abbadia San Salvatore  
Studio di Microzonazione Sismica (MS) – Livello 1  
Relazione illustrativa



### 3.2.1. Area artigianale Val di Paglia

La zona artigianale della Val di Paglia si trova nel fondo valle del fiume Paglia (in destra orografica) ed è costituita da una serie di costruzioni industriali/artigianali che si snodano lungo la via Cassia. Gli edifici sono stati realizzati sulle alluvioni del Paglia, che giacciono sulla formazione pliocenica delle Argille Azzurre.

I sondaggi geognostici eseguiti nelle aree dei depositi alluvionali hanno evidenziato spessori delle alluvioni intorno a 3 m. Pure la prospezione sismica appositamente eseguita per il presente studio ha individuato il limite stratigrafico tra alluvioni e argille tra 1 e 4 m di profondità. Le ESAC-MASW confermano la presenza di uno strato detritico a bassa velocità di spessore compreso tra 2.5 e 8 m, senza individuare il bedrock sismico neppure a profondità oltre i 50 m dal p.c.

Le misure HVSR evidenziano frequenze fondamentali comprese tra 0.1 e 34 Hz, tuttavia si osserva una netta prevalenza dei valori tra 2 e 4 Hz. I valori del rapporto H/V sono modesti se non trascurabili. Nel complesso le misure suggeriscono la presenza di una sismostratigrafia caratterizzata da modesti contrasti di velocità con coperture di spessore ridotto e picchi



condizionati da un contrasto di impedenza posto a profondità maggiore di 20 m dal p.c.. Solo nella zona S dove la valle si apre e diviene più ampia si rilevano alcune misure con ampiezza maggiore del rapporto H/V, pur in un contesto caratterizzato dalle medesime profondità dei limiti stratigrafici.

In definitiva, le argille plioceniche al di sotto delle coperture detritiche superficiali non mostrano incrementi nei valori di Vs tali da caratterizzarle come substrato sismico, ma vanno anch'esse ritenute parte delle coperture.

#### 4. ELABORATI CARTOGRAFICI

Gli elaborati cartografici sono stati realizzati direttamente in formato digitale mediante software GIS. Dal formato digitale, dopo opportuna vestizione dei vari livelli secondo gli standard, sono stati ricavati gli impaginati per la stampa in formato pdf in scala 1:5.000 (da stampare in formato A3), utilizzando per uniformità come base topografica la CTR in scala 1:10.000. Gli stralci sono stati riuniti in un unico file con i relativi cartiglio e legenda in apertura. Anche le sezioni interpretative sono fornite all'interno dello stesso file pdf in successione alla carta alla quale si riferiscono. Pertanto, l'elaborato originale e ufficiale deve ritenersi quello digitale nel formato shape. Si evidenzia comunque che le scale effettive degli elaborati sono legate a quelle del rilievo geologico – geomorfologico di base, che nel caso in esame è 1:10.000 (progetto CARG).

Gli elaborati predisposti per ognuna delle aree esaminate, oltre alla carta geologica e geomorfologica già citata, sono i seguenti:

- Carta delle indagini;
- Carta geologico tecnica per la microzonazione sismica (con relative sezioni interpretative);
- Carta delle frequenze fondamentali dei depositi;
- Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica.





#### 4.1. Carta delle indagini

Le indagini puntuali e lineari sono state preliminarmente inserite in un database Access Microsoft mediante l'utilità software SoftMS (v4) appositamente predisposto dal Dipartimento di Protezione Civile. Da questo sono state recuperate le informazioni per la realizzazione della relativa cartografia ed assegnata l'opportuna vestizione prevista dagli standard. Nella carta sono visualizzate anche le indagini multiple eventualmente presenti nello stesso punto di indagine.

La maggior parte delle indagini è relativa al capoluogo e all'area artigianale considerati nello studio (Tab. 4.1) ed è compresa nei relativi stralci in scala 1:5.000. In ogni caso, tutte le indagini sono comprese all'interno dei file digitali, anche qualora non compaiono negli impaginati di stampa.

Tab. 4.1 – Distribuzione delle diverse tipologie di indagine nelle aree esaminate

	S+SS	DH	LAB	SPT	SR	SL	MASW	ESAC	HVSR	DN+DS+DL	T
Capoluogo	49	8	13	38	18	1	15	15	370	36	20
Val di Paglia	5	-	-	5	1	-	7	7	34	3	-
altre	9	-	-	-	-	-	-	-	-	11	1
TOTALE	63	8	11	43	19	1	22	22	404	50	21

Ogni indagine è individuata nel database da un codice così composto (es. 052001P45SS53): prime 6 cifre, codice ISTAT che individua univocamente il Comune di Abbadia San Salvatore in ambito nazionale (052001); una lettera che indica se si tratta di indagine puntuale (P) o lineare (L); da una a tre cifre che indicano il progressivo dell'indagine (distinto per indagini puntuali e lineari); una o più lettere indicante la tipologia di indagine secondo lo Standard; da una a tre cifre rappresentanti il progressivo dell'indagine (distinto per indagini puntuali e lineari). Nelle carte predisposte per la



stampa i punti e le linee di indagine sono individuati dal solo numero progressivo.

Gli elaborati che illustrano i risultati di ciascuna indagine sono riportati in file digitali pdf denominati con il codice completo sopra descritto.

#### 4.2. Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica

La carta è stata realizzata sulla base della revisione critica dei rilievi geologici e geomorfologici disponibili, integrati dai risultati delle indagini preesistenti e appositamente eseguite. Lo scopo della carta è quello di raggruppare i litotipi individuati in unità litologico-tecniche sulla base delle loro caratteristiche fisico-meccaniche, soprattutto in relazione ai parametri che le caratterizzano da un punto di vista della risposta sismica (nel nostro caso essenzialmente la velocità delle onde di taglio). Sulla base delle indagini disponibili e delle considerazioni svolte circa il modello geologico di sottosuolo, possiamo affermare che il territorio comunale è estesamente interessato dalla presenza di fasce superficiali derivanti dall'alterazione dei litotipi lapidei che costituiscono il substrato, con spessori molto spesso significativi ai fini della risposta sismica (superiore a 3 m). Inoltre, nelle aree caratterizzate solamente dalle misure HVSR che non presentano picchi del rapporto H/V significativi, si ritiene che tale informazione da sola non sia sufficiente ad escludere la presenza di depositi di copertura del substrato rigido, anche perché talvolta ubicate nelle vicinanze di altre caratterizzate da picchi. Pertanto, in definitiva, non ritenendo di poter individuare con certezza l'affioramento in superficie del substrato rigido in nessuna area tra quelle esaminate, gli affioramenti delle formazioni litoidi segnalati dalla carta geologica sono stati suddivisi tra le unità SFALS (substrato costituito da un'alternanza di litotipi stratificati alterato e/o fratturato, alla quale sono stati attribuite le formazioni del Dominio Ligure – SIL e APA) e SFLP (substrato litoide alterato e/o fratturato, alla quale afferiscono le vulcaniti dell'Amiata – QRT).



I depositi marini pliocenici, rappresentati nelle aree esaminate dalle argille azzurre (FAA e FAAf) sono stati attribuiti ai terreni di copertura (unità geotecnica CL, argille inorganiche di medio-bassa plasticità, argille ghiaiose o sabbiose, argille limose, argille magre).

I depositi quaternari sono stati invece suddivisi tra l'unità GM (ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo), alla quale sono riferite le alluvioni attuali e terrazze e i detriti di falda e di versante, e l'unità ML (limi inorganici, sabbie fini limose o argillose limi argillosi di bassa plasticità) alla quale sono riferiti i depositi eluvio-colluviali individuati dalla carta geologica; questo in quanto in assenza di dati disponibili, si presume la scarsa rilevanza dei frammenti litoidi grossolani all'interno dei depositi eluvio-colluviali, solitamente caratterizzati piuttosto dalla preponderanza dei termini più fini (sabbie e limi) rispetto alle alluvioni e ai detriti di falda/versante.

Le Zone di Attenzione per instabilità di versante sono state distinte secondo la tipologia del cinematismo della frana (scorrimento, non determinato) e secondo lo stato di attività (attiva, quiescente, non determinato). Inoltre è stata individuata l'area delle vulcaniti come Zona di Attenzione per liquefazione, in funzione delle stratigrafie dei sondaggi esaminati che hanno mostrato la presenza di rilevanti spessori di sabbie in falda derivanti dall'alterazione delle vulcaniti medesime. A questo proposito si evidenziano le seguenti considerazioni (Linee Guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazione – LQ, v. 1.0, 2017):

- i livelli sabbiosi si rinvencono a profondità molto varie comprese tra il piano campagna e le massime profondità indagate dai sondaggi (anche oltre i 50 m), con spessori rilevanti;

- le curve granulometrie dei campioni prelevati rientrano quasi sempre nel fuso definito dalle NTC 2018 (AGI 2005) per l'occorrenza di tale fenomeno;

- le misurazioni del livello piezometrico in corrispondenza degli stessi sondaggi evidenziano come le vulcaniti, soprattutto in conseguenza del loro stato alterato/fratturato, siano sede di un acquifero libero (livello di falda entro i 15 m dal p.c. ove rilevato);



- le accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) sono maggiori di 0,1g;

- il territorio comunale ricade nella zona sismogenetica 921 (Mw max pari a 6,14) e entro 10 km dall'epicentro del Terremoto di Radicofani del 5/10/1777 con Mw di 5.04 (DBM11), pur avendo la disaggregazione della pericolosità sismica (v. pag. 10) evidenziato una magnitudo media di 4.8 per una distanza media di 7,7 km.

In definitiva si evidenzia che ricorrono tutte e tre le condizioni minime previste dalle linee guida del 2017 per il possibile verificarsi dei fenomeni di liquefazione.

Alcune aree limitate sono state poi individuate come Zone di Attenzione per sovrapposizione di instabilità differenti (di versante e per liquefazione). Non sono stati invece individuate Zone di Attenzione per deformazioni dovute a faglie attive e capaci, data la loro assenza nel territorio comunale.

Gli elementi lineari riportano infatti le faglie e i sovrascorrimenti della carta geologica come non attivi (in quanto non capaci). Nella carta sono infine riportate le forme di superficie (falde detritiche), e i punti di sondaggio, con riportate le profondità del substrato rigido intercettato o la profondità massima raggiunta dalla perforazione nel caso non lo abbia individuato. Non sono state rilevate invece misure della giacitura degli strati.

Per le due aree esaminate sono state ricavate anche le sezioni interpretative della carta Geologico tecnica a partire da quelle realizzate per la carta geologica e geomorfologica. Nelle sezioni sono individuate, con il relativo codice progressivo, le verticali delle indagini eseguite lungo o nei pressi della traccia e le colonne esplicative delle zone MOPS assegnate nella relativa carta.

#### 4.3. Carta delle frequenze fondamentali dei depositi

La carta riporta, mediante opportuna classificazione, le frequenze fondamentali e il relativo valore del rapporto H/V registrato in ognuno dei punti di acquisizione del rumore sismico. In particolare, il colore del simbolo è



riferito alla classe della frequenza fondamentale, la sua grandezza alla classe del valore del rapporto spettrale H/V (correlabile qualitativamente all'amplificazione dell'onda sismica). Come già ricordato in precedenza, il valore di frequenza fondamentale è in linea di massima inversamente proporzionale allo spessore delle coperture al di sopra del substrato rigido (bedrock sismico), mentre quello del rapporto H/V è correlabile qualitativamente all'amplificazione attesa del moto sismico da parte delle medesime coperture.

In totale sono stati esaminati 404 punti di misura (con 115 misure ripetute negli stessi punti) selezionando le frequenze più affidabili per la realizzazione della carta.

Gli intervalli di frequenza considerati per la classificazione, riferiti alle sole misure selezionate, sono i seguenti:

- NP – picco assente, nessuna frequenza fondamentale;
- $0 \text{ Hz} < f_0 < 3 \text{ Hz}$ ;
- $3.1 \text{ Hz} < f_0 < 5 \text{ Hz}$ ;
- $5.1 \text{ Hz} < f_0 < 8 \text{ Hz}$ ;
- $8.1 \text{ Hz} < f_0 < 20 \text{ Hz}$ ;
- $f_0 > 20 \text{ Hz}$ .

La scelta di tali classi è stata dettata dal fatto che sono state rilevate misure con frequenze fondamentali minori di 1 Hz e tra 1 e 2 Hz solo in cinque casi ognuna (tra l'altro con misure non totalmente affidabili), essendo invece la maggior parte delle frequenze  $f_0$  della classe 0 – 3 Hz comprese tra 2 e 3 Hz, suggerendo di modificare l'usuale classificazione adottata a livello regionale. Comunque la classe 3 – 5 Hz comprende la maggior parte delle misure che evidenziano almeno un picco. Da segnalare, comunque, anche la presenza di misure con  $f_0$  maggiore di 20 Hz, ad indicare la rilevanza di possibili effetti amplificativi relativi a modesti spessori di copertura. In Fig. 4.1 è illustrata la distribuzione delle misure nelle varie classi di frequenza.



Comune di Abbadia San Salvatore  
Studio di Microzonazione Sismica (MS) – Livello 1  
Relazione illustrativa

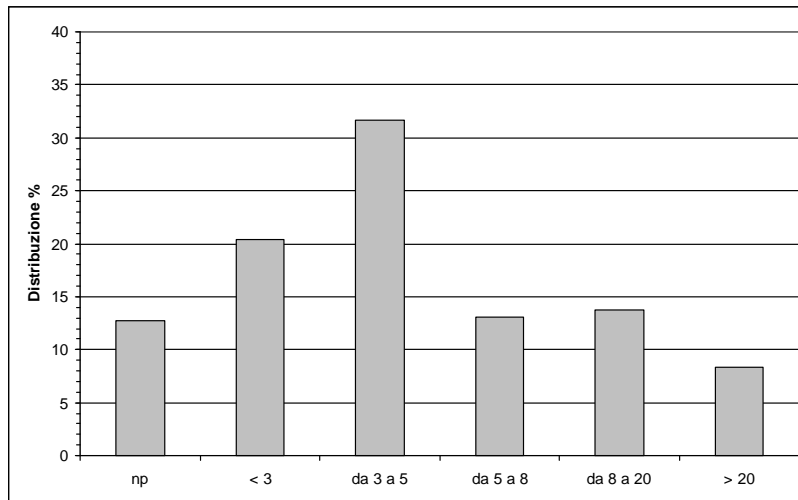


Fig. 4.1 – Distribuzione delle misure di microtremori HVSR per classe di frequenza

Gli intervalli dei valori del rapporto H/V stabiliti per la classificazione sono i seguenti:

- NP – picco assente, nessun valore H/V (in ogni caso minore di 2);
- $2,0 < H/V < 3,0$ ;
- $3,0 < H/V < 4,0$ ;
- $4,0 < H/V < 5,0$ ;
- $H/V > 5,0$ .

L'analisi ha rilevato che la maggior parte delle misure è caratterizzata da valori del rapporto spettrale H/V inferiore a 3, rilevando comunque anche casi con valori elevati (Fig. 4.2).



Comune di Abbadia San Salvatore  
Studio di Microzonazione Sismica (MS) – Livello 1  
Relazione illustrativa

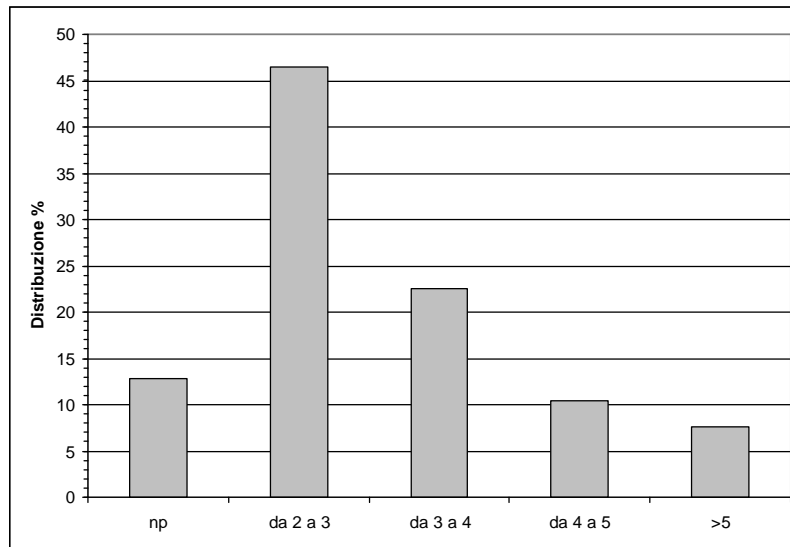


Fig. 4.2 – Distribuzione delle misure di microtremori HVSR per classe di rapporto H/V

In ogni caso dobbiamo evidenziare che le situazioni lito-stratigrafiche e logistiche/ambientali presenti nell'area esaminata sono tali da far ritenere non totalmente affidabili i picchi di diverse misure, soprattutto nei casi di picchi poco definiti (rientranti nella classe 2 – 3 di ampiezza H/V) e di picchi sospetti per possibili disturbi antropici (compresi gli eventuali disturbi ambientali). In particolare, nel SoftMS, sono state individuate 306 misure con attendibilità alta (valore parametro 1, affidabili), 209 misure con attendibilità media (valore parametro 2, da interpretare) e 4 misure di scarsa attendibilità (valore parametro 3, non affidabili). Si raccomanda pertanto di verificare ogni misura puntuale di interesse direttamente sul file Microsoft Access, nel quale la relativa tabella degli attributi riporta oltre alla classe di affidabilità, anche i commenti specifici.

Le informazioni riportate in questo elaborato sono state utilizzate sia per la ricostruzione del modello del sottosuolo, sia per la definizione delle zone omogenee dal punto di vista sismico della carta MOPS.



#### 4.4. Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)

L'obiettivo principale della carta è l'individuazione delle zone ove, sulla base di osservazioni geologiche e geomorfologiche e in relazione all'analisi dei dati geognostici e geofisici acquisiti, è prevedibile l'occorrenza di diverse tipologie di effetti prodotti dall'azione sismica (amplificazioni, instabilità di versante, ecc.). In tale ottica, sulla base del modello di sottosuolo ricostruito, la carta individua le aree suscettibili di amplificazione sismica distinguendole secondo la tipologia lito-stratigrafica, oltre alle aree potenzialmente instabili legate alla presenza di fenomeni franosi.

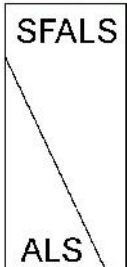
In considerazione di quanto evidenziato nella ricostruzione del modello di sottosuolo e nella realizzazione della carta litologico-tecnica per la microzonazione sismica, non possiamo attribuire con certezza alcuna area del territorio comunale alle zone stabili previste dalla normativa. Infatti, nelle aree dove si rileva il numero maggiore e la più ampia varietà di tipologia di indagini, queste concordano nell'individuare spessori dei materiali di alterazione del substrato rigido rilevanti ai fini della risposta sismica, anche laddove sarebbe meno ipotizzabile, come nei rilievi caratterizzati dall'affioramento di litotipi litoidi nella carta geologica. Inoltre, le sole misure di microtremori HVSR non sono state ritenute sufficienti ad escludere con certezza la presenza di tali coperture, anche nel caso di tracciati delle registrazioni sostanzialmente piatti. In conseguenza di ciò sono stati distinti gli affioramenti litoidi in due diverse classi geologico-tecniche (SFALS – alternanza di litotipi stratificati alterati e/o fratturati, SFLP – litotipi litoidi alterati e/o fratturati) e sono state individuate le seguenti zone omogenee nel territorio comunale, con indicati i relativi spessori medi delle fasce di alterazione superficiale o delle coperture detritiche:

- Zone suscettibili di amplificazione sismica, essenzialmente per fattori stratigrafici (contrasto di impedenza):





Zona 2099

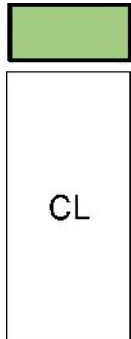


Alternanza di litotipi stratificati alterati e/ fratturati (SFALS) su eventuale substrato rigido (ALS)  
Profondità > 10 m

Raggruppa le aree caratterizzate dall'affioramento dell'unità geotecnica SFALS per la quale si può prevedere uno spessore anche oltre i 50 m; in ogni caso, anche se lo spessore di alterazione al di sopra dell'eventuale substrato intergo (ALS) dovesse essere minore (tra 10 e 50 m), non si prevedono in genere rilevanti effetti di amplificazione dell'onda sismica in quanto non si prevedono importanti contrasti di velocità tra i due litotipi, essendo tale substrato caratterizzato comunque da valori di Vs spesso inferiori a 800 m/s anche se "integro" (si pensi alla Formazione di Sillano, che ne costituisce la maggior parte). La zona caratterizza le aree esterne all'abitato a nord, est e sud del capoluogo. Le misure HVSR mostrano in genere assenza di picco oppure picchi poco definiti (ampiezza H/V tra 2 e 3) con frequenze molto varie. Sono presenti comunque locali situazioni di contrasti maggiori legati a coperture detritiche su substrato meno alterato (Vs massime anche superiori a 1000 m/s entro le profondità indagate al margine centro-orientale del capoluogo).



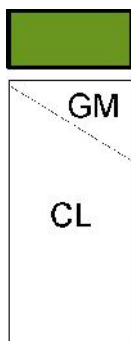
### Zona 2002



CL - Argille  
Profondità > 50 m

Comprende le aree di affioramento delle argille marine plioceniche (unità geotecnica CL), caratterizzate da spessori superiori a oltre 50 m. Tale zona è da assimilare a quelle caratterizzate da coperture detritiche senza la presenza di un substrato rigido (la velocità massima  $V_s$  registrata con le prove ESAC-MASW è di circa 600 m/s, con incremento all'aumentare della profondità). Per tale motivo, gli effetti amplificativi delle onde sismiche sono da considerarsi in genere limitati e legati soprattutto alla presenza di livelli più o meno addensati all'interno del medesimo litotipo. La zona è presente ai margini dell'area artigianale val di Paglia. Le misure HVSR mostrano picchi poco significativi ( $H/V$  minore di 3) con frequenze varie.

### Zona 2003



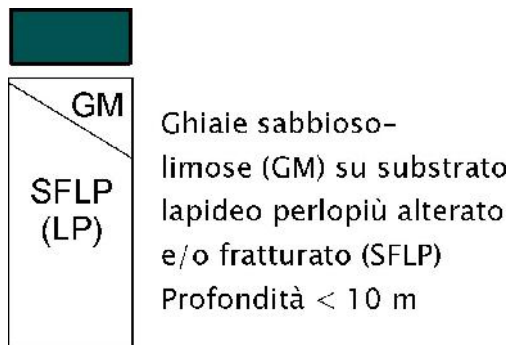
GM  
Chiaie sabbioso-  
limose (GM) su  
CL  
arglle (CL)  
Profondità < 10 m

Comprende l'area di affioramento dell'unità geotecnica GM (detriti di falda/versante e depositi alluvionali attuali e terrazzati) nel fondovalle



dell'area artigianale Val di Paglia al di sopra dell'unità CL che caratterizza la zona precedente. Gli spessori delle coperture sono in genere modesti (inferiori ai 10 m), ma come già detto l'unità CL non rappresenta un substrato rigido. Le velocità  $V_s$  risultano in genere comprese tra 200 e 600 m/s, non differenziandosi più di tanto tra copertura alluvionale e depositi marini sottostanti. Tuttavia possiamo notare che la porzione settentrionale della zona è caratterizzata da valori di frequenza delle misure HVSR compresi tra 3 e 5 con valori del rapporto H/V anche superiori a 4, mentre la porzione più meridionale presenta anche frequenze e valori di H/V superiori. Ciò, collegato al fatto che localmente sono stati rilevati entro le profondità indagate valori di  $V_s$  anche prossimi a 800 m/s (MASW 14), indica la possibile presenza di contrasti di impedenza sismica significativi tra coperture alluvionali e depositi marini o al loro interno, legati alle diverse condizioni di addensamento dei depositi, pur in mancanza del substrato rigido.

#### Zona 2004

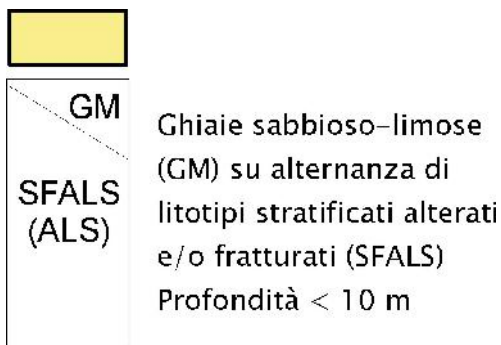


La zona è limitata alle aree caratterizzate dall'unità GM (detriti di falda/versante) al di sopra dell'unità SFLP (vulcaniti) del capoluogo. Si tratta di una zona piuttosto eterogenea per quanto attiene al comportamento sismico dei terreni; le coperture detritiche, infatti, presentano spessori variabili (comunque inferiori a 10 m e spesso inferiori a 5 m) così come variabile è lo spessore dello strato di alterazione del substrato (SFLP/LP). In



ogni caso, per analogia con le zone contermini caratterizzata da SFLP in affioramento, si prevede la presenza di un substrato rigido ( $V_s > 800$  m/s) entro i 50 m di profondità dal p.c.; rimane tuttavia la variabilità delle frequenze e dei valori di H/V che caratterizzano le misure HVSR di tale zona.

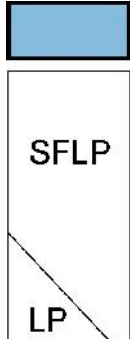
#### Zona 2005



La zona è limitata alle aree caratterizzate dall'unità GM (detriti di falda/versante) al di sopra dell'unità SFALS del capoluogo. Analogamente alla zona precedente, si tratta di una zona piuttosto eterogenea per quanto attiene al comportamento sismico dei terreni per la variabilità degli spessori delle coperture detritiche (comunque inferiori a 10 m e spesso inferiori a 5 m), mentre si suppone una minore influenza della variabilità degli spessori del substrato SFALS/ALS (valori di  $V_s$  massimi inferiori a 700 m/s entro le profondità indagate: vedi zona 2002). Tuttavia, anche in tal caso, pur non prevedendo la presenza generalizzata del substrato rigido entro profondità significative dal p.c., rimane la variabilità delle frequenze e dei valori di H/V che caratterizzano le misure HVSR di tale zona.



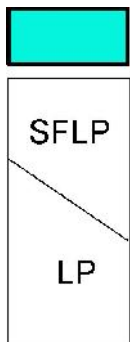
### Zona 2024\*



Strato di alterazione  
e/o fratturazione (SFLP)  
del substrato lapideo  
rigido (LP)  
Profondità > 30 m

La zona comprende gli affioramenti dell'unità geotecnica SFLP (essenzialmente le vulcaniti del Monte Amiata) con spessore superiore a 30 m; il substrato è costituito soprattutto dalla facies integra del medesimo litotipo (LP), ma non si esclude la presenza anche di ALS nelle aree marginali, con effetti analoghi sull'amplificazione delle Vs (effetti amplificativi in genere rilevanti). La zona caratterizza la porzione centrale dell'abitato di Abbadia intorno allo stadio, area caratterizzata dai sondaggi eseguiti per il progetto VEL. I valori di Vs dell'unità SFLP sono paragonabili a quelli delle coperture detritiche (compresi perlopiù tra 200 e 400 m/s). Le misure HVSR mostrano frequenze dei picchi perlopiù tra 1 e 5 Hz e valori di amplificazione H/V spesso superiori a 5.

### Zona 2025\*

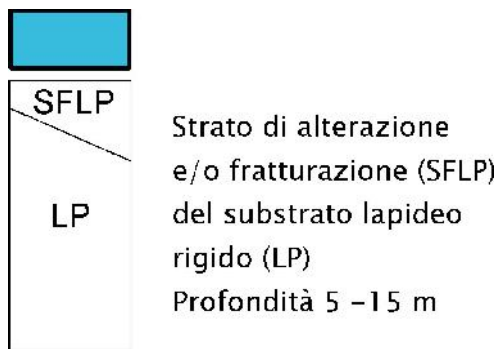


Strato di alterazione  
e/o fratturazione (SFLP)  
del substrato lapideo  
rigido (LP)  
Profondità 15 - 30 m



La zona è analoga alla zona precedente, comprende le aree caratterizzate da spessori dell'unità geotecnica SFLP compresi tra 15 e 30 m, sul substrato in genere integro (LP, rigido). La zona interessa la parte nord-ovest del capoluogo. Anche per essa si registrano anche valori amplificativi rilevanti (H/V superiore a 5), ma non generalizzati come nella zona precedente e le frequenze dei picchi delle misura HVSR sono comprese tra 3 e 8 Hz.

#### Zona 2026\*



Analoga alle precedenti, comprende le aree caratterizzate da spessori compresi tra 5 e 15 m al di sopra del litotipo integro (LP). La zona caratterizza la porzione meridionale dell'abitato. Le misure HVSR, con frequenze per la maggior parte superiori a 8 Hz, in genere mostrano picchi significativi (H/V anche superiore a 5).

#### Zona 2027\*





La zona è caratterizzata dai minori spessori dell'unità geotecnica SFLP, compresi tra 1 e 5 m. Lo spessore minimo indica la possibilità di assenza di contrasti di velocità delle onde sismiche con il substrato (assenza di picco nelle misure HVSR); tale assenza può essere legata anche alla presenza di substrato "integro" con bassi valori di  $V_s$  (ALS/SFALS, Formazione di Sillano). La zona interessa la porzione meridionale più esterna del capoluogo, compreso il nucleo storico (caratterizzato perlopiù da assenza di picchi nelle misure HVSR). Le misure HVSR, con frequenze più variabili rispetto alle altre zone in genere non mostrano picchi significativi (assenti o H/V inferiori a 3).

\* Tali zone non compaiono nello shapefile "Stab" in quanto tutte potenzialmente e interamente interessate da instabilità per liquefazione e quindi sono presenti solo come campitura dello shapefile "Instab".

- Zone di attenzione per instabilità, individuate soprattutto nel capoluogo:  
per instabilità di versante – caratterizzano ampie porzioni del territorio esaminato, a nord (frana di Esassetta) e a est - sud/est del capoluogo, ai margini delle aree maggiormente urbanizzate;  
per liquefazione – corrisponde alle aree caratterizzate dalla presenza delle vulcaniti (non solo in affioramento) i cui prodotti di alterazione sono spesso di natura sabbiosa e sede di una falda acquifera;  
per sovrapposizione di instabilità differenti – limitate aree di sovrapposizione dei due tipi di instabilità precedenti (frane che interessano aree marginali delle vulcaniti).

La carta individua, infine, le forme superficiali (falde detritiche) con le medesime informazioni presenti nella carta geologico tecnica per la microzonazione sismica.



## 5. QUALITÀ DEGLI ELABORATI CARTOGRAFICI

La valutazione della qualità della cartografia elaborata è effettuata mediante la procedura indicata nelle specifiche tecniche regionali di cui alla DGRT 741/2012. I parametri di ingresso per la valutazione quantitativa sono rappresentati dai dati disponibili (cartografie e indagini) per i quali sono previsti tre indicatori ciascuno. Ad ognuno degli indicatori viene assegnato un punteggio sulla base di una valutazione specifica. La somma dei punteggi dei singoli indicatori, ciascuno moltiplicato per il relativo peso attribuito, fornisce un indice percentuale che individuerà l'attribuzione a una delle quattro classi di qualità stabilite:

- Classe A, valori superiori al 75%;
- Classe B, intervallo valori 50-74%;
- Classe C, intervallo valori 25-49%;
- Classe D, valori inferiori al 25% .

Di seguito si riportano i punteggi di qualità relativi alle varie aree, secondo le indagini riepilogate in Tab. 4.1:

Capoluogo	70,3%	Classe B;
Val di Paglia	57,1%	Classe B;

Si evidenzia come l'esecuzione delle indagini abbia garantito il raggiungimento almeno di una classe di qualità B per entrambe le aree indagate.

## 6. CONFRONTO CON LA DISTRIBUZIONE DEI DANNI DEL PASSATO

La raccolta dei dati di sismologia storica, fatta a partire dai cataloghi disponibili, ha consentito di delineare un quadro rappresentativo dei





danneggiamenti a seguito degli eventi sismici più importanti. In particolare il catalogo CFTI riporta una dettagliata analisi dei danneggiamenti basata sulla raccolta delle fonti storiche come giornali, archivi parrocchiali, informative prefettizie, etc. Con riferimento ai terremoti più forti del catalogo, in particolare il terremoto del 10/09/1919 di Magnitudo equivalente pari a 5.3, i danni rilevati nel comune di Abbadia San Salvatore sono stati di lieve entità con crollo di alcuni camini e lesioni leggere ai fabbricati. Analoghi effetti o di minore entità sono da considerare per terremoti di minore magnitudo. Un raffronto con la distribuzione dell'edificato attuale rispetto a quello di inizio '900 consente di affermare che l'area soggetta ai maggiori effetti locali è stata urbanizzata solo a partire dal 1900 a seguito delle attività minerarie che hanno portato in Abbadia numerosi lavoratori con le relative famiglie. In precedenza il centro abitato era limitato al nucleo storico intorno all'Abbazia che risulta meno sensibile agli effetti di sito. Da considerare che il terremoto del 1 aprile 2000, di magnitudo vicina a quello del 1919, non ha provocato danni significativi nel comune di Abbadia. In definitiva i dati raccolti sembrano indicare nell'area ad Ovest del nucleo storico di Abbadia, densamente urbanizzata a partire dal 1900, quella maggiormente predisposta ad effetti locali, tuttavia i terremoti avvenuti a partire dal 1919 non hanno prodotto danni significativi.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- Albarello D. e Castellaro S. (2011). Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola. *Ingegneria Sismica*, 2, Suppl., 32-62.
- Bonnefoy-Claudet S., Cotton F., Bard P.-Y. (2006). The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. A literature review. *Earth-Sci. Rev.*, 79, 205–227.



- Gruppo di lavoro CPTI (2004). Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04), INGV, Bologna. DOI: 10.6092/INGV.IT-CPTI04. <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI04/>.
- Haghshenas E., Bard P.-Y., Theodulidis N., SESAME WP04 Team (2008). Empirical evaluation of microtremor H/V spectral ratio. B. Earthq. Eng., 6, 75–108.
- Ibs Von Seht M. & Wohleberg J. (1999). Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments. Bull. Seismol. Soc. Am., 89, 250–259.
- Locati M., Camassi R. e Stucchi M. (a cura di), 2011. DBMI11, la versione 2011 del Database Macrosismico Italiano. INGV, Milano, Bologna. DOI: 10.6092/INGV.IT-DBMI11. <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>.
- Nakamura Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the round surface. Quarterly Report of Railway Technical Res. Inst., Tokyo, 30, 25-33.
- SESAME (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations - measurements, processing and interpretation. European Commission – Research General Directorate SESAME European research project WP12. [http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Papers/HV\\_User\\_Guidelines.pdf](http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Papers/HV_User_Guidelines.pdf).