



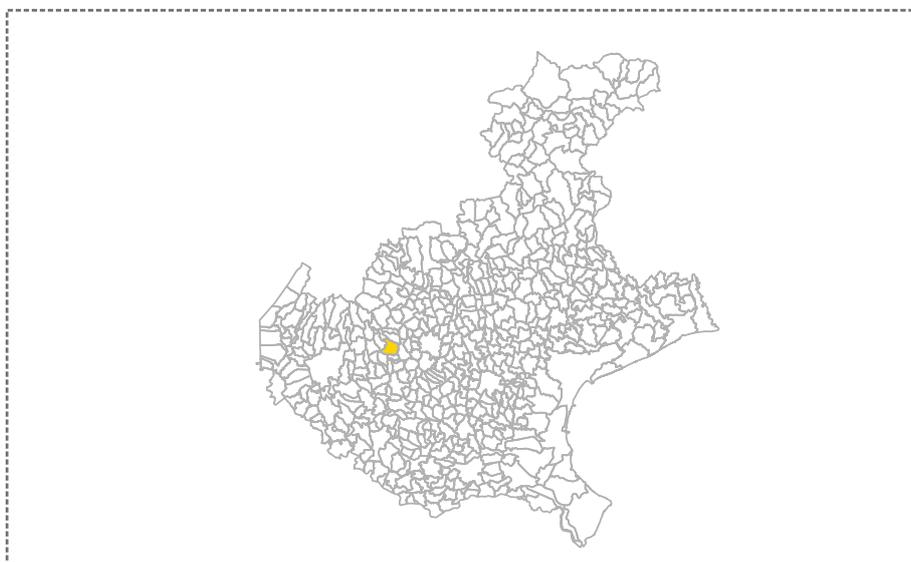
REGIONE DEL VENETO

MICROZONAZIONE SISMICA

Relazione illustrativa

Regione Veneto

Comune di Arzignano



<p>Regione REGIONE VENETO</p> <p>Segreteria Regionale per l'Ambiente</p>	<p>Soggetto realizzatore COMUNE DI ARZIGNANO</p> <p>Progettista: Dr. Geol. Matteo Collareda</p> <p>Collaboratore: Dr.ssa Geol. Claudia Tomassoli Dr.ssa Geol. Laura Guerra Dr. Geol Emanuele Mammoliti</p>	<p>Data Luglio 2022</p> <p>Livello 3</p>
--	--	--

INDICE

1	INTRODUZIONE	1
2	GENERALITÀ	2
3	ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA	4
3.1	Inquadramento geografico.....	4
3.2	Inquadramento geologico	6
3.3	Assetto geomorfologico	9
3.4	Assetto idraulico e idrogeologico locale	12
4	DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO	15
4.1	Inquadramento sismo-tettonico generale	15
4.2	Caratterizzazione sismogenetica locale	18
4.3	Sismicità storica	20
4.4	Faglie capaci e sorgenti sismogenetiche.....	23
4.5	Zonazione sismica nazionale	26
4.6	Pericolosità sismica di riferimento.....	28
5	MICROZONAZIONE SISMICA. PRINCIPI FONDAMENTALI E FINALITÀ	30
5.1	Introduzione.....	30
5.2	La natura del problema	30
5.3	Finalità e livelli di approfondimento	32
6	DATI GEOTECNICI E GEOFISICI DA INDAGINI PREGRESSE E DI NUOVA REALIZZAZIONE.....	33
6.1	Indagini pregresse e di nuova realizzazione	33
6.2	Metodologia di elaborazione delle nuove indagini	33
6.3	Modello geosismico del sottosuolo. Interpretazione e incertezze	39
7	ELABORATI CARTOGRAFICI.....	41
7.1	Carta delle indagini (Livello 1).....	41
7.2	Carta delle frequenze	42
7.3	Carta geologico-tecnica (Livello 1).....	45
7.4	Carta delle microzonee omogenee in prospettiva sismica (Livello 1).....	46
7.5	Carta della pericolosità sismica locale (CPSL)	51
8	APPROFONDIMENTI DI LIVELLO 3	53
9	VERIFICA DELLA STABILITÀ DEL VERSANTE IN CONDIZIONI SIMSICHE MEDIANTE METODO PSEUDO-STATICO DI NEWMARK	66
10	PROPOSTA PER LE NORME TECNICHE OPERATIVE (NTO)	73
	Art.X Riduzione del rischio sismico	73
11	REDAZIONE CARTOGRAFICA E CREAZIONE BASI INFORMATIVE	74
12	BIBLIOGRAFIA	77
13	ALLEGATI FUORI TESTO	78

Dott. Geol. Matteo Collareda con la collaborazione di:	<i>Dott.ssa Claudia Tomassoli</i> <i>Dott.ssa Laura Guerra</i> <i>Dott. Geol. Emanuele Mammoliti</i>
--	--

1 INTRODUZIONE

Tra i principali compiti che la Regione Veneto svolge in materia ambientale e di governo del territorio vi è quello di pianificare e programmare strumenti diretti alla mitigazione dei rischi naturali e antropici con l'obiettivo di favorire trasformazioni positive nella vita delle persone e una migliore sostenibilità ambientale.

I rischi naturali possono essere mitigati attraverso azioni preventive, come la corretta gestione del territorio da parte delle amministrazioni competenti. Attendere un evento sismico per intervenire in fase di emergenza, aumenta esponenzialmente il costo di gestione degli interventi e delle successive ricostruzioni. Al contrario, operare in modo preventivo riduce i costi di gestione in fase di emergenza, poiché agire sulla mitigazione del rischio diminuisce alla fonte il loro "peso" economico e sociale sull'ambiente e sulla popolazione.

Procedere in modo preventivo, quindi, significa sviluppare una serie di norme, linee guida e comportamenti operativi/educativi finalizzati alla gestione dei rischi naturali, alla riduzione generale dei costi sociali e della loro ricaduta sulla popolazione.

La Regione Veneto, da diversi anni, ha attivato una serie di iniziative di tipo normativo e tecnico-operativo per conseguire efficaci progressi sulla conoscenza dei fenomeni naturali del proprio territorio legati alla geologia, con l'obiettivo di attivare azioni efficaci in materia di riduzione dei rischi naturali, con particolare riguardo al rischio sismico.

Gli studi preventivi in campo sismico permettono di identificare aree in cui la pericolosità sismica raggiunge livelli che possono pregiudicare la sostenibilità del territorio, sia in termini di vite umane, sia economici e sia di degrado ambientale.

Per Microzonazione Sismica (MS) si intende la "valutazione della pericolosità sismica locale attraverso l'individuazione di zone del territorio caratterizzate da comportamento sismico omogeneo".

In sostanza, la MS individua e caratterizza le zone stabili, le zone stabili suscettibili di amplificazione locale del moto sismico e le zone suscettibili di instabilità: è ormai noto che lo stesso evento sismico può provocare scuotimenti decisamente differenti in dipendenza degli spessori e delle qualità dei terreni posti a copertura del substrato roccioso, delle caratteristiche morfologiche del sito e, inoltre, è riconosciuto che gli effetti di un terremoto variano col variare delle condizioni geologiche in cui esso si sviluppa.

Le caratteristiche geologiche del territorio possono alterare localmente e in maniera evidente l'azione sismica. Recentemente, anche in Italia (ad esempio Umbria-Marche, 1997 - Salò, 2004 - L'Aquila, 2010 - Modenese, 2012), sono stati evidenziati livelli di danneggiamento estremamente diversi in edifici ubicati a breve distanza tra loro e aventi all'incirca le stesse caratteristiche strutturali. In alcune di queste località (ad esempio Umbria-Marche, 1997) sono state effettuate registrazioni accelerometriche durante un *aftershock*, che hanno mostrato come i livelli di scuotimento su siti in pianura, su terreni sciolti, siano stati amplificati di oltre il doppio rispetto a siti su roccia e, inoltre, abbiano avuto una durata molto più lunga.

Gli studi di MS hanno l'obiettivo di razionalizzare la conoscenza di questi fenomeni restituendo informazioni utili per chi deve pianificare o realizzare interventi sul territorio.

Dott. Geol. Matteo Collareda	<i>Dott.ssa Claudia Tomassoli</i>
con la collaborazione di:	<i>Dott.ssa Laura Guerra</i> <i>Dott. Geol. Emanuele Mammoliti</i>

2 GENERALITÀ

La Microzonazione Sismica (MS) è uno strumento molto utile ai fini della prevenzione sismica e della valutazione del rischio sismico, per il governo del territorio, per la progettazione e per la pianificazione per l'emergenza. La MS ha lo scopo di riconoscere ad una scala sufficientemente grande (scala comunale o subcomunale) le condizioni locali che possono modificare sensibilmente le caratteristiche del moto sismico atteso o possono produrre deformazioni permanenti rilevanti per le costruzioni e le infrastrutture.

In sostanza, lo studio di MS viene sintetizzato in una carta del territorio nella quale sono indicate:

- le zone in cui il moto sismico non viene modificato rispetto a quello atteso in condizioni ideali di roccia rigida e pianeggiante e, pertanto, gli scuotimenti attesi sono equiparati a quelli forniti dagli studi di pericolosità di base;
- le zone in cui il moto sismico viene modificato rispetto a quello atteso in condizioni ideali di roccia rigida e pianeggiante, a causa delle caratteristiche litostratigrafiche del terreno e/o geomorfologiche del territorio;
- le zone in cui sono presenti fenomeni di deformazione permanente del territorio, attivi o potenzialmente inducibili/attivabili in caso di sisma (instabilità di versante, liquefazioni, fagliazione superficiale, cedimenti differenziali, ecc.).

In funzione dei diversi contesti e dei diversi obiettivi, gli studi di MS possono essere effettuati a vari livelli di approfondimento, con complessità e impegno crescenti, passando dal Livello 1 fino al Livello 3:

- il **Livello 1** è un livello propedeutico ai veri e propri studi di MS, in quanto consiste in una raccolta di dati preesistenti, elaborati per suddividere il territorio in microzone qualitativamente omogenee rispetto alle zone sopra descritte;
- il **Livello 2** si propone di quantificare l'effetto sismico proprio di ogni zona omogenea individuata nel Livello 1, utilizzando allo scopo ulteriori e mirate indagini, ove necessario, e definisce la Carta di Microzonazione Sismica;
- il **Livello 3** restituisce una Carta di Microzonazione Sismica con approfondimenti su tematiche o aree particolari.

Tali studi sono di fondamentale importanza nella pianificazione al fine di:

- orientare la scelta di aree per nuovi insediamenti;
- definire gli interventi ammissibili in una data area;
- programmare le indagini e i livelli di approfondimento;
- stabilire gli orientamenti e le modalità di intervento nelle aree urbanizzate;
- definire le priorità di intervento.

Nella pianificazione d'emergenza, sia di livello comunale che provinciale, gli studi di MS consentono una migliore e consapevole individuazione degli elementi strategici di un piano di emergenza e, in generale, delle risorse di protezione civile.

La conoscenza dei possibili effetti locali indotti da un evento sismico su un territorio contribuisce a:

- scegliere opportunamente le aree in cui si dovranno posizionare le strutture di emergenza e gli edifici strategici;
- individuare le strutture e le infrastrutture che necessitano di specifiche analisi, per definirne il grado di adeguamento necessario ad evitarne il collasso in caso di sisma e, quindi, per non compromettere le loro funzioni di pubblica utilità.

Dott. Geol. Matteo Collareda	<i>Dott.ssa Claudia Tomassoli</i>
con la collaborazione di:	<i>Dott.ssa Laura Guerra</i> <i>Dott. Geol. Emanuele Mammoliti</i>

Il presente studio è stato svolto ad un Livello 3 di approfondimento, secondo le modalità richieste dalle Linee Guida Regionali approvate con D.G.R.V. 1572 del 03/09/2013. Inoltre, il lavoro si presenta come un approfondimento del Livello 1, condotto nel 2012 e del quale si riprendono le parti generali tutt'ora valide ed eventualmente aggiornate alle ultime versioni.

La metodologia prevede che il Livello 1 di approfondimento sia esteso a tutto il territorio comunale, ad esclusione delle zone SIC e ZPS, in sede di redazione del P.A.T. mentre il Livello superiore di approfondimento, a supporto del P.I. e PUA, dev'essere condotto sulle parti di territorio suscettibili di amplificazione sismica individuate nello studio di Livello 1 (e per le quali si prevedono trasformazioni urbanistiche del territorio che comportano un incremento dei carichi urbanistico/insediativi) e per il territorio compreso nel perimetro del centro storico, nelle aree urbanizzate e di futura espansione.

In accordo con il Comune, visti i risultati già emersi con il livello 1, sono state definite le aree in cui estendere le analisi di approfondimento per il Livello 3, tenendo conto dell'intensità degli insediamenti urbani e dei futuri ambiti di espansione urbanistica forniti dall'ufficio tecnico.

Allo scopo di definire ancora più nel dettaglio le caratteristiche sismiche dei terreni del sottosuolo **sono state aggiunte per il presente lavoro ulteriori indagini geognostiche e geofisiche** (Cap. 6) nelle aree di maggiore interesse recuperate dall'archivio del sottoscritto e realizzate ex-novo. Inoltre, sono state analizzate e quantificate le possibili amplificazioni del moto sismico di base (Livello 3 di approfondimento) e valutate le potenziali instabilità sismo-indotte presenti nel territorio comunale.

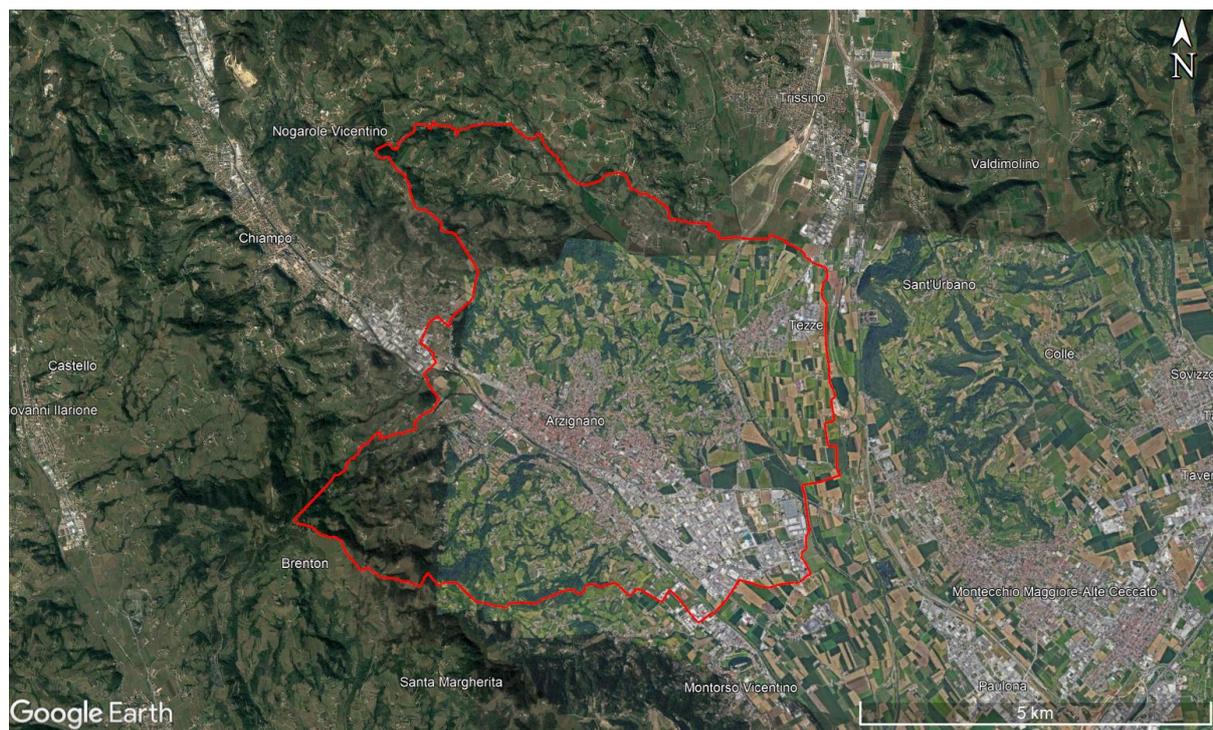
3 ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA

Nel presente capitolo vengono illustrate le principali caratteristiche geomorfologiche, litologico-stratigrafiche ed idrogeologiche del territorio oggetto di analisi, basate sullo studio di microzonazione sismica di Livello 1 del Comune di Arzignano redatto nel 2012, e sulla relazione illustrativa e sulle tavole del piano conoscitivo geologico del P.A.T., redatto nel 2015, a cui si fa riferimento per ogni approfondimento.

Tuttavia, si precisa che, in seguito agli aggiornamenti di alcuni database a cui ci si riferisce nelle pagine seguenti, si è ritenuto opportuno modificare ed aggiornare le informazioni relativi ad essi qualora si fossero discostate dalle precedenti versioni.

3.1 Inquadramento geografico

Il comune di Arzignano ha un'estensione di circa 34 km² e si trova nella porzione occidentale della provincia di Vicenza. Si colloca sui Monti Lessini Orientali e comprende la parte terminale di due importanti valli: la valle del T. Chiampo e la valle del T. Agno che diventa fiume Guà dopo l'abitato di Tezze di Arzignano.



Le unità morfologiche che caratterizzano il territorio sono: versante collinare, fondovalle e pianura.

- Versante collinare

La morfologia collinare occupa circa la metà dell'intero territorio ed è frutto di un modellamento del reticolo idrografico su un substrato di rocce prevalentemente tenere che hanno dato origine a superfici morbide, ondulate e pendenze dolci, localmente modificate con terrazzamenti per l'adeguamento alle esigenze agricole locali. Bruschi cambi di pendenza associati a scarpate ad elevata acclività si possono trovare in corrispondenza del substrato compatto costituito da rocce vulcaniche o calcaree. Il raccordo tra rilievo collinare e fondovalle è graduale e mascherato da una copertura uniforme di terreni argillosi e di depositi di conoide alluvionale.

Dott. Geol. Matteo Collareda	<i>Dott.ssa Claudia Tomassoli</i>
con la collaborazione di:	<i>Dott.ssa Laura Guerra</i> <i>Dott. Geol. Emanuele Mammoliti</i>

- Fondovalle del torrente Chiampo

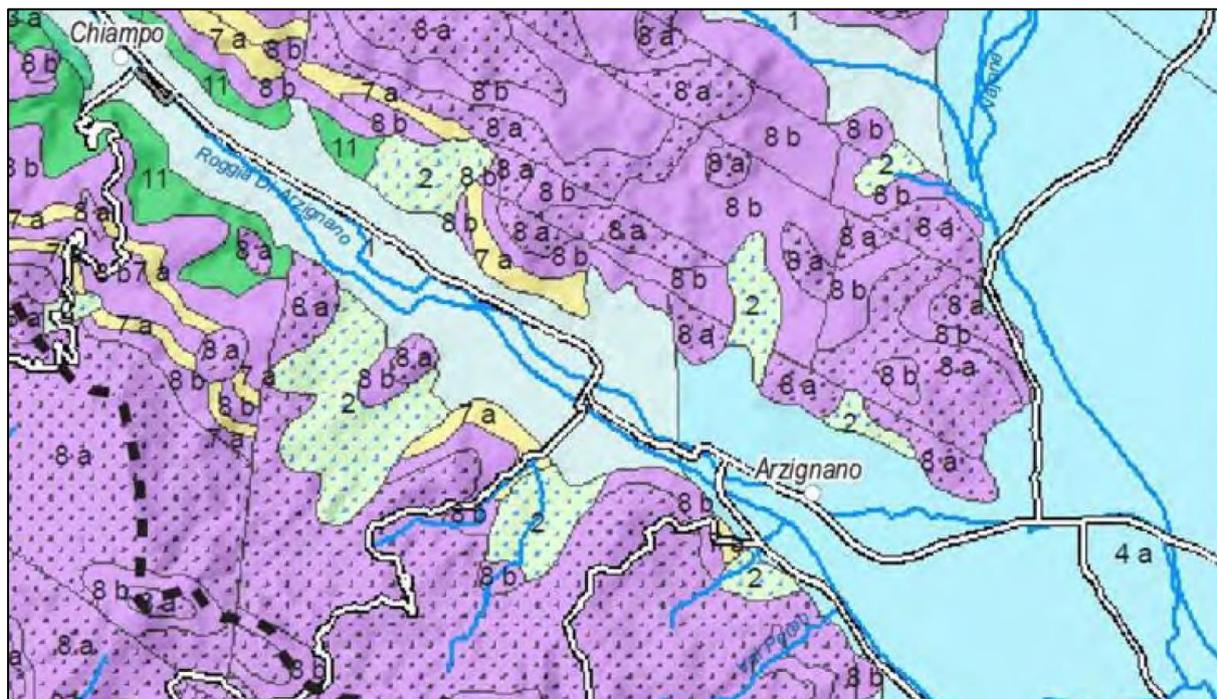
È un fondovalle con direzione allungata in senso NE-SW stretto nella parte alta, a confine con Nogarole Vicentino e che si allarga progressivamente verso l'alta pianura alluvionale. Il torrente scorre a ridosso del versante destro della valle dove, per alcuni brevi tratti, marca il passaggio netto tra il fondovalle sub-pianeggiante e la scarpata del rilievo. In corrispondenza dello sbocco delle valli secondarie, il passaggio tra il rilievo collinare ed il fondovalle è contornato da una fascia di raccordo a debole pendenza e costituita dalle conoidi generate dagli affluenti secondari del torrente Chiampo.

- Fondovalle del torrente Restena

Il fondovalle del torrente Restena si estende con direzione NW-SE occupando il settore nord-orientale del territorio comunale. È delimitato dai rilievi collinari e confluisce nel fondovalle del t. Agno in corrispondenza delle Rotte del Guà. È costituito da depositi fini limo-sabbioso-argillosi interdigitati con i depositi argillosi pedecollinari mentre in corrispondenza dello sbocco in pianura è presente un'ampia conoide alluvionale che ha in parte deviato verso nord l'alveo del torrente. L'abbondante presenza di acque proveniente dai versanti della valle e di terreni superficialmente impermeabili nel fondovalle è causa di frequenti ristagni idrici in particolare nella parte terminale della valle del Restena.

3.2 Inquadramento geologico

Per un inquadramento generale del territorio studiato si allega un estratto della Carta Geologica della Provincia di Vicenza da cui risulta chiaramente come la litologia prevalente sia data da formazioni vulcaniche terziarie in ambito collinare e da depositi alluvionali costituiti da ghiaie e sabbie nel fondovalle.



Estratto Carta Geologica della provincia di Vicenza

LEGENDA

- 1 - Depositi alluvionali, fluvioglaciali, lacustri e palustri (Quaternario)
- 2 - depositi eluviali, colluviali, detritici e di frana (Quaternario)
- 4a - Ghiaie e sabbie prevalenti (Quaternario)
- 7a - FORMAZIONE DI CALVENE E FORMAZIONE DI SALCEDO
Calcarei nummulitici, calcareniti, calcari di scogliera, arenarie, marne (Oligocene med. - Eocene sup.)
- 8a - Basalti di colata, filoni e camini di lava (Oligocene - Paleocene sup.)
- 8b - laloclastiti, tufi e breccie d'esplosione (Oligocene - Paleocene sup.)
- 11 - Calcari, calcari argillosi e marne - (Eocene inf. - Cretaceo sup.)
- 13a - Calcari e calcari argillosi selciferi, con intercalazioni di calcareniti e breccie calcaree (Cretaceo sup. - Malm)
- 14 - Calcari nodulari e selciferi, argilliti, con intercalazioni di calcareniti e breccie calcaree (Malm - Dogger)
- 16 - Calcari oolitici ed encriniti, calcari con intercalazioni marnose, dolomie (Dogger inf. - Lias sup.)

Il territorio studiato si colloca nei Lessini orientali, caratterizzati dalla presenza di formazioni sedimentarie e vulcaniche di età compresa tra l'Eocene medio e sup. La prima fase vulcanica (Paleocene sup. - Eocene medio) è quasi interamente sottomarina con ampie colate di lava, tufi subacquei e ialoclastiti mentre il ciclo successivo (Eocene medio) inizia con lave subacquee e si conclude in condizioni subaeree.

Nell'Eocene inferiore, in concomitanza con un periodo di stasi dell'attività vulcanica, iniziarono a sedimentarsi all'interno del semigraben depositi calcarei di mare relativamente basso (Calcarei nummulitici). Questa situazione di stasi, che ha inoltre favorito la nascita di isolotti di origine vulcanica, è perdurata fino all'Eocene medio, periodo in cui l'attività vulcanica riprende il sopravvento riempiendo lentamente il semigraben. All'inizio dell'Eocene superiore l'area dei Lessini orientali si trova in condizioni di emersione. Una successiva trasgressione marina ha dato origine ad un complesso di conglomerati, marne e calcareniti che costituisce la Formazione di Priabona.

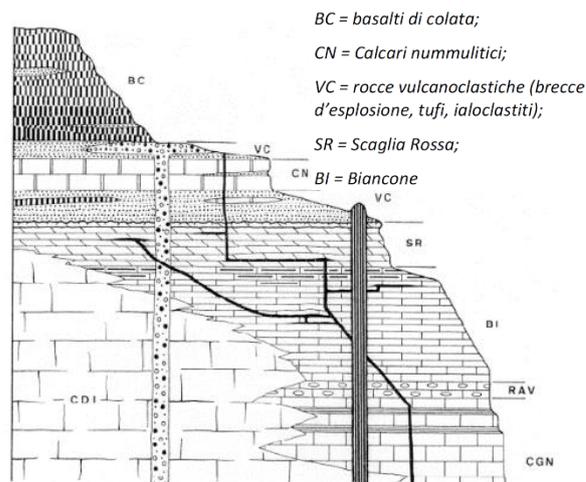
Il territorio del Comune di Arzignano è caratterizzato dalla successione stratigrafica riportata nella sezione schema stratigrafico riportato di fianco. Rispetto all'intera successione stratigrafica, nel Comune affiorano soltanto le potenti formazioni vulcaniche, riferibili al vulcanismo basaltico del Paleogene nel Veneto occidentale (BC e VC), alle quali si intercalano livelli calcarei eocenici detti "Calcarei nummulitici".

Le rocce vulcaniche (BC e VC) affiorano in ampie aree sui due versanti della valle del Chiampo a partire dal tetto della Scaglia Rossa e hanno potenza media di circa 200 metri; sono di età compresa tra il Paleocene e l'Oligocene e sono caratterizzate da prodotti a chimismo basaltico. Alla spiccata uniformità di chimismo di queste rocce si contrappone la grande variabilità dei prodotti vulcanici, sia in senso laterale che verticale, in rapporto al meccanismo di formazione e all'ambiente, in un'alternanza di basalti di colata, tufi, ialoclastiti e brecce d'esplosione. Da notare come queste rocce vulcaniche siano molto spesso alterate e non di rado argillificate e pertanto facilmente erodibili; ciò determina, nelle loro aree di affioramento, una morfologia piuttosto dolce e di norma non affiorano direttamente alla superficie, ma sono ricoperte da una coltre eluviale e colluviale argillosa formata dalla degradazione colluviale delle vulcaniti stesse.

I calcarei nummulitici (simbolo CN) sono rocce compatte di età medio-eocenica e rappresentano i sedimenti calcarei organogeni depositatisi durante le fasi di quiescenza dell'attività vulcanica. La loro potenza totale è di circa 30 metri, mentre, tenendo conto delle intercalazioni delle vulcaniti, la serie eocenica raggiunge lo spessore di oltre 100 metri. La stratificazione dei calcarei è poco visibile, e i banchi hanno una potenza variabile dai 2 agli 11 metri senza alcuna interruzione. Affiorano limitatamente in via Tordara, nella scarpata a monte del centro sportivo, in via S. Zeno e nella parte bassa del M. Main dove i calcarei nummulitici sono stati coltivati come pietra ornamentale e di taglio.

Le coperture e gli accumuli sono largamente rappresentate nel comune di Arzignano. Di primaria importanza è la presenza della copertura eluviale e colluviale delle rocce vulcanoclastiche costituita da materiale parzialmente argilloso derivante dalla degradazione delle sottostanti vulcaniti che si trovano a profondità variabile da qualche decimetro ad alcuni metri. Questi materiali oltre ad essere abbondantemente presenti al di sopra delle vulcaniti si trovano accumulati sotto forma di colluvium ai piedi dei rilievi collinari formando ampie fasce argillose pedemontane a bassa pendenza che caratterizzano ampiamente il territorio comunale.

I materiali di origine alluvionale presenti nel territorio comunale si distinguono in due tipologie: i terreni alluvionali ghiaioso-sabbiosi del Chiampo e del Guà, ed i terreni prevalentemente argilloso-



BC = basalti di colata;

CN = Calcarei nummulitici;

VC = rocce vulcanoclastiche (brecce d'esplosione, tufi, ialoclastiti);

SR = Scaglia Rossa;

BI = Biancone

VC

SR

BI

RAV

CGN

limosi delle conoidi di deiezione. I primi sono costituiti da materiale grossolano con presenza di ciottoli e talora di massi e trovanti, immersi in una matrice limoso-argillosa variabile in percentuale dal 5% al 20%, individuabile anche sottoforma di intercalazioni lenticolari discontinue. Essi costituiscono i cosiddetti “materassi alluvionali” del Chiampo e del Guà e possono inglobare lenti di argilla di spessore ridotto e distribuzione discontinua. Lo spessore del materasso alluvionale è notevole: varia da 45 m a 75 m in corrispondenza del centro di Arzignano e fino agli 85-90 metri all’altezza della zona Industriale, mentre per l’area dell’Agno-Guà gli spessori risultano maggiori superando anche i 100 metri. Nelle alluvioni del Chiampo sono presenti esclusivamente elementi calcarei, calcareo-dolomiti e basaltici, mentre in quelle dell’Agno-Guà compaiono anche, sia pur in subordine, elementi filladici e porfirici, provenienti dal bacino di Recoaro. La seconda tipologia di materiale alluvionale è costituita da depositi torrentizi ad alto contenuto argilloso in cui gli elementi grossolani sono prevalentemente basaltici.

Per quanto riguarda gli accumuli di frana, nel territorio collinare sono presenti depositi costituiti da coltri superficiali argillose e detritiche, più o meno spesse, generate dalla disgregazione ed alterazione dei litotipi vulcanoclastici, caratterizzate da movimenti traslativi e rotazionali, ai quali si aggiungono estese aree instabili per deformazione plastica gravitativa che coinvolgono quasi ovunque nel territorio comunale le coltri argillose colluviali.

Carta Litologica del Piano di Assetto del Territorio

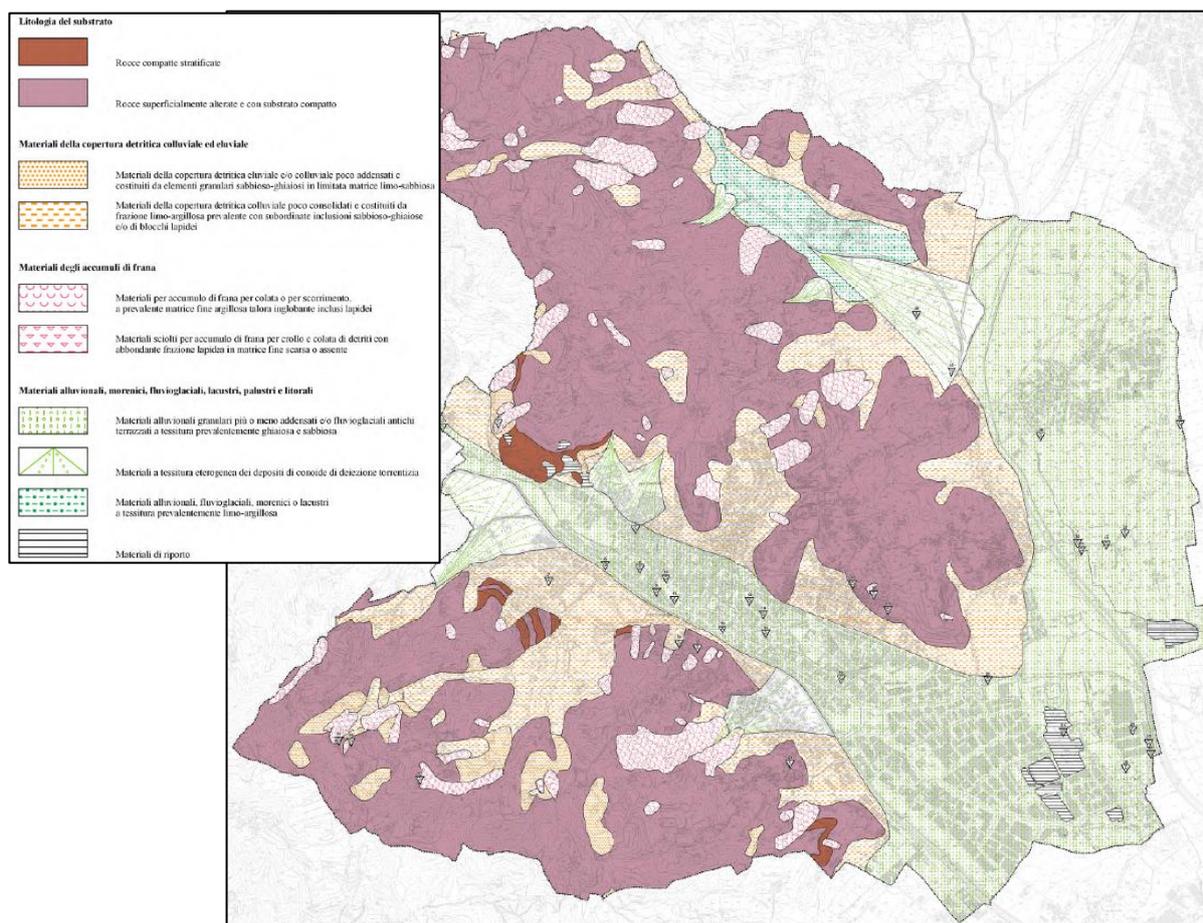


Tavola c050101 Carta Litologica del PAT

Dott. Geol. Matteo Collareda	<i>Dott.ssa Claudia Tomassoli</i>
con la collaborazione di:	<i>Dott.ssa Laura Guerra</i> <i>Dott. Geol. Emanuele Mammoliti</i>

3.3 Assetto geomorfologico

Da un punto di vista morfologico i 2/3 del territorio comunale di Arzignano sono occupati da rilievi collinari e solamente 1/3 è occupato da aree di fondovalle pianeggianti. La massima altitudine viene raggiunta nei pressi del Monte Calvarina con il valore di 630 m s.l.m., la minima altitudine è invece di soli 76 m s.l.m. e la si ha in corrispondenza dell'impianto di depurazione di Acque del Chiampo, situato nei pressi del confine comunale con il Comune di Montorso.

Nelle aree pianeggianti di fondovalle si distinguono con difficoltà quelle di pertinenza del Fiume Chiampo da quelle inerenti il bacino del Fiume Agno-Guà dove un possibile orlo di terrazzo fluviale è presente in località "La Busa". Un altro residuo di terrazzo fluviale è rinvenibile nella parte vecchia dell'abitato di Arzignano. Entrambe le forme hanno un'altezza inferiore ai 15 m.

In generale la morfologia del paesaggio nell'area di interesse è intensamente interconnessa con le caratteristiche geolitologiche del substrato e l'assetto tettonico: i depositi piroclastici e i loro prodotti di alterazione danno origine a forme dolci, poco acclivi, mentre in corrispondenza delle rocce basaltiche si hanno versanti più acclivi e cime quasi tabulari. Per quanto concerne la morfologia fluviale, il reticolo di drenaggio si presenta molto sviluppato con un andamento subdendritico. L'abbondante ruscellamento concentrato dà origine a numerose vallette ed incisioni in cui si verificano fenomeni di erosione attiva e regressiva.

Le incisioni nella loro parte terminale spesso assumono una forma più morbida e danno luogo a piccole conoidi di deiezione di natura detritico argillosa. Dal punto di vista del dissesto idrogeologico, il Comune di Arzignano è caratterizzato da una diffusa instabilità concentrata principalmente lungo il versante nord della dorsale Calvarina-Segan-Galda in destra idrografica del Fiume Chiampo e nei pressi della Località Pugnello. Si tratta in genere di fenomeni che coinvolgono perlopiù le coltri superficiali argillose caratterizzanti le coperture eluviali e colluviali. Si presentano sotto forma di scorrimenti rotazionali e/o colamenti attivati dalla presenza dell'acqua. L'acqua è da considerare il fattore scatenante principale e agisce come addizionale del carico statico e come fattore peggiorativo delle caratteristiche geotecniche (essenzialmente diminuendo i valori di coesione ed angolo di attrito) oltre che come agente erosivo.

L'erosione attiva e regressiva alla testa dei corsi d'acqua dà origine a modesti fenomeni di instabilità dei versanti generati da erosioni al piede.

Forme strutturali e vulcaniche

L'ampia diffusione di terreni vulcanici e della copertura di alterazione degli stessi rende difficoltosa l'individuazione delle eventuali lineazioni tettoniche quali faglie e fratture che possono aver interessato il territorio. Faglie e fratture spesso hanno determinato l'orientazione delle vallette ed in alcuni casi hanno provocato un'intensa fratturazione della roccia modificandone le caratteristiche meccaniche, il grado di degradabilità e le modalità della circolazione idrica sotterranea. È stato posto in corrispondenza del passaggio tra litotipi a diverso grado di competenza e che danno risalto morfologico con scarpate o netti cambi di pendenza. Ciò avviene in particolare al passaggio tra le vulcaniti basaltiche, derivanti dal consolidamento delle colate laviche, più resistenti rispetto alle vulcanoclastiti (tufi e ialoclastiti). I neck vulcanici sono condotti vulcanici d'effusione o di esplosione riempiti di lava basaltica o breccia vulcanica.

Hanno una struttura circolare, ellittica, ovale o simile. Sono forme coniche emergenti dal terreno circostante in quanto frutto di un'erosione selettiva di corpi vulcanici compatti circondati da rocce più degradabili quali tufi e ialoclastiti. Cime più o meno cupoliformi sono diffuse in tutto il territorio collinare. Nella tavola è stato riportato solo l'esempio più significativo, il Monte di Pena, situato allo sbocco della Val Restena nella valle dell'Agno.

Forme di versante dovute alla gravità

Le forme di versante dovute alla gravità comprendono tutta la vasta gamma dei dissesti franosi. Nel territorio risultano ampiamente diffuse le forme di versante correlate a movimenti gravitativi, sia antichi sia recenti o in atto. I fattori che determinano tipologia ed estensione del movimento sono molteplici e possono essere ricondotti a: inclinazione del versante, litotipo presente, acqua, interventi antropici. Particolare rilevanza hanno la presenza delle coperture eluvio-colluviali e specialmente quelle di alterazione delle vulcaniti basaltiche a forte componente argillosa che possono raggiungere spessori anche considerevoli. Da quanto riportato nella tavola, la maggior parte dei dissesti, e soprattutto quelli più importanti ed estesi, sono da ricollegare alla presenza di questi litotipi che sono essi stessi sede di movimenti gravitativi o che fungono da piano di scivolamento per le sovrastanti coltre di alterazione. Per quanto concerne la tipologia delle frane individuate prevalgono le frane di scorrimento, di tipo rotazionale, e le frane di colamento.

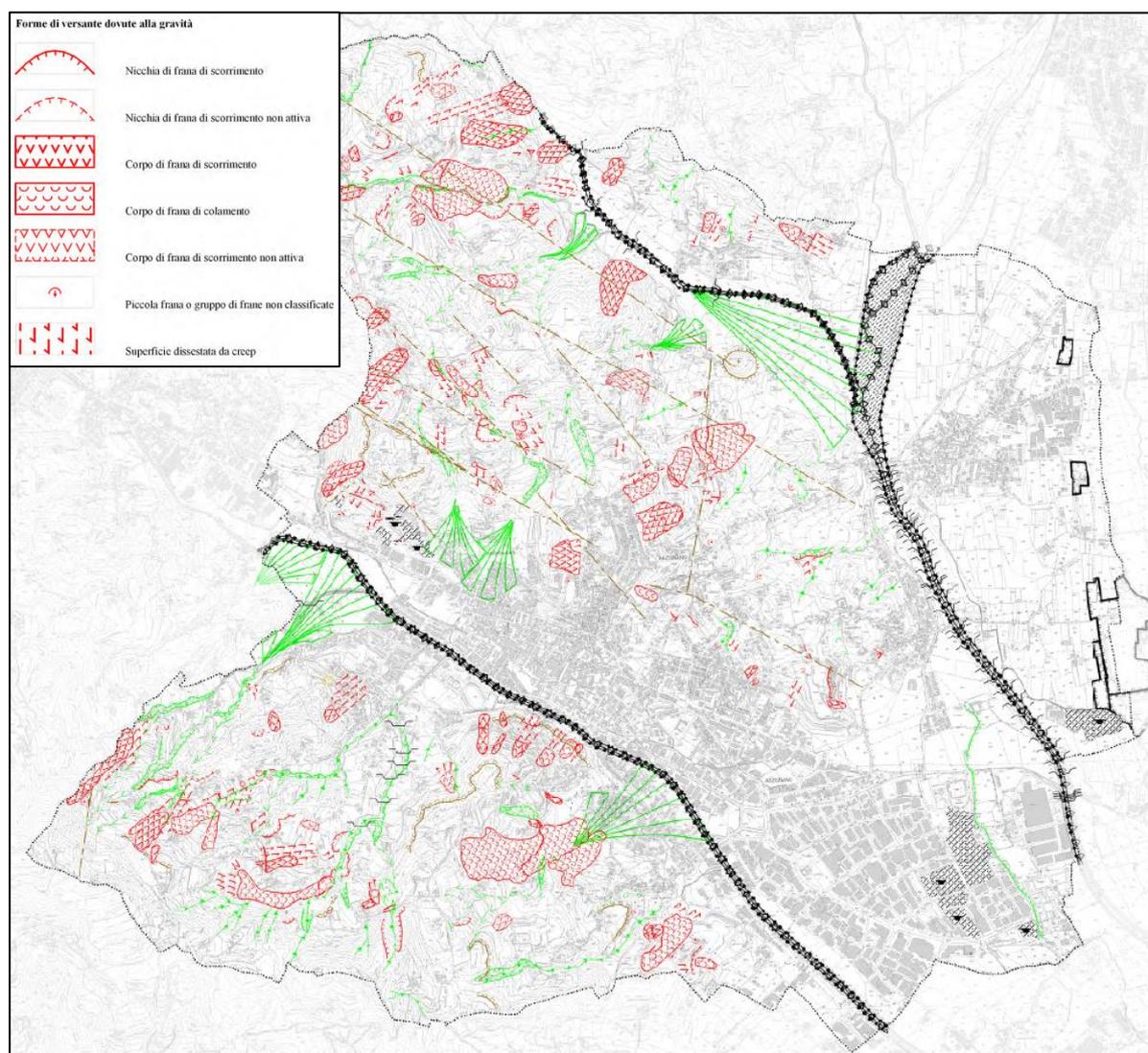


Tavola c050301 Carta Geomorfologica del PAT

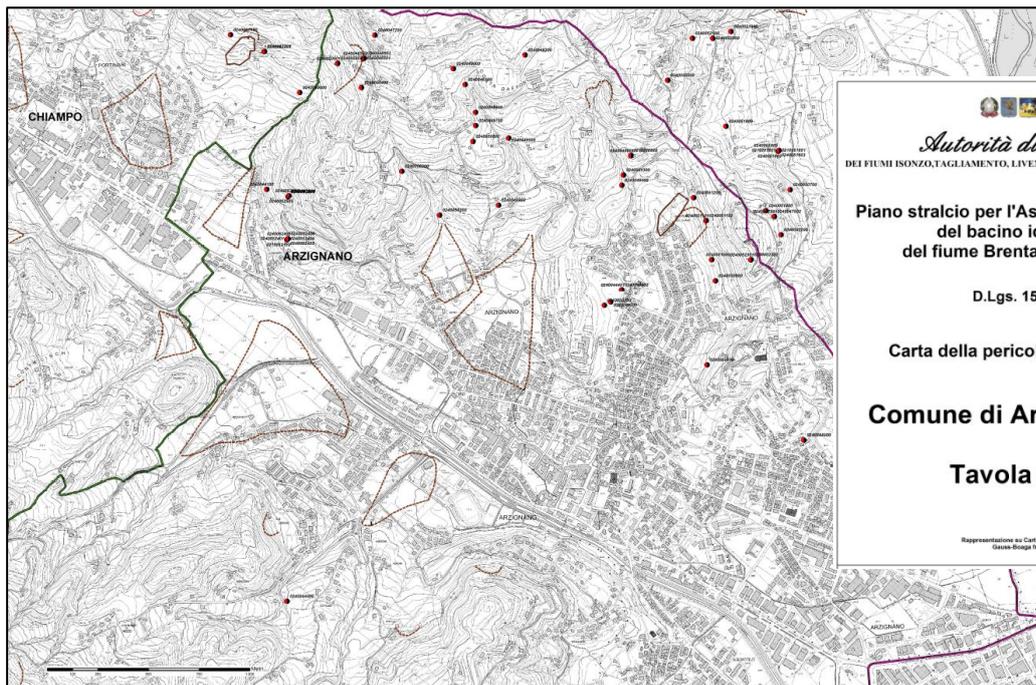
Le frane di colata rilevate nel territorio sono tutte localizzate nei depositi di copertura prevalentemente argillosi derivanti dall'alterazione del sottostante substrato vulcanico. Sono state considerate tutte attive in quanto non si esclude la possibilità di una loro riattivazione a seguito di eventi piovosi intensi e/o prolungati. In tutte l'elemento distintivo sono le tipiche ondulazioni della superficie del terreno e delle strade che le attraversano.

Nelle frane di scorrimento la superficie di rottura corrisponde per lo più alla superficie di contatto tra il substrato vulcanico e la coltre di alterazione superficiale. La massa dislocata si muove oltre la superficie di rottura sovrapponendosi alla sottostante superficie di terreno originaria, generando i tipici rigonfiamenti e avvallamenti che formano il piede della frana. Il movimento può scomporsi in diversi blocchi, ruotati in posizioni diverse che talvolta possono rimanere integri al loro interno senza subire una caoticizzazione del materiale. In questi corpi di frana oltre alla componente coesiva è presente anche una componente granulare in percentuale significativa. Spesso il meccanismo di rottura avviene bruscamente, con taglio netto, a seguito di eventi meteorici caratterizzati da piogge intense e prolungate.

Piano di Assetto Idrogeologico

Per la redazione del presente studio sono state valutate le cartografie che evidenziano le aree a pericolosità geologica e le zone di attenzione del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) dei bacini idrografici dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Piave e Brenta-Bacchiglione (pubblicato come "Allegato cartografico al Decreto Segretariale n.29 del 20/05/2016, aggiornato rispetto a quello pubblicato nella G.U. n. 280 del 30.11.2012, a cui si faceva riferimento nel Livello 1 di MS). Si allegano la tavola di pericolosità geologica del Piano di Assetto Idrogeologico riferibili al comune di Arzignano con dettaglio della legenda.

<p>PIANO ASSETTO IDROGEOLOGICO P.A.I.</p> <p>Perimetrazione e classi di pericolosità geologica</p> <p> P1 - Pericolosità geologica moderata</p> <p> P2 - Pericolosità geologica media</p> <p> P3 - Pericolosità geologica elevata</p> <p> P4 - Pericolosità geologica molto elevata</p> <p>0930062200A Codice identificativo della perimetrazione geologica P.A.I. ad esclusione delle colate rapide</p> <p>0930062200A-CR Codice identificativo della perimetrazione geologica P.A.I. relativo alle sole colate rapide</p> <p> Indicazione delle zone di pericolosità e di attenzione idraulica*</p> <p>* cfr. cartografia idraulica</p>	<p>ZONE DI ATTENZIONE GEOLOGICA QUADRO CONOSCITIVO COMPLEMENTARE AL P.A.I. PROVENIENTE DA FONTI INFORMATIVE DIVERSE</p> <p>Dissesti franosi recenti - fonte informativa Autorità di Bacino Alto Adriatico</p> <p> Localizzazione indicativa dissesto franoso recente non delimitato</p> <p> Dissesto franoso delimitato</p> <p>Dissesti franosi recenti - fonte informativa Regione del Veneto / Province</p> <p> Localizzazione dissesto franoso recente non delimitato</p> <p>Banca dati I.F.F.I. - Inventario dei fenomeni franosi in Italia</p> <p> Localizzazione dissesto franoso non delimitato</p> <p> Dissesto franoso delimitato</p> <p>0930062200 Codice identificativo dei dissesti franosi I.F.F.I.</p> <p>Piani Territoriali di Coordinamento Provinciale - P.T.C.P.</p> <p> Localizzazione dissesto franoso non delimitato</p> <p> Dissesto franoso delimitato</p> <p> Indicazione o schematizzazione di un elemento geomorfologico connesso a fenomeni di instabilità</p>
<p>OPERE DI DIFESA</p> <p> Opere di difesa a sviluppo lineare</p>	
<p>LIMITI AMMINISTRATIVI</p> <p> Limite Comunale</p> <p> Limite Regionale</p> <p> Limite di Bacino</p>	



Autorità di Bacino
 DEI FIUMI ISONZO, TAGLIAMENTO, LIVENZA, PIAVE, BRENTA-BACCHIGLIONE

Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico del bacino idrografico del fiume Brenta-Bacchiglione

D.Lgs. 152/2006

Carta della pericolosità geologica

Comune di Arzignano (VI)

Tavola 1 di 1

Rappresentazione su Carta Tecnica Regionale
Quota: Spazio Urbano

Estratto della Carta della pericolosità geologica del P.A.I.

Dott. Geol. Matteo Collareda	<i>Dott.ssa Claudia Tomassoli</i>
con la collaborazione di:	<i>Dott.ssa Laura Guerra</i> <i>Dott. Geol. Emanuele Mammoliti</i>

3.4 Assetto idraulico e idrogeologico locale

Il territorio comunale di Arzignano è caratterizzato da una ricca rete idrografica, in cui si possono distinguere tre corsi d'acqua principali: il torrente Chiampo che attraversa il territorio in direzione NW-SE, il torrente Agno - fiume Guà che lo attraversa in direzione NNW-SSE e il torrente Restena, importante per lunghezza ed estensione del suo bacino, che dà luogo alla valle omonima e confluisce nell'Agno-Guà all'altezza dell'abitato di Tezze.

Sono tutti caratterizzati da un regime di tipo torrentizio, con deflusso episodico ed in stretta relazione con l'entità e le modalità degli afflussi meteorici.

Al torrente Chiampo e al fiume Agno-Guà competono due bacini idrografici che svolgono una funzione fondamentale per la ricarica dei corpi idrici sotterranei; il contributo del Bacino dell'Agno-Guà risulta superiore a quello del Bacino del Chiampo sia per la sua maggiore estensione sia per la presenza di altri corsi d'acqua tributari (T. Arpega, T. Restena, T. Poscola).

Il torrente Chiampo nasce nei Monti Lessini e, percorrendo l'omonima valle, attraversa i comuni di Crespadoro, S. Pietro Mussolino, Chiampo, ed Arzignano ed è alimentato dalle acque dei torrenti che scendono dalle colline.

Ha un tipico carattere torrentizio con piene di breve durata alternate a lunghi e prolungati periodi di magra soprattutto nel tratto in cui scorre all'interno del materasso alluvionale ghiaioso di fondovalle: nel tratto dopo Chiampo è asciutto per molti mesi all'anno. Confluisce nell'Alpone e successivamente nell'Adige.

L'agno-Guà nasce nelle Piccole Dolomiti, nel territorio del comune di Recoaro, attraversa quattro province (Vicenza, Verona, Padova, Venezia), immettendosi nel fiume Brenta ad alcuni chilometri dal mare. Durante il suo percorso cambia più nomi: Agno, Guà, Frassine, Gorzone. Si origina dalla confluenza di numerosi corsi d'acqua che scendono dai monti di Recoaro Terme, in particolare i torrenti Rotolon, Lora e Creme. Nell'alta e media valle attraversa i centri abitati di Recoaro, Valdagno, Cornedo, Brogliano e Trissino.

I numerosi prelievi idrici e il substrato fortemente permeabile determinano fenomeni di magra prolungata e, per lunghi tratti, da Cornedo a valle, la completa mancanza di portata nei mesi estivi. Nella zona di Tezze di Arzignano, in corrispondenza della cassa di espansione denominata "Rotte del Guà", riceve le acque del T. Restena e prende il nome di Fiume Guà. Prosegue verso il territorio di Montebello, dove è stata realizzata una cassa di espansione, attraversa il territorio di Lonigo ed entra in provincia di Verona prendendo il nome di Frassine.

La storia del corso d'acqua è legata soprattutto alle piene che lo contraddistinsero per la violenza e per i danni causati a monte e a valle. Il fatto di essere un corso d'acqua a regime torrentizio caratterizza in modo marcato l'andamento stagionale delle portate che, nei periodi di massima intensità, presentano flussi importanti, per poi ridursi nei periodi di magra con l'alveo al minimo o completamente asciutto. Per far fronte agli eventi di piena il corso d'acqua è stato soggetto a numerosi interventi di risistemazione.

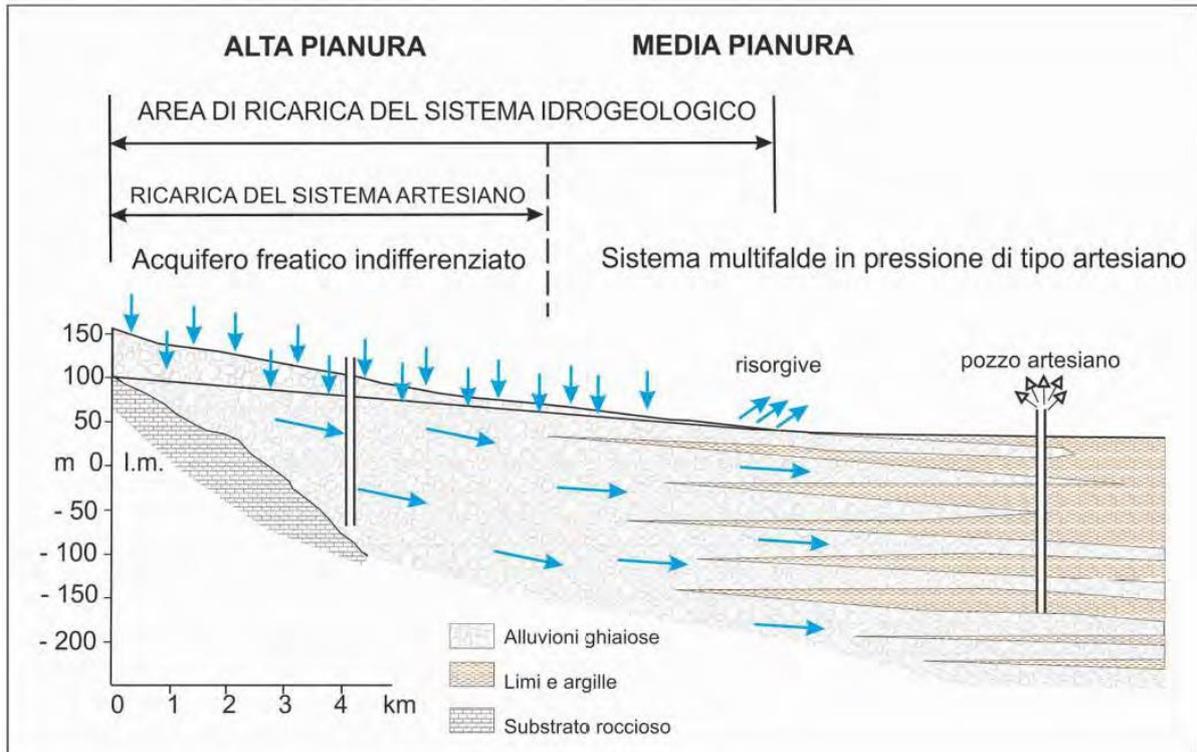
Oltre alla presenza di corsi d'acqua vallivi il territorio comunale è caratterizzato da un'estesa area collinare solcata da un fitto reticolo idrografico che si può definire subdendritico i cui rami maggiori confluiscono direttamente nei torrenti principali; la formazione di un'articolata rete di scolo naturale è dovuta alla natura poco permeabile delle rocce vulcaniche (e alle loro relative coltri argillose di alterazione) che costituiscono i rilievi in territorio comunale.

Acque sotterranee

Sono presenti due sistemi idrogeologici: il sistema degli acquiferi nei rilievi vulcanici in cui si possono distinguere le acque di circolazione all'interno della coltre detritica superficiale di alterazione del substrato e le acque di percolazione del sistema di fratture delle rocce basaltiche e calcaree, e il sistema degli acquiferi alluvionali lungo le valli del torrente Chiampo e del fiume Agno-Guà.

Il versante occidentale della valle dell'Agno-Guà ed entrambi i versanti della valle del Chiampo sono costituiti nella quasi totalità da un complesso vulcanico di colate basaltiche e rocce vulcanoclastiche caratterizzato da permeabilità generalmente molto bassa, specialmente per quanto riguarda la coltre di alterazione superficiale di natura argillosa; gli orizzonti acquiferi presenti in queste litologie assumono scarsa importanza e si presentano generalmente poco produttivi.

Il fondovalle del comune di Arzignano rientra nella fascia dell'Alta Pianura Veneta caratterizzata da un acquifero monostrato in cui ha sede una falda freatica di subalveo.



Modello idrogeologico dell'alta e media pianura veneta

La struttura stratigrafica presente esclude la possibilità di un sistema idrogeologico a più falde sovrapposte e distinte, in quanto i livelli impermeabili non sono sufficientemente estesi e continui per separare idraulicamente acquiferi a caratteri diversi, determinando così l'esistenza di un'unica falda freatica localmente interrotta da letti impermeabili discontinui.

La falda freatica in esame è in stretta connessione con i corsi d'acqua superficiali, da cui trae alimentazione; il torrente Agno disperde verso l'acquifero indifferenziato un massimo di circa 100 l/s*km nel tratto tra Cornedo e Montebello Vicentino (circa 24 chilometri); di poco superiore risulta la dispersione del torrente Chiampo tra Arzignano e Montebello Vicentino (circa 14 chilometri). La dispersione dei corpi idrici superficiali interessa in modo diretto solo una porzione ridotta dell'acquifero infravallivo cioè quella confinante lateralmente con il subalveo fluviale. L'alimentazione della falda freatica è assicurata anche dalle precipitazioni dirette, dall'irrigazione, dal ruscellamento di versante e dai corsi d'acqua minori afferenti alla valle principale (T. Poscola, T. Arpega, T. Restena).

Questo attivo ricambio della falda freatica, in rapporto anche alle variazioni idrometriche misurate nel fiume Agno-Guà, è confermato dal fatto che in molti pozzi soggetti a monitoraggio in continuo si registrano oscillazioni medie del livello di falda intorno ai 10 metri con punte massime registrate di 25 metri.

Dal regime della falda si evidenziano, in generale, due periodi di piena: uno primaverile, con massimo nei mesi di aprile e maggio, ed uno secondario autunnale, con massimo nel mese di dicembre; i livelli di magra si registrano nei mesi di febbraio-marzo e nel mese di agosto. Si riporta a seguire la carta idrogeologica del PAT di Arzignano.

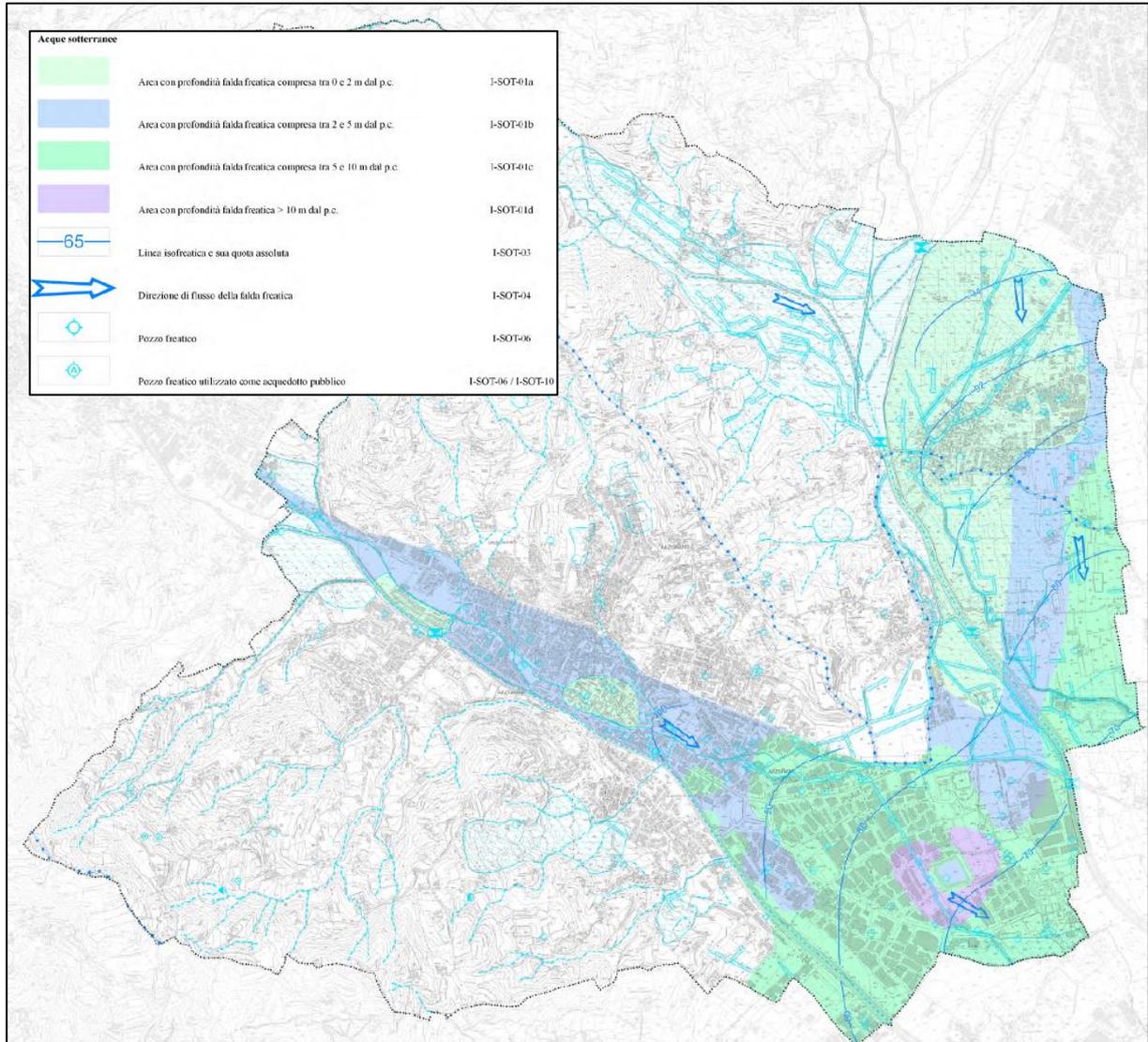
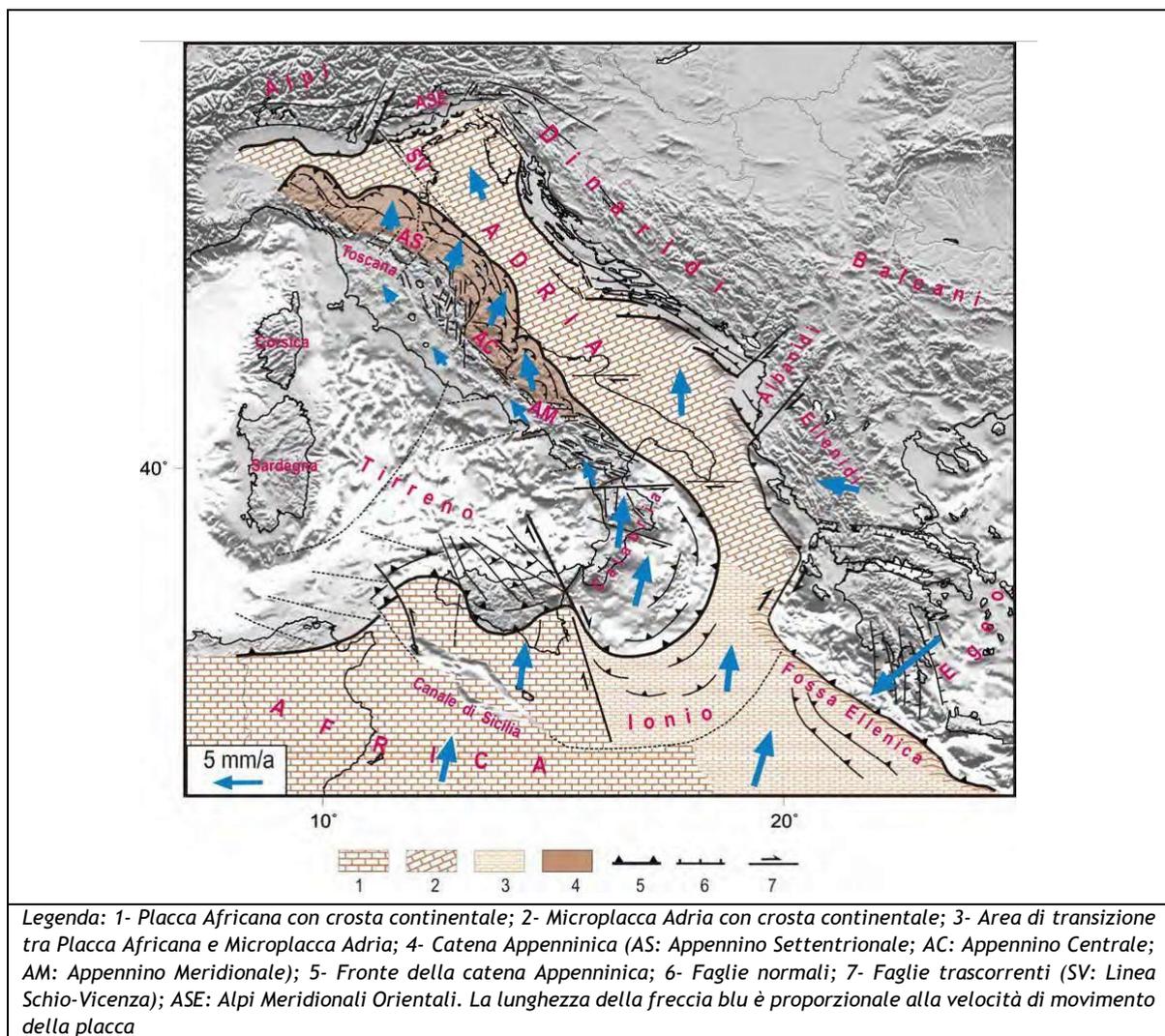


Tavola c050201 Carta Geomorfologica del PAT

4 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

4.1 Inquadramento sismo-tettonico generale

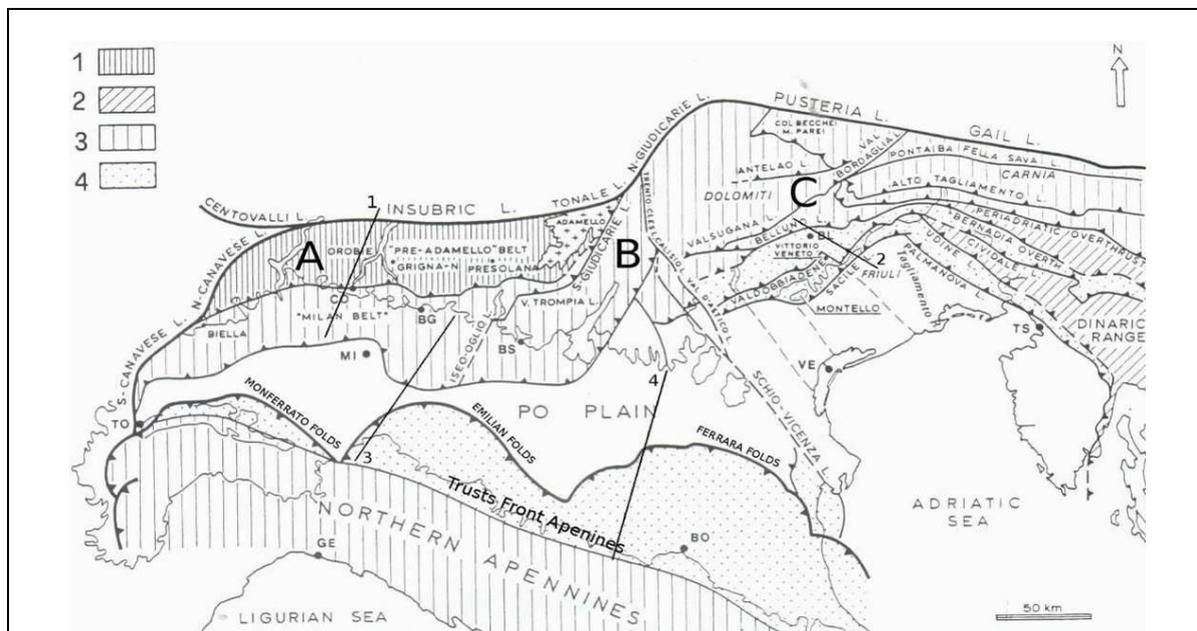
Dal punto di vista strutturale, il territorio di Arzignano si colloca a ridosso della grande unità litologica delle Alpi meridionali. Quest'ultima è stata interessata dal rifting giurassico con l'individuazione di una piattaforma carbonatica bordata dal bacino carnico, bacino bellunese, bacino di Tolmino e dal plateau carnico-giulio. La placca Adria, che tettonicamente rappresenta un promontorio della placca africana (Channell, 1996) collocata lungo la pianura padana veneta e lungo il mare Adriatico, interagisce attivamente con la placca europea determinando il corrugamento alpino e appenninico e, conseguentemente, lo stress tettonico attuale.



L'Adria è costituita da crosta continentale che, nella porzione più settentrionale, è rappresentata dal substrato della pianura padana interagente con il fronte della catena appenninica a sud e con il sud-alpino a nord. La collisione continentale tra la parte più settentrionale della placca Adria e quella europea ha portato alla formazione della catena alpina. La conseguente subduzione verso sud della placca europea e il sovrascorrimento della placca Adria (subduzione continentale, Bally et al., 1985) ha provocato la formazione di strutture di retro-trust.

Un importante ruolo di svincolo cinematico della placca Adria settentrionale viene svolto dalla Linea Schio-Vicenza (Babbucci et al., 2002): una faglia trascorrente sinistra (Plio-Quaternaria) che mette le Alpi meridionali a contatto con quelle centro-occidentali. Il blocco veneto-friulano (figura seguente)

è caratterizzato da strutture tettoniche con direzioni variabili (Dogliosi et al., 1987; Castellarin et al., 1992; Pontron et al., 2000). Nella zona friulana centrale si ha il massimo delle deformazioni e del raccorciamento per l'estrema embricazione sud-vergente delle unità. L'assetto strutturale della pianura veneta, che rappresenta l'avampaese di due catene montuose perimetrali, è condizionato dall'interferenza tra le strutture del Sud-alpino a nord e il fronte della catena dinnarica a est (Merlini et al., 2002).

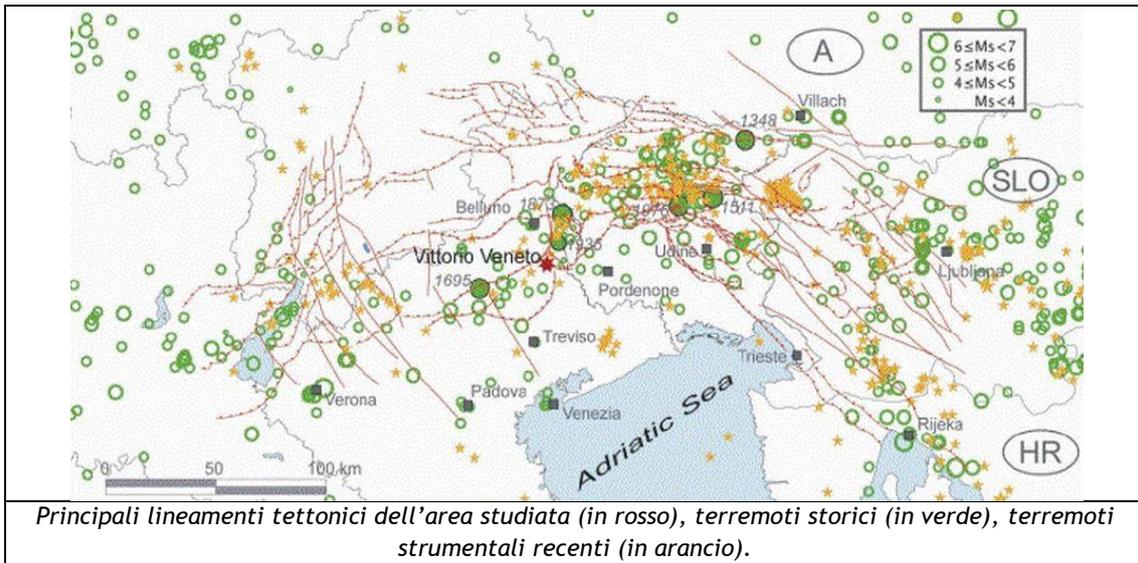


Schema strutturale della Pianura Padana (microplacca Adria) e delle aree adiacenti (modificato da: CASTELLARIN e al., 1982). Legenda: Il Sud - alpino è tettonizzato in età ealpina (Cretaceo-Paleocenica) (1) e in età Eocene inf. e medio (2). L'area Appenninica è coeva al settore più occidentale delle Alpi (3) di età Messiniana e Plio - Pleistocenica. L'area Appenninica e Veneto-Friulana (4), in forte accorciamento, è caratterizzata dalle strutture sepolte sotto i depositi di pianura. Il Sud - Alpino è diviso in A) Blocco Lombardo, B) Blocco Trentino - Lessineo e C) Blocco Veneto - Friulano.

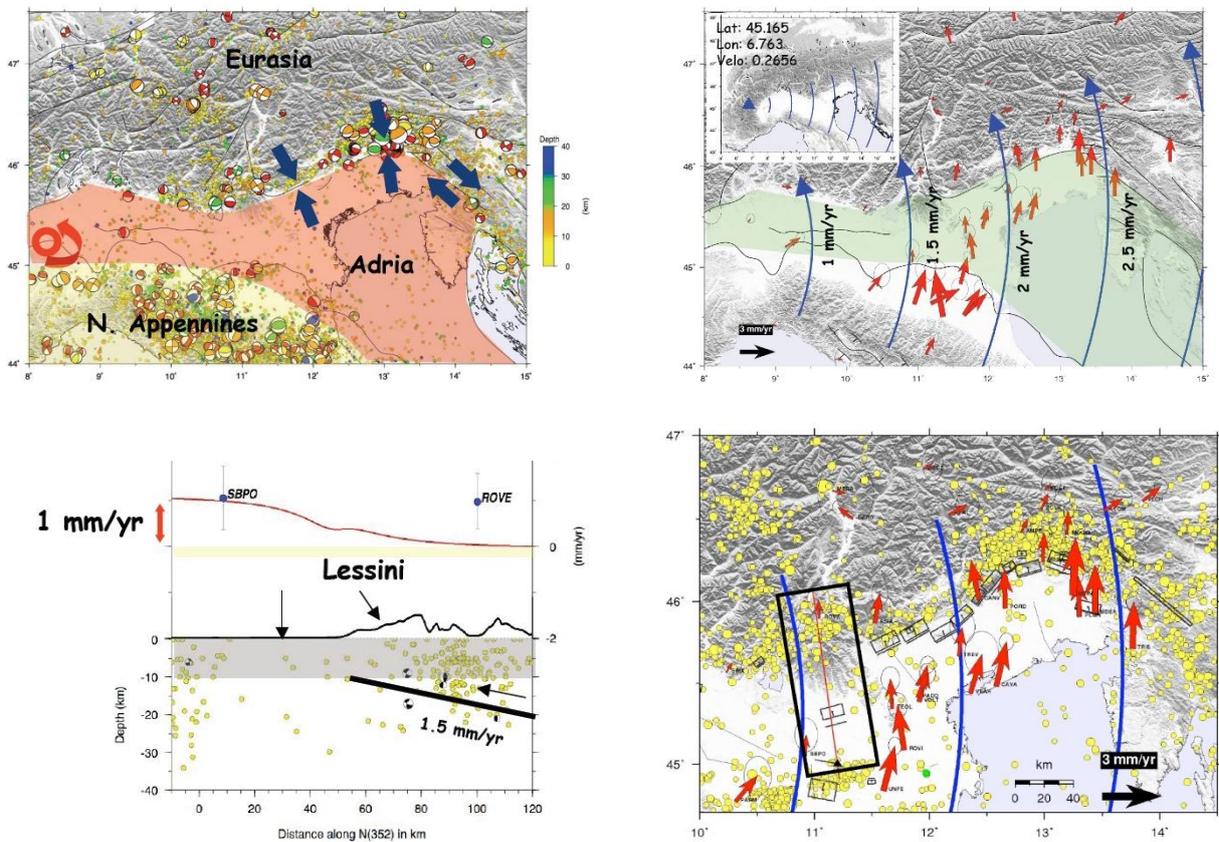
Dallo studio della distribuzione dei meccanismi focali si è ricavato l'assetto dell'ellissoide dello stress tettonico in termini di direzione di massima compressione e distensione, questo al fine di definire l'interazione tettonica attuale tra la placca europea e quella Adria, responsabile degli ultimi terremoti emiliani (Balocchi, 2012; Balocchi et al., 2012).

Si può concludere che la placca Adria sia in netta compressione nel settore sud-alpino dove il sovrascorrimento di quest'ultima rispetto alla placca europea genera dei retro-stress all'interno delle unità litologiche deposte sulla crosta continentale dell'Adria. Il risultato finale è rappresentato da un'attività sismica nelle regioni delle Alpi orientali (Slejko et al., 1989) considerata tra le più elevate del nostro paese. Cinque terremoti con magnitudo di superficie (MS) superiore a 6 sono infatti avvenuti nell'ultimo millennio: nel 1348 a Villaco con MS 6,4 (l'epicentro sembra localizzato nell'attuale zona di confine tra Italia e Austria), nel 1511 nella zona tra Gemona e Idria con MS 6,2, nel 1695 ad Asolo con MS 6,5, nel 1873 nell'Alpago con MS 6,3 e nel 1976 a Gemona con MS 6,5. Oltre a questi, nel 1936 un terremoto di magnitudo (MS) 6,1 ha provocato distruzioni nei paesi del Cansiglio.

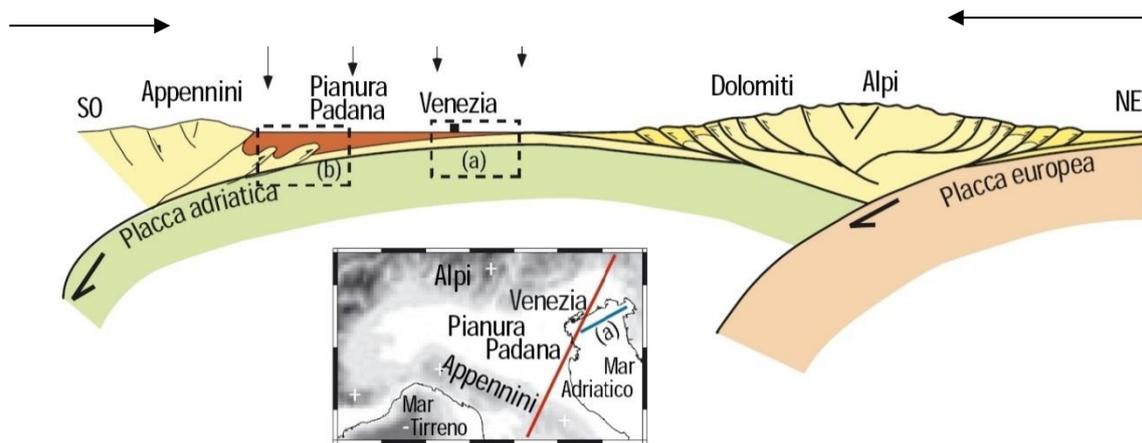
La figura seguente mostra le faglie principali rilevate nella regione e la distribuzione spaziale dei maggiori terremoti. Questi ultimi, nell'area indagata, risultano di numero molto inferiore rispetto a quelli avvenuti nel vicino Friuli: bisogna segnalare, però, che la sismicità friulana risente della coda del forte terremoto del 1976 e che le stazioni della rete sismometrica dell'Italia nord-orientale sono state ubicate, per un lungo periodo, esclusivamente sul territorio friulano.



Le principali strutture tettoniche nel Veneto centro-orientale sono rappresentate da sovrascorrimenti con orientazione nord est-sud ovest, tagliati talvolta da faglie trascorrenti. Una prima interpretazione della sismicità in chiave sismogenetica è stata presentata da Slejko et al. (1989) nell'ambito di un modello sismotettonico che interessa il territorio italiano dal lago di Garda al confine con la Slovenia. Nell'ambito di un progetto sviluppato negli anni Novanta, Meletti et al. (2000) hanno formulato un modello sismogenetico per l'Italia che consta di 80 zone sismogenetiche. Queste zone risultano omogenee sia dal punto di vista tettonico che da quello sismico. Studi successivi (Slejko e Rebez, 2002) hanno portato a complicare, a livello regionale, quel modello (zonazione FRI) o a semplificarlo (Zonazione ZS9 - Meletti and Valensise, 2004) al fine di disporre di cataloghi sufficientemente ricchi di terremoti per tutte le zone sismogenetiche.



Rappresentazione schematica della cinematica della microplacca Adria in corrispondenza del margine alpino tratta da Serpelloni, 2008.



Schema tettonico dell'Italia settentrionale con evidenziati i movimenti delle placche coinvolte, tratto da Carminati et al.,

4.2 Caratterizzazione sismogenetica locale

L'area oggetto del presente studio è situata nei Lessini centro-orientale.

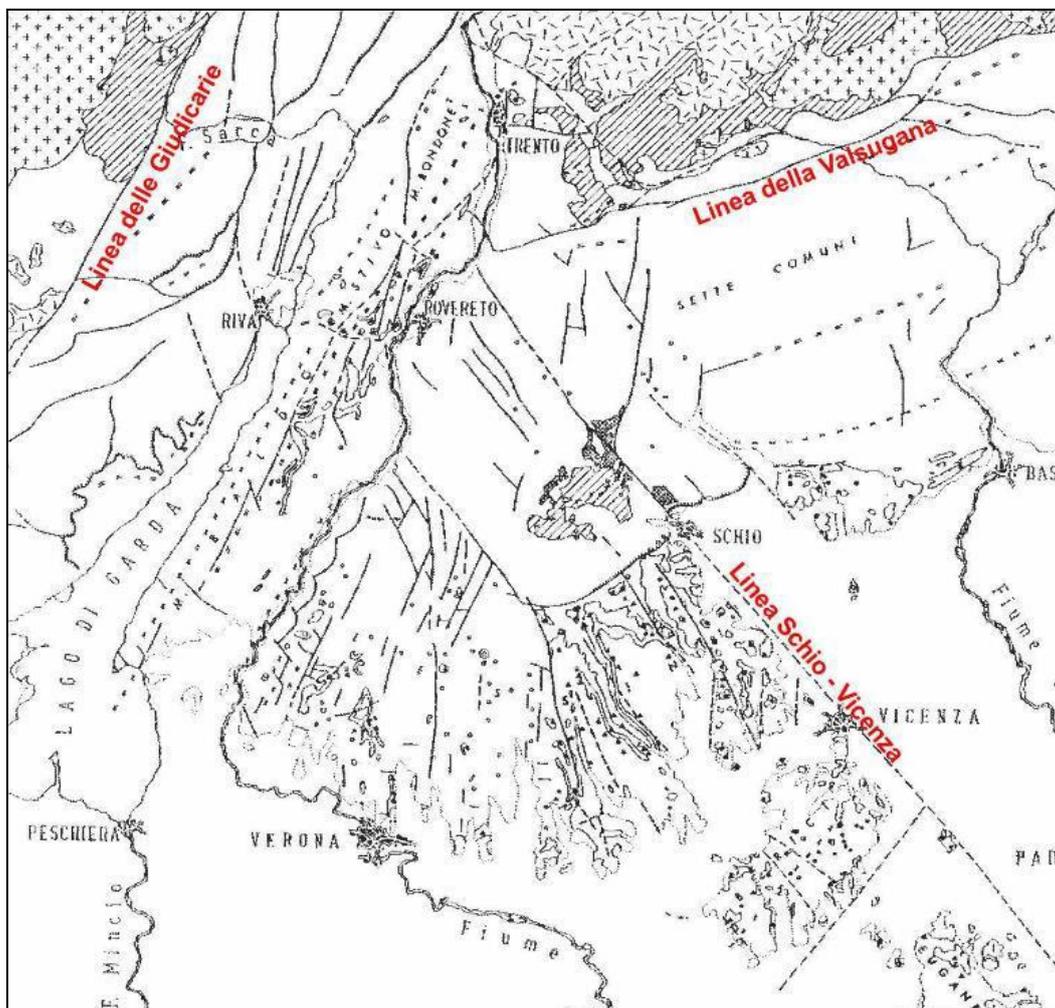
La geologia della regione è ben nota nelle sue linee essenziali e relativamente semplice: i Lessini, infatti, si presentano come un'estesa monoclinale immergente a Sud.

La tettonica locale è definita da tre sistemi di faglie principali e con movimenti prevalentemente orizzontali che sono:

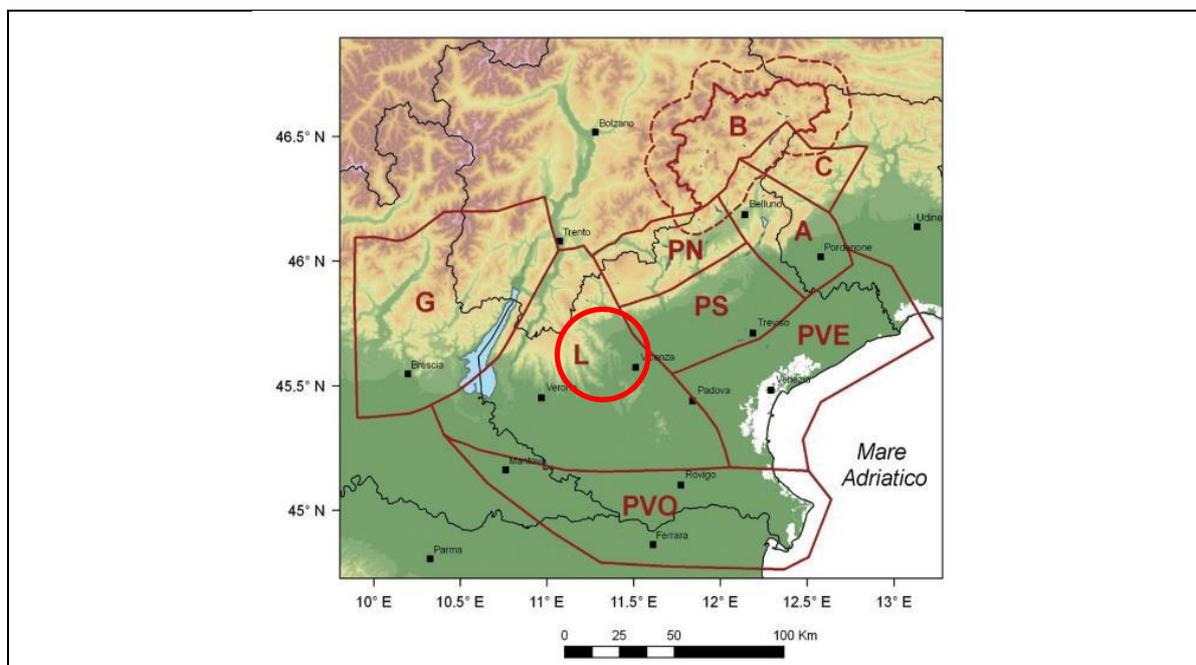
- NNE-SSW (direzione della linea delle Giudicarie);
- ENE - OSW (direzione della linea della Valsugana)
- NNW - SSE (direzione della Linea Schio-Vicenza).

Tra questi il più recente e più noto è il sistema scedense costituito da un fascio di oltre 20 km di ampiezza e di cui la Faglia Schio-Vicenza appare la più importante per entità di movimento. Non sono tuttavia da trascurare altre ad essa parallele con scivolamenti orizzontali anche dell'ordine del chilometro. Nel fondovalle è presente una faglia distensiva verosimilmente di età terziaria denominata la Faglia dell'Agno, con direzione NNW-SSE, che ha dislocato verticalmente i due blocchi situati ad est ed a ovest di essa ed ha influenzato come linea disgiuntiva la genesi della flessura pedemontana (Barbieri & DE ZANCHE, 1980; BARBIERI et alii, 1980);

Il territorio regionale del Veneto è stato suddiviso in **distretti sismici**: ogni distretto rappresenta un'area all'interno della quale si ritiene che i terremoti possano essere identificati da alcuni elementi sismogenetici comuni, pur con la consapevolezza che le schematizzazioni in tal senso sono sempre riduttive e devono essere opportunamente contestualizzate nell'interpretazione dello specifico evento sismico. Sulla base di dati sismologici, elementi geologico-strutturali e informazioni relative alla cinematica e alla tettonica attiva, sono stati identificati 9 distretti sismici come visibile nella figura sotto riportata. Il territorio comunale di Arzignano ricade nel distretto Lessini-Schio (L).



Schema geologico e strutturale dei lessini, berici ed euganei (Conedera et al., 1972)



Legenda: Giudicarie (G); Lessini-Schio (L); Pedemontana Sud (PS); Pedemontana Nord (PN); Alpi Bellunese-Dolomiti (B); Alpi Cansiglio (A); Alto Bellunese-Dolomiti (A); Pianura Veneta Est (PVE); Pianura Veneta Ovest (PVO).

Dott. Geol. Matteo Collareda	<i>Dott.ssa Claudia Tomassoli</i>
con la collaborazione di:	<i>Dott.ssa Laura Guerra</i> <i>Dott. Geol. Emanuele Mammoliti</i>

Il distretto **Lessini-Schio (L)** si estende dai fronti di accavallamento più esterni del sistema delle Giudicarie meridionali a ovest, fino alla flessura pedemontana a est, e comprende i monti Lessini, la fascia della linea Schio-Vicenza (SCHV), e i rilievi dei monti Berici e dei colli Euganei. La transizione dal dominio pede-alpino a quello pede-appenninico avviene nella pianura padana; il limite meridionale del poligono è stato tracciato in modo arbitrario laddove la sismicità nota risulta minima.

L'area è interessata da faglie prevalentemente trascorrenti, disposte nord ovest-sud est. Sono mappati anche alcuni elementi tettonici ad andamento ENE-OSO, quali il sovrascorrimento di cima Marana o il *klippen* di Castel Malera. La fascia Schio-Vicenza separa le strutture plicative a est (terminazione occidentale del sistema della Valsugana e la flessura pedemontana) dai Lessini posti a ovest. Essi rappresentano un settore meno deformato, ponte, per alcuni autori, all'avampese indeformato che si estende a nord-est di Venezia; in quest'area, infatti, il Pliocene non risulta piegato e immerge dolcemente verso sud nella direzione centrale del bacino (p. es. Fantoni et al., 2002; Fantoni e Franciosi, 2009). L'attività recente, e talora l'esistenza stessa di diverse faglie ad andamento nord ovest-sud est e NNO-SSE che attraversano la pianura veneto-friulana, è confutata da diversi autori, e gli schemi strutturali pubblicati negli ultimi anni privilegiano la continuità laterale del fronte deformativo - si vedano ad esempio i lavori di Galadini et al. (2002) e Poli et al. (2002, 2009). Per la Schio-Vicenza è documentata invece una significativa attività quaternaria (Pellegrini, 1988; Tosi et al., 2007a).

4.3 Sismicità storica

Il Veneto è attualmente una regione silente dal punto di vista sismico. L'assenza di grossi eventi sismici recenti sorprende, ma non deve far pensare che il Veneto sia una regione tettonicamente inattiva. Evidenze di movimenti recenti (neotettonica) sono osservabili soprattutto nella fascia pedemontana (in particolare al confine tra le province di Belluno e Treviso) lungo la quale sono allineati i principali eventi storici.

La pericolosità sismica del Veneto è in parte legata all'attività dei distretti sismici del Friuli centrale e, in minor misura, dell'Alpago e del Garda. Allo stato attuale, il territorio regionale è interessato da una certa sismicità di magnitudo media, messa in luce negli ultimi decenni dal monitoraggio strumentale dell'attività sismica.

Tra i terremoti storici più rilevanti con epicentro in Veneto si possono ricordare:

DATA	AREA EPICENTRALE	I MCS MAGNITUDO	DESCRIZIONE
03/01/1117	veronese	IX-X Mw=6.7	I danni maggiori si registrarono a Verona, ma interessarono anche la valle dell'Adige e, verso sud, il territorio fino ai primi rilievi emiliani.
04/11/1268	trevigiano	VII-VIII Mw=5.4	Colpita la provincia di Treviso. Danni gravi a Treviso, Feltre, Asolo. La scossa fu fortemente risentita a Padova.
25/02/1695	asolano	X Mw=6.5	Gravi danni in larga parte del Veneto in particolare nell'alto trevigiano, a sud del monte Grappa. Colpita la città di Asolo. Centinaia le vittime.
12/06/1836	Bassano	VIII Mw=5.5	Le località più danneggiate furono Liedolo, Fonte, Sant'Eulalia: Complessivamente crollarono un centinaio di case. Sentita fortemente anche a Venezia.

Dott. Geol. Matteo Collareda	<i>Dott.ssa Claudia Tomassoli</i>
con la collaborazione di:	<i>Dott.ssa Laura Guerra</i> <i>Dott. Geol. Emanuele Mammoliti</i>

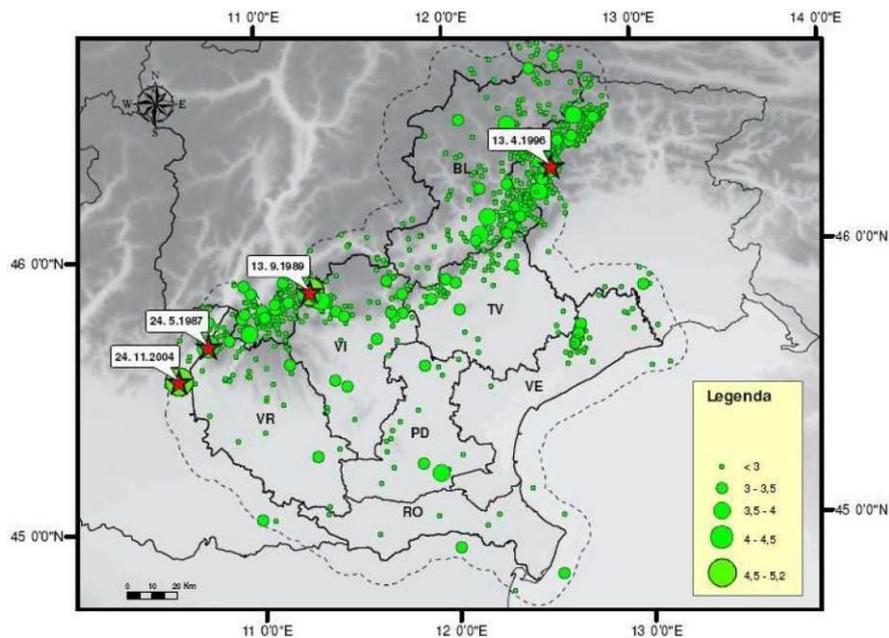
11/08/1866	monte Baldo	VII Mw=4.9	Danni nelle località poste sulla riva orientale del Lago di Garda, in particolare ad Assenza, Cassone, Castelletto, Malcesine.
29/06/1873	bellunese	IX-X Mw=6.3	L'area più colpita dalla scossa fu il bellunese, ma gravi danni subirono gli edifici dei paesi compresi tra Belluno, Pordenone e Conegliano Veneto (TV). Il centro più danneggiato fu Belluno e si osservarono lesioni anche a Gorizia, Pordenone, Trieste, Udine, Verona e Vicenza. 80 le vittime.
29/04/1876	Monte Baldo	VII Mw=4.9	La scossa provocò danni a Cassone, Malcesine, Ferrara di Monte Baldo.
18/09/1882	Monte Baldo	VII Mw=5.0	Interessati i paesi della costa orientale del Lago di Garda, con danni lievi nei paesi di Cassone e Castelletto di Brenzone. Risentita a Verona.
07/06/1891	Valle d'Illasi	VIII-IX Mw=5.9	I danni più gravi a Castelvero, Badia Calavena, Marcemigo. Una ventina i paesi danneggiati in modo significativo (superiore o pari al VII MCS). La scossa fu risentita fino a Trieste, Auronzo, Bormio, Chiavenna, Domodossola, Torino, Asti, Genova.
19/02/1932	Monte Baldo	VII-VIII Mw=5.0	La scossa provocò danni a diverse località della sponda veronese del Lago di Garda, tra le quali Albisano, S. Zeno, Garda.
18/10/1936	Alpago - Cansiglio (BL-PN)	IX Mw=6.1	Colpita la zona di confine fra le attuali province di Belluno, Treviso e Pordenone con i massimi effetti a sud dell'altopiano del Cansiglio nei paesi di Fiaschetti, Stevenà e Villa di Villa. Gravissimi danni anche a nord del Cansiglio, nella conca d'Alpago in particolare nelle località di Puos d'Alpago, Cornei e Villa.

Nel periodo 1977-2006, la rete gestita dall'OGS (Osservatorio Geofisico Sperimentale di Trieste) ha registrato in Veneto quasi 1200 eventi sismici con magnitudo compresa tra 2,0 e 3,0.

La maggior parte di questi eventi è localizzata lungo la fascia prealpina che unisce l'Alpago al monte Baldo. La profondità epicentrale più frequente è compresa tra i 7 e i 15 km di profondità. Solo l'11% degli eventi si colloca a profondità maggiore (fino a 22 km).

Nella figura seguente è riportata la distribuzione di tutti i terremoti registrati da OGS distinti per classi di magnitudo di durata M_D ¹. Gli eventi con $M_D > 4$, i cui epicentri ricadono nel territorio regionale o in prossimità di esso, sono identificati con una stella rossa.

¹ La magnitudo di durata M_D è il tipo di magnitudo che si utilizza per registrare piccoli terremoti, come quelli registrati in zona vulcanica che, vicini agli strumenti, li saturano. Si basa sul logaritmo della durata dell'evento sismico.



Distribuzione di tutti i terremoti recenti registrati dalla rete sismometrica gestita da OGS in Veneto nel periodo 1977 - 2006 (Priolo, 2008)

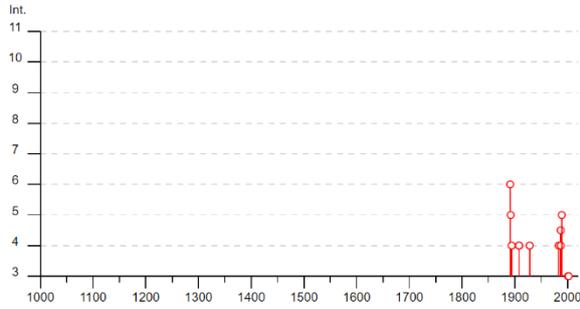
Come riportato nella figura precedente, gli eventi con $M_D > 4$ i cui epicentri ricadono nel territorio regionale o in prossimità di esso sono identificati con una stella rossa. Si tratta dei seguenti terremoti:

Data	Località	Magnitudo
24/05/1987	Garda	4,2
13/09/1989	Pasubio	4,8
13/04/1996	Claut M.	4,2
24/11/2004	Salò	5,2

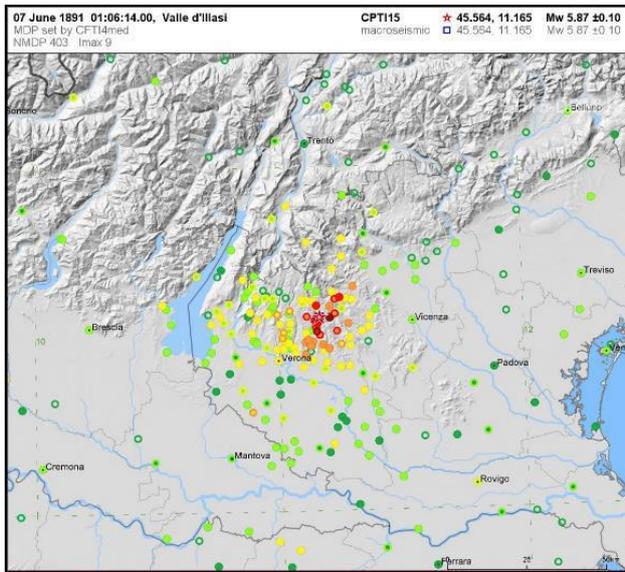
La ricostruzione storica degli eventi sismici che hanno caratterizzato il territorio comunale di Arzignano è stata fatta utilizzando il database macrosismico italiano DBMI15 dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (a cura di M. Locati, R. Camassi e M. Stucchi, 2015. *DBMI15, la versione 2015 del Database Macrosismico Italiano*. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI15>): rispetto al precedente DBMI11, raccomandato nelle linee guida della Regione Veneto per la realizzazione dello studio della compatibilità sismica, il DBMI15 ne rappresenta l'integrazione e l'aggiornamento, per cui è stato consultato per estrarre le seguenti informazioni.

Nello specifico, il comune di Arzignano appare 20 volte nel Database sopra citato con intensità registrata superiore o uguale a 3. Nella tabella seguente sono stati elencati i vari eventi registrati, con indicati, oltre all'intensità in scala MCS al sito in esame (I), la data (anno, mese, giorno, ora, minuto) in cui si è verificato l'evento Ax, l'intensità massima epicentrale in scala MCS (Io) e la magnitudo momento (Mw).

Il grafico seguente ricostruisce la storia sismica di Arzignano (per terremoti con intensità al sito superiore o uguale a 3) tra gli anni 1000 e fino al 2020.



Effetti	In occasione del terremoto del							NMDP	Io	Mw
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale			
6	1891	06	07	01	06	1	Valle d'Illasi	403	8-9	5.87
5	1892	08	09	07	58		Valle d'Alpone	160	6-7	4.91
4	1894	02	09	12	48	0	Valle d'Illasi	116	6	4.74
NF	1898	01	16	13	10		Romagna settentrionale	110	6	4.59
NF	1899	10	30	15	12		Prealpi Vicentine	8	5	4.27
NF	1899	11	15	23	40		Pianura Veneta	25	5	4.25
NF	1900	03	04	16	55		Asolano	98	6-7	5.05
NF	1902	06	19	09	23		Alpi Retiche	184	6-7	4.96
4	1908	02	03	13	36	2	Valle d'Illasi	34	5-6	4.32
4	1908	03	15	07	38	3	Valle d'Illasi	28	5-6	4.91
NF	1908	07	10	02	13	3	Carnia	119	7-8	5.31
4	1928	03	27	08	32		Carnia	359	9	6.02
NF	1930	07	23	00	08		Irpinia	547	10	6.67
NF	1976	12	13	05	24		Garda settentrionale	128	7	4.90
4	1983	11	09	16	29	5	Parmense	850	6-7	5.04
4-5	1987	05	02	20	43	5	Reggiano	802	6	4.71
4	1987	05	24	10	23	2	Garda occidentale	29	6	4.63
5	1989	09	13	21	54	0	Prealpi Vicentine	779	6-7	4.85
3	2001	07	17	15	06	1	Val Venosta	657	5-6	4.78
3	2002	02	14	03	18	0	Carnia	338	5-6	4.67

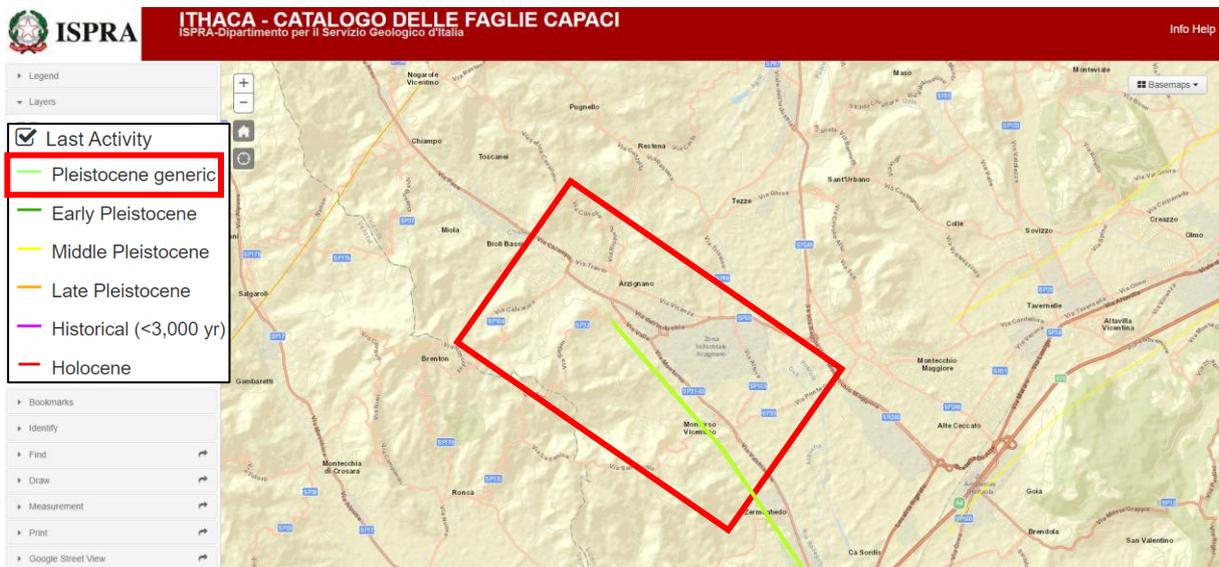


L'evento registrato il giorno 7 giugno dell'anno 1891 è stato quello di maggiore intensità rilevato nel territorio di Arzignano e limitrofi. Secondo i cataloghi oggi disponibili (CPT15, Guidoboni et al., 2016) la magnitudo Mw del 1891 sarebbe stata pari a 5,87 e, ad Arzignano, si sarebbe avvertito con un'intensità MCS di 6.

4.4 Faglie capaci e sorgenti sismogenetiche

Per quanto riguarda il tema delle faglie capaci (faglie che si sono rotte almeno una volta negli ultimi 40.000 anni, raggiungendo la superficie e producendo una rottura del terreno) e l'inquadramento delle sorgenti sismogenetiche più prossime all'area di Arzignano, si è fatto riferimento agli studi condotti dagli esperti scientifici e riportate nei cataloghi ITHACA e DISS 3.3.0.

Le sorgenti sismogenetiche rappresentano le zone che sono state riconosciute come origine dei terremoti grazie allo studio della sismicità storica e delle indagini geologiche.

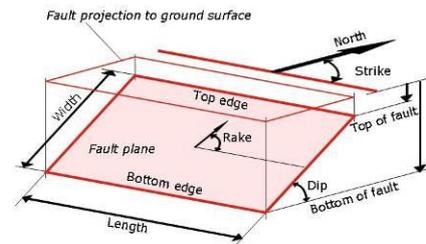


ITHACA - Catalogo delle faglie capaci - <http://sgi.isprambiente.it/ithaca/viewer/index.html>

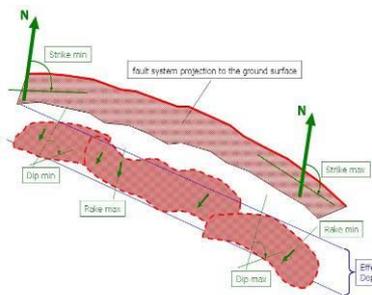
ITHACA è un database creato per la raccolta e la consultazione di tutte le informazioni disponibili sulle strutture tettoniche attive in Italia, con particolare attenzione ai processi tettonici che potrebbero generare rischi naturali. Il progetto si occupa in modo particolare delle faglie capaci, definite come faglie che potenzialmente possono creare deformazione in superficie: dalla sua consultazione è stato possibile osservare come sia riportata esclusivamente una faglia con periodo di attività incerto definito all'interno del Pleistocene generico, mentre non sono riportate faglie con età compatibile con la definizione di faglia capace.

La mappa dell'INGV riportata di seguito, derivante dal DISS 3.3.0 (*Database of Individual Seismogenic Sources - DISS Version 3.3.0 rilasciata a dicembre 2021*), mostra tre tipologie di sorgenti sismogenetiche.

Sorgenti individuali (IS): per le quali viene proposta una rappresentazione tridimensionale semplificata del piano di faglia. Questo tipo di sorgente esibisce caratteristiche definite di estensione, movimento e massima magnitudo attesa.

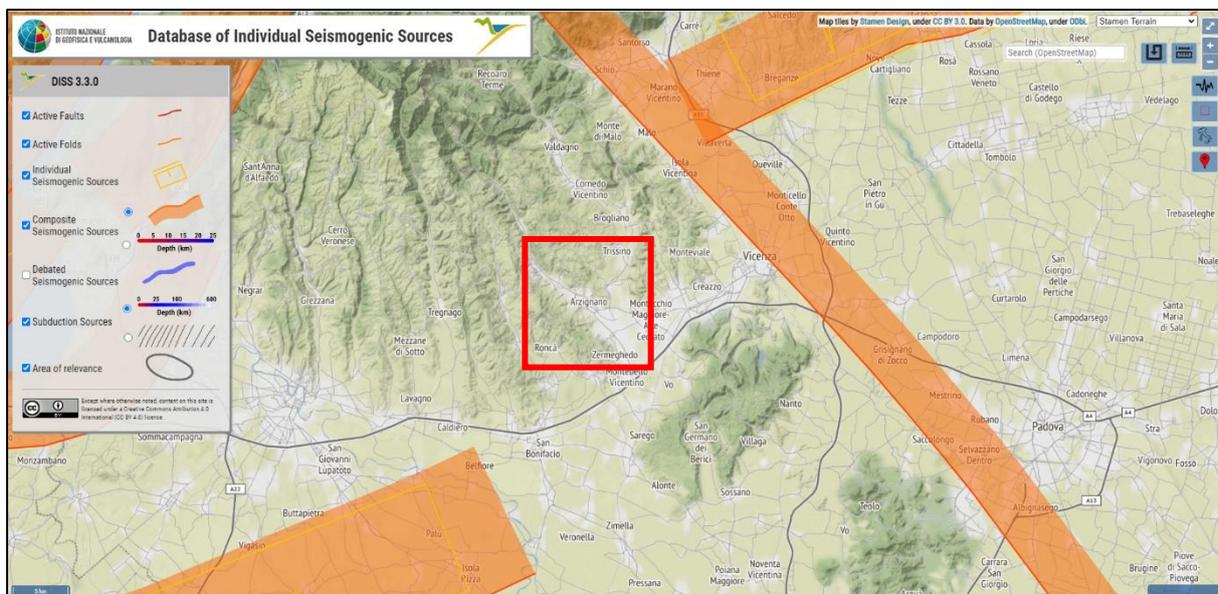


Sorgenti composite (CS): sono regioni estese contenenti un numero non specificato di sorgenti minori allineate che non è ancora conosciuto singolarmente. Le sorgenti composite non sono associate a uno specifico gruppo di terremoti storici.



Sorgenti dibattute (DS): sono zone proposte in letteratura come potenziali sorgenti, ma considerate ancora non sufficientemente attendibili per entrare nel database.

La mappa del DISS mostra che il territorio comunale di Arzignano si colloca ad ovest della zona a Sorgenti composite (CS) ITCS175 “Schio-Vicenza” e ITCS 070 “Thiene-Cornuda” e ad est della zona a sorgenti composite ITCS076 “Adige Plain”.



ITCS175 “Schio-Vicenza”: Questa Sorgente Composita appartiene al sistema di faglie Schio-Vicenza, un insieme di faglie con andamento NW-SE, NE-dipping, ad alto angolo che abbassano la successione sedimentaria della pianura veneta ad est (es. Pola et al., 2014), essendo una struttura trasversale rispetto all'andamento generale del fronte di spinta delle Alpi Meridionali Orientali. La struttura principale di questo sistema di faglie è la Linea Schio-Vicenza, una faglia traslante ripida NW-SE, lunga

Dott. Geol. Matteo Collareda	<i>Dott.ssa Claudia Tomassoli</i>
con la collaborazione di:	<i>Dott.ssa Laura Guerra</i> <i>Dott. Geol. Emanuele Mammoliti</i>

120 km (es. Pellegrini, 1988; Castaldini e Panizza, 1991; Zampieri et al., 2003, 2021). La Linea Schio-Vicenza è un importante tratto geomorfologico attraverso le Alpi Meridionali e la Pianura Padana Veneta, confinante ad est con i Monti Lessini, Berici ed Euganei, frammenti del retroavanti alpino (Bigi et al., 1992).

Il sistema di faglie Schio-Vicenza ha subito diverse fasi tettoniche di attività, mostrando cinematiche diverse almeno dal Mesozoico al Quaternario (vedi Zampieri et al., 2021). La Linea Schio-Vicenza è oggi un elemento strutturale ereditato e ben sviluppato con una significativa impronta nel paesaggio, riattivato nell'attuale regime di stress. L'analisi dei profili longitudinali dei terrazzi fluviali prossimi a Schio mostra un sollevamento differenziale pleistocenico attraverso il sistema di faglie, con il blocco occidentale (muro di piedi) della Linea Schio-Vicenza sollevato rispetto alla pianura (Pellegrini, 1988). D'altra parte, all'Isola Vicentina, ca. 10 km a sud est di Schio, i sedimenti del Miocene scendono di 50° verso nord-est, rappresentando il lembo di una piega di trascinamento della parete di fondo.

Minima profondità (km)	1
Massima profondità (km)	15
Direzione (°)	310 - 330
Inclinazione (°)	65 - 75
Rake (°)	160 -200
Velocità di movimento (mm/anno)	0,100 – 0,500
Magnitudo massima	7,3

La Zona ITCS 070 “Thiene-Cornuda”, sintetizzata nella tabella che segue, schematizza un’area estesa contenente un numero non specificato di sorgenti minori allineate, che non sono ancora conosciute singolarmente e non sono associate ad uno specifico gruppo di terremoti storici.

La linea Thiene-Cornuda fa parte del sistema di sovrascorrimenti pedemontani che borda la pianura veneto-friulana. Nell’area d’interesse è segnalata la sorgente sismica composta linea Thiene-Cornuda, che comprende tre sorgenti sismiche individuali: la linea Thiene-Bassano, la linea Monte Grappa e la linea Bassano-Cornuda. Questo settore della catena alpina è caratterizzato da grandi terremoti: i dati storici a disposizione testimoniano come in genere i sismi nelle zone delle Prealpi venete presentano magnitudo comprese tra 6 e 7. Fra i terremoti storici si segnalano quello del 1695 (M 6.7) con epicentro nella zona dell’asolano e del 1836 (M 5.5) nella zona di Bassano (Boschi et al. 1998; Gruppo di Lavoro CPTI, 1999). Questi eventi sono in genere legati alle linee di Bassano-Thiene e di Bassano-Cornuda. Sono altresì segnalati sismi a magnitudo mediamente minore ($5 < M < 6$), ma potenzialmente distruttivi, legati a strutture secondarie, come la linea del monte Grappa. Le tre linee sismogenetiche sono tagliate da strutture trasversali.

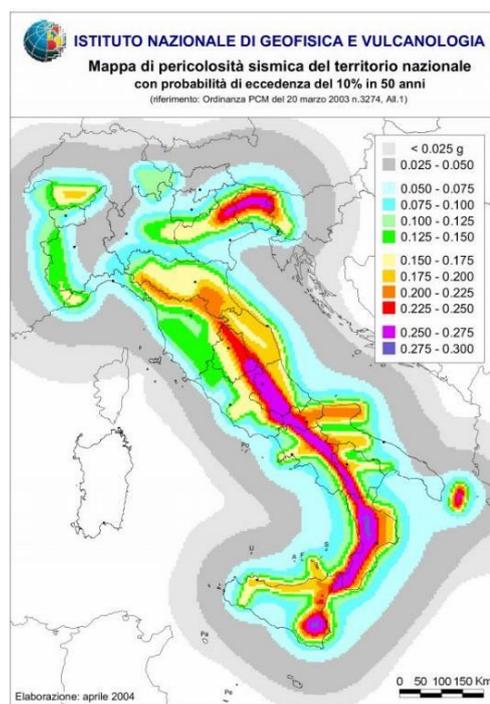
Minima profondità (km)	0,5
Massima profondità (km)	6,5
Direzione (°)	240 - 245
Inclinazione (°)	30 – 40
Rake (°)	80 -100
Velocità di movimento (mm/anno)	0,680 – 0,960
Magnitudo massima	6,5

ITCS076 “Adige Plain”: Questa Sorgente Composita si trova nella Piana dell’Adige a sud della città di Verona. Si interpreta come appartenente al fronte più esterno del sistema a thrust delle Alpi Giudicarie meridionali, ed è sepolto in pianura. Tuttavia, questa sorgente non segue alcun andamento strutturale precedentemente mappato, e come tale la sua presenza è ipotizzata in base al verificarsi del catastrofico terremoto veronese del 3 gennaio 1117. I cataloghi storici e strumentali mostrano che quest’area è caratterizzata da una distribuzione sparsa di eventi di bassa magnitudo, a parte il terremoto chiave del 1117 (Guidoboni et al., 2005). Si ipotizzava che la fonte del terremoto del 1117 fosse un segmento della Catena delle Alpi Meridionali Orientali nella pianura veneta, a est dei Monti Lessini.

Minima profondità (km)	3
Massima profondità (km)	14
Direzione (°)	240 - 260
Inclinazione (°)	30 - 50
Rake (°)	80 - 100
Velocità di movimento (mm/anno)	0,100 – 0,500
Magnitudo massima	7,2

4.5 Zonazione sismica nazionale

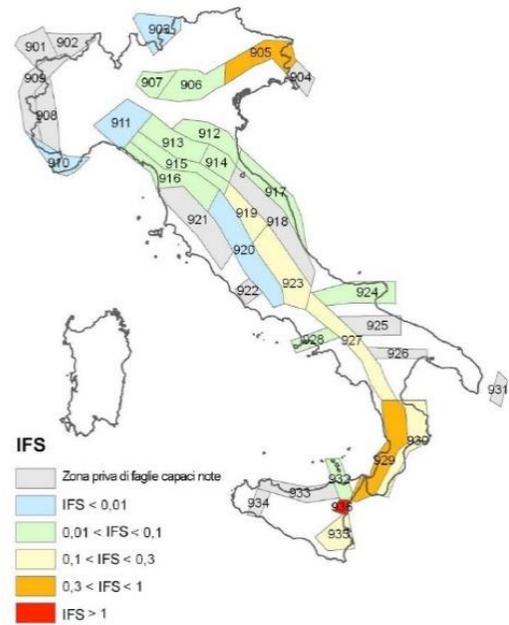
In seguito all’emanazione dell’O.P.C.M. 20/03/2003, n° 3274, in cui si manifestava l’esigenza di una mappa di pericolosità sismica di riferimento per l’individuazione delle zone sismiche sul territorio nazionale, è stato redatto a cura dell’INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) un documento denominato “Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall’O.P.C.M. 20/03/2003, n° 3274. Rapporto conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile” (INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 appendici), che rappresenta il punto di riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica su tutto il territorio nazionale (figura a lato). All’interno della ricerca eseguita per tale redazione, è stata elaborata una nuova zonazione sismogenetica, denominata ZS9 che divide tutto il territorio italiano in 36 zone.



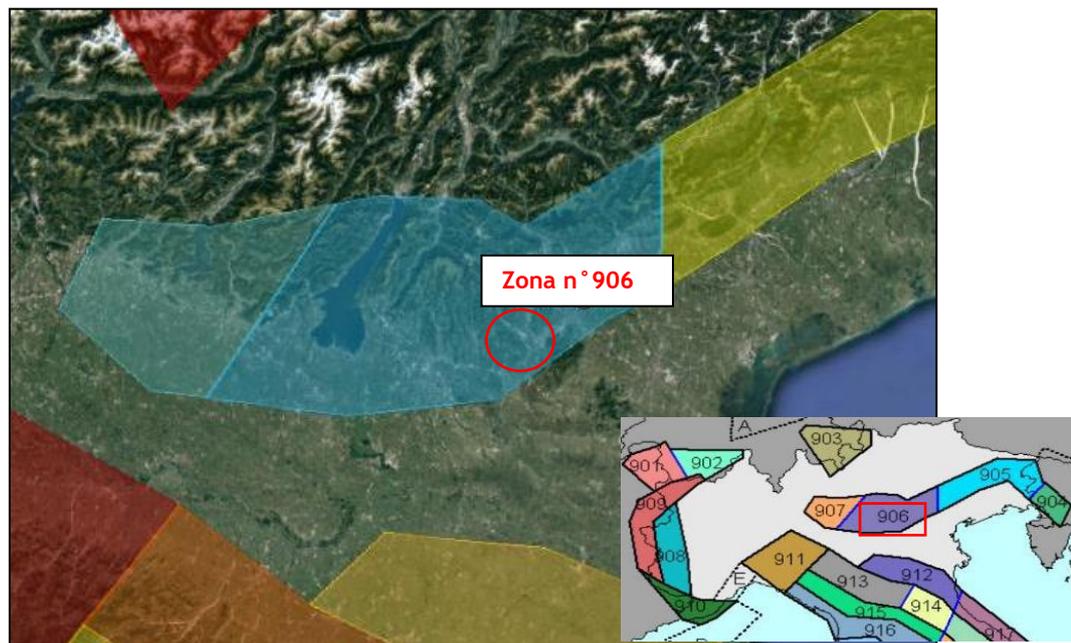
Tale zonazione è stata condotta tramite l’analisi cinematica degli elementi geologici (cenozoici e quaternari) coinvolti nella dinamica delle strutture litosferiche profonde e della crosta superficiale; essa, pur basandosi ampiamente sull’impianto generale e sul *background* informativo della precedente zonazione ZS4 (Scandone e Stucchi, 1996), rappresenta un suo sostanziale ripensamento, alla luce delle evidenze di tettonica attiva, delle valutazioni sul potenziale sismogenetico acquisite nei primi anni del decennio (con i fondamentali contributi del *Database of Individual Seismogenic Sources* (DISS), che, combinando dati geologici, storici e strumentali, censisce le sorgenti in grado di produrre terremoti di magnitudo 5.5 e superiore) e del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (all’epoca della redazione della mappa CPT12, ora arrivato alla versione CPT115). Il confronto tra le informazioni che hanno condotto alla costruzione del modello geodinamico e la sismicità osservata ha permesso di costruire la Carta delle Zone Sismogenetiche del territorio nazionale.

Ogni zonizzazione sismogenetica è caratterizzata da un definito modello cinematico il quale sfrutta una serie di relazioni di attenuazione stimate sulla base di misurazioni accelerometriche effettuate sia sul territorio nazionale che europeo.

Secondo la zonazione sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004), nel Veneto ricadono le Zone Sismogenetiche n°905 “Friuli-Veneto orientale” e n°906 “Garda-veronese”, che interessano rispettivamente la fascia pedemontana tra Bassano del Grappa e il confine con il Friuli-Venezia Giulia e la fascia pedemontana che da Bassano prosegue fino al lago di Garda. Il meccanismo di fagliazione responsabile dei terremoti che si sono verificati in entrambe le zone è di tipo faglia inversa, con una profondità ipocentrale media stimata di 8 km. Entrambe le zone sono legate all’interazione Adria-Europa ma presentano una sismicità differente.



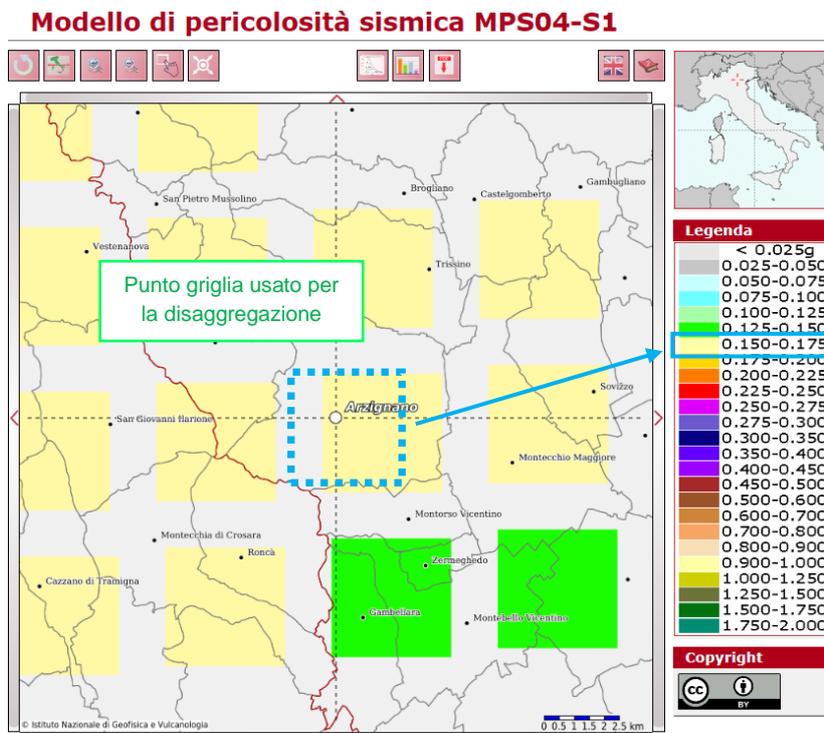
Il comune di Arziagnano si posiziona interamente all’interno della zona sismogenetica n. 906 della figura seguente, per cui si sviluppa all’interno dell’area di massima convergenza tra la placca adriatica ed europea caratterizzata da faglie trascorrenti destre con direzione nord ovest-sud est (trend dinarico-es., Bernardis et al., 2000; Baic et al., 2001; Vrabec, 2001).



Dettaglio della Carta delle zone sismogenetiche ZS9 (Meletti e Valensise, marzo 2004), con l’ubicazione del comune di Arziagnano

4.6 Pericolosità sismica di riferimento

La distribuzione e la caratterizzazione delle zone sismogenetiche finora riconosciute e descritte in precedenza è stata tradotta in una Carta di Pericolosità Sismica, valida su tutto il territorio nazionale ed entrata in vigore con l'O.P.C.M. n° 3519 del 28/04/2006. Nella Carta, della quale la figura seguente rappresenta l'estratto per il comune di Arzignano, sono riportati i valori di accelerazione orizzontale massima al suolo a_g con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, riferiti a suoli rigidi subpianeggianti di Categoria A.



Carta di pericolosità sismica espressa in termini di accelerazione massima del suolo a_g con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita a suoli di Categoria A ($V_{s,30} > 800$ m/s) subpianeggianti (categoria topografica T1 da N.T.C. 2018)

Pertanto, secondo l'O.P.C.M. n° 3519 del 28/04/2006, la cui applicazione è stata definita dalla Regione Veneto con D.G.R.V. n°71 del 22/01/2008 e considerata nell'emanazione del D.M. 17/01/2018, il territorio oggetto dello studio di Microzonazione Sismica è inseribile interamente nella fascia distinta da un valore di accelerazione sismica orizzontale a_g riferito a suoli rigidi subpianeggianti caratterizzati da $V_{s,30} > 800$ m/s compreso tra 0,150g e 0,175g (valori riferiti ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni - mappa 50° percentile), ovvero nella Zona 2, come classifica la tabella riportata sotto, estratta dall'O.P.C.M. n° 3519 stessa.

Pertanto, secondo l'O.P.C.M. n° 3519 del 28/04/2006, la cui applicazione è stata definita dalla Regione Veneto con D.G.R.V. n°71 del 22/01/2008 e considerata nell'emanazione del D.M. 17/01/2018, il territorio oggetto dello studio di Microzonazione Sismica è inseribile interamente nella fascia distinta da un valore di accelerazione sismica orizzontale a_g riferito a suoli rigidi subpianeggianti caratterizzati da $V_{s,30} > 800$ m/s compreso tra 0,150g e 0,175g (valori riferiti ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni - mappa 50° percentile), ovvero in Zona 2, come classifica la tabella riportata sotto, estratta dall'O.P.C.M. n° 3519 stessa.

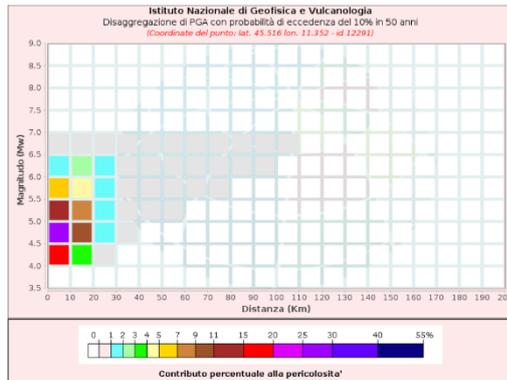
Per gli aspetti amministrativi, tuttavia, il comune di Arzignano rientrava in Zona 3, come classificato nell'elenco (allegato I) della Delibera di Consiglio Regionale n°67/03 (cfr. D.G.R.V. n°71 del 22/01/2008).

Con la nuova D.G.R. n.244 del 09 marzo 2021 è stato aggiornato l'elenco delle zone sismiche del Veneto, e il Comune di Arzignano è stato inserito in zona sismica 2 anche per gli aspetti amministrativi.

a) Ciascuna zona è individuata mediante valori di accelerazione massima del suolo a_g con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, riferiti a suoli rigidi caratterizzati da $V_{S30} > 800$ m/s, secondo lo schema seguente:

zona	accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni $[a_g]$	accelerazione orizzontale massima convenzionale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico $[a_g]$
1	$0,25 < a_g \leq 0,35 g$	0,35 g
2	$0,15 < a_g \leq 0,25 g$	0,25 g
3	$0,05 < a_g \leq 0,15 g$	0,15 g
4	$\leq 0,05 g$	0,05 g

In ultima, si riporta il calcolo della disaggregazione della pericolosità: questa ha lo scopo di individuare il maggior contributo alla pericolosità del sito in termini di magnitudo-distanza di un evento. Dalla ricostruzione dell'INGV riportata sopra, considerando un tempo di ritorno $T_r = 475$ anni e una Categoria A di sottosuolo in condizioni subpianeggianti, si evidenzia che il maggior contributo alla pericolosità sismica locale è dato da eventi di entità M_w compresa tra 4,0 e 6,5 e relativamente vicini ($R =$ entro 10-30 km).



Distanza (Km)	Magnitudo (Mw)										
	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5	8.5-9.0
0-10	0.0000	16.7000	27.2000	12.8000	5.1700	1.8500	0.1810	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10-20	0.0000	3.8900	9.4600	7.3400	4.5400	2.3100	0.2750	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20-30	0.0000	0.1830	1.1800	1.7000	1.5800	1.1300	0.1650	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
30-40	0.0000	0.0000	0.0500	0.3700	0.5500	0.5200	0.0886	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40-50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0375	0.1750	0.2340	0.0466	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
50-60	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0583	0.1480	0.0359	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
60-70	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0100	0.0788	0.0231	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
70-80	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0302	0.0121	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
80-90	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0077	0.0054	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
90-100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0011	0.0019	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
100-110	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
110-120	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
120-130	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
130-140	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
140-150	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
150-160	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
160-170	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
170-180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
180-190	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
190-200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Valori Medi		
Magnitudo	Distanza	Epsilon
5.0	9.69	0.663

Si fa comunque presente che, come tutte le zone sismogenetiche del territorio italiano, anche quella contrassegnata dal n°906 e precedentemente descritta viene considerata omogenea ai fini della probabilità di accadimento degli eventi sismici, ovvero si ritiene che tutti i punti in essa contenuti abbiano la stessa probabilità di essere sede di eventi sismici. Secondo il paragrafo 2.8 degli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica", la magnitudo massima attesa nella Zona n° 906 vale $M_{w,max} = 6,60$.

Tabella 2.8-1 – Valori di $M_{w,max}$ per le zone sismogenetiche di ZS9 (estratto da Gruppo di lavoro, 2004)

Nome ZS	Numero ZS	$M_{w,max}$
Colli Albani, Etna	922, 936	5.45
Ischia-Vesuvio	928	5.91
Altre zone	901, 902, 903, 904, 907, 908, 909, 911, 912, 913, 914, 916, 917, 920, 921, 926, 932, 933, 934	6.14
Medio-Marchigiana/Abruzzese, Appennino Umbro, Nizza Sanremo	918, 919, 910	6.37
Friuli-Veneto Orientale, Garda-Veronese, Garfagnana-Mugello, Calabria Jonica	905, 906, 915, 930	6.60
Molise-Gargano, Ofanto, Canale d'Otranto	924, 925, 931	6.83
Appennino Abruzzese, Sannio - Irpinia-Basilicata	923, 927	7.06
Calabria tirrenica, Iblei	929, 935	7.29

5 MICROZONAZIONE SISMICA. PRINCIPI FONDAMENTALI E FINALITÀ

5.1 Introduzione

I recenti terremoti che hanno interessato il nostro paese hanno ampiamente dimostrato che la variabilità spaziale del danno rilevato trova molto spesso la sua causa principale nei cosiddetti effetti locali o *effetti di sito*, ossia nelle differenti risposte del sito alle azioni sismiche, a causa delle diverse condizioni geologiche, geomorfologiche e geotecniche.

Una efficace cultura di difesa dai terremoti non può che presupporre una valutazione della pericolosità locale a scala urbana, più ampia di quella della singola costruzione, e deve potersi basare su un'operazione tecnico-scientifica che sia autorizzata a rientrare a pieno titolo nelle valutazioni urbanistiche di riduzione del rischio e nelle politiche di pianificazione del territorio.

Tale operazione è, appunto, la Microzonazione Sismica: la MS è l'operazione di suddivisione di un dato territorio in zone omogenee sotto il profilo della risposta a un terremoto di riferimento, valutata tenendo conto delle interazioni tra le onde sismiche e le condizioni proprie di ogni zona individuata (*pericolosità sismica locale*).

5.2 La natura del problema

Durante lo scuotimento sismico e immediatamente dopo il terremoto, si verificano degli effetti molto appariscenti e, spesso, più devastanti dell'onda sismica, che sono tra le cause più importanti di vittime e danni: questi sono gli *effetti di sito*, che sono ormai ben conosciuti e possono amplificare notevolmente le sollecitazioni nelle strutture (di entità tale da portarle fino al collasso) o essere rappresentati da rotture del terreno, movimenti franosi, elevati cedimenti nei terreni soffici, liquefazione dei terreni incoerenti saturi. Le figure sottostanti sono un esempio di tali effetti.



Turchia, agosto 1999



Emilia, maggio 2012



L'Aquila, aprile 2009



Tatsuoka, 2006

Le osservazioni condotte nei secoli hanno dimostrato come possono verificarsi situazioni completamente differenti all'interno dello stesso territorio, anche a breve distanza; fin dagli anni Settanta, le ricerche scientifiche hanno evidenziato che la causa maggiore di variabilità spaziale del

moto sismico sono i fenomeni legati alla propagazione delle onde S nei depositi di terreno, lungo la direzione verticale.

Da tali osservazioni è nata la necessità di iniziare degli studi per ipotizzare il comportamento del territorio in caso di terremoto e, di conseguenza, per valutare la *pericolosità sismica locale* e realizzare la MS, precedentemente definita.

La MS può assumere forme molto diverse a seconda delle condizioni territoriali in cui si realizza ed è difficile da standardizzare anche se, grazie ad alcune procedure ormai consolidate, è possibile sintetizzare lo studio di MS in una cartografia del territorio nella quale sono indicate:

- le zone in cui il moto sismico non viene modificato rispetto a quello atteso in condizioni ideali di roccia rigida e pianeggiante (Categoria A di sottosuolo secondo Eurocodice 8) e, pertanto, gli scuotimenti attesi sono equiparati a quelli forniti dagli studi di pericolosità di base;
- le zone in cui il moto sismico viene modificato rispetto a quello atteso in condizioni ideali di roccia rigida e pianeggiante, a causa delle caratteristiche litostratigrafiche del terreno e/o geomorfologiche del territorio;
- le zone in cui sono presenti o suscettibili di attivazione fenomeni di deformazione permanente del territorio indotti o innescati dal sisma (instabilità di versante, liquefazione, fagliazione superficiale, cedimenti differenziali, ecc.).

In sostanza, dal punto di vista della pericolosità, la MS distingue le seguenti aree:

- **aree sismicamente stabili**, dove possono verificarsi o meno *effetti di sito* (stratigrafici, di valle, topografici, ecc.);

EFFETTI DI SITO

- Qualunque sia l'effetto locale analizzato è necessario valutare preliminarmente gli 'Effetti di sito' ('Risposta Sismica Locale'), ovvero le **modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza** del moto sismico rispetto al *moto di riferimento su affioramento rigido pianeggiante*
- Si distinguono 3 tipi principali di effetti:
 1. **effetti stratigrafici** (monodimensionali, 1D)
 2. **effetti di valle** (bi-tridimensionali, 2D-3D)
 3. **effetti topografici** (bi-tridimensionali, 2D-3D)



- **aree sismicamente instabili**, dove possono verificarsi anche fenomeni di instabilità quali movimenti franosi, crolli di roccia, liquefazione, densificazione, subsidenza, spostamenti di faglia, crolli legati a cavità, ecc.

A tal proposito, per la mitigazione del rischio sismico a scala locale, la finalità di uno studio di MS è, pertanto, quello di pervenire alla stesura di una mappa, dove:

- siano identificati i confini delle zone con analoga risposta al terremoto di riferimento;
- vengano indicati i livelli di pericolosità delle diverse zone attraverso opportuni indicatori.

La mappa di MS diventa, quindi, una cartografia di sintesi che identifica il tipo di problemi e le gerarchie di pericolosità tra le diverse aree; nel caso di Arzignano, tali informazioni serviranno a fornire all'amministrazione comunale uno strumento utile per la futura programmazione territoriale, la pianificazione urbanistica e la gestione delle emergenze, nonché per un eventuale ricostruzione post-sismica. Si fa presente che la MS è legata alla gestione del territorio e alla pianificazione urbanistica e non al progetto delle strutture.

Dott. Geol. Matteo Collareda	<i>Dott.ssa Claudia Tomassoli</i>
con la collaborazione di:	<i>Dott.ssa Laura Guerra</i> <i>Dott. Geol. Emanuele Mammoliti</i>

5.3 Finalità e livelli di approfondimento

La MS ha lo scopo di riconoscere a una scala sufficientemente grande (comunale o subcomunale) le condizioni locali che possono modificare sensibilmente le caratteristiche del moto sismico atteso in termini di ampiezza, durata e frequenza o possono produrre deformazioni permanenti rilevanti per le costruzioni e le infrastrutture. Essa si colloca a un livello intermedio tra la classificazione sismica a scala nazionale, che fa riferimento a un terreno ideale rigido e pianeggiante per il quale fornisce dei parametri indicativi della pericolosità di base, e la progettazione antisismica, che opera invece a scala di singolo manufatto.

L'obiettivo principale è quello di distinguere le zone il cui comportamento può essere instabile (aree critiche) dalle zone dove possono aversi o meno fenomeni di amplificazione del moto sismico (aree stabili suscettibili o non suscettibili), mentre il secondo obiettivo è quello di valutarne la risposta.

Le principali linee guida internazionali, tra cui gli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica del Dipartimento della Protezione Civile (2008), prevedono tre Livelli di approfondimento.

In sintesi:

- il **Livello 1**, propedeutico ai veri e propri studi di MS, si basa prevalentemente sulla raccolta di dati preesistenti, elaborati per suddividere il territorio in microzone qualitativamente omogenee in prospettiva sismica;
- il **Livello 2** associa alle zone omogenee dei parametri quantitativi di interesse ingegneristico-strutturale, utilizzando allo scopo ulteriori e mirate indagini, ove necessarie, e definisce la Carta di Microzonazione Sismica;
- il **Livello 3** quantifica numericamente l'amplificazione del moto sismico atteso in superficie tramite un'analisi monodimensionale o bidimensionale, a seconda delle condizioni geologiche/topografiche presenti nel sito d'indagine, e restituisce una Carta di Microzonazione Sismica con approfondimenti su tematiche o aree particolari.

Va sottolineato che l'adozione di tre livelli consente una grande flessibilità nelle applicazioni, in quanto permette di adeguare il livello di approfondimento alle risorse e ai tempi disponibili, nonché al tipo di utilizzo. Si ritiene che, nelle fasi preliminari di stesura dei piani urbanistici, anche il Livello 1 si possa rivelare di grande efficacia ai fini della prevenzione sismica.

Nel caso in esame, nel territorio comunale di Arzignano è stato eseguito, in data 2012, uno studio di MS di Livello 1 secondo le modalità riportate negli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" approvati dalla Conferenza delle Regioni e delle Province autonome il 13/11/2008 e s.m.i..

Lo studio di microzonazione sismica (MS) di Livello 1 è consistito nella raccolta ed elaborazione dei dati esistenti di natura geologica, geomorfologica, idrogeologica, geotecnica e sismica al fine di pervenire ad una prima suddivisione del territorio comunale studiato in zone omogenee dal punto di vista del comportamento sismico.

Nel caso in esame, è possibile affermare che lo studio di MS è stato svolto ad un Livello 3 di approfondimento, quantificando le variazioni in termini di frequenza, durata e intensità che un moto sismico di base subisce attraversando gli strati più superficiali, fino a raggiungere la superficie. Tali valutazioni hanno portato alla **determinazione dei Fattori di Amplificazione** in corrispondenza delle aree soggette allo studio; in particolare, sono state effettuate modellazioni numeriche bidimensionali rappresentative della sismo-stratigrafia media del territorio. La costruzione dei modelli è stata condotta utilizzando le numerose prove geognostiche effettuate durante lo studio di livello 1 e recuperate dall'archivio del sottoscritto in questa fase.

Alla luce delle analisi effettuate e dei risultati ottenuti, è stato possibile rivisitare lo studio di MS di Livello 1, precedentemente svolto.

Dott. Geol. Matteo Collareda	<i>Dott.ssa Claudia Tomassoli</i>
con la collaborazione di:	<i>Dott.ssa Laura Guerra</i> <i>Dott. Geol. Emanuele Mammoliti</i>

6 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI DA INDAGINI PREGRESSE E DI NUOVA REALIZZAZIONE

6.1 Indagini pregresse e di nuova realizzazione

Lo studio di MS di Livello 1 si occupò di raccogliere tutte le indagini pregresse attraverso la consultazione del catalogo ISPRA e degli archivi dell'ufficio tecnico comunale. In questa nuova fase, per la realizzazione dei modelli di RSL propri del livello 3 di approfondimento, tali dati sono stati integrati da nuove indagini eseguite ex novo e da indagini pregresse realizzate dallo scrivente nel corso dell'attività professionale sul territorio.

Tutte le indagini, pregresse e di nuova realizzazione, sono state schedate, informatizzate e inserite nel DVD allegato allo studio.

Nel dettaglio, nel database realizzato sono state archiviate:

- n° 83 registrazioni di rumore sismico ambientale a stazione singola con elaborazione H.V.S.R. (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) per individuare le frequenze di risonanza dei depositi;
- n° 42 prospezioni sismiche con tecnica passiva Re.Mi. (Refraction Microtremor) sviluppate in array lineari con geofoni ad asse verticale per la ricostruzione sismo-stratigrafica del sottosuolo tramite la misura della velocità di propagazione delle onde S;
- n° 4 prospezioni sismiche a rifrazione con inversione tomografica sviluppate in array lineari con geofoni ad asse verticale per individuare le principali unità geofisiche tramite la stima delle velocità di propagazione delle onde longitudinali P (Vp);
- n° 2 profili geoelettrici 2D in configurazione Wenner per misurare la resistività dei terreni al fine di valutare l'assetto stratigrafico del sottosuolo;
- n° 12 Prove Penetrometriche Dinamiche Super Pesanti (DPSH), n° 12 Prove Penetrometriche Dinamiche Medie (DN) per la caratterizzazione stratigrafica a geotecnica del sottosuolo;
- n° 7 Sondaggi geognostici a carotaggio continuo dal geo-portale dell'ISPRA e da relazioni geologiche condotte dal sottoscritto per il comune, per la caratterizzazione stratigrafica del sottosuolo;

6.2 Metodologia di elaborazione delle nuove indagini

6.2.1 Indagine sismica di tipo passivo a stazione singola (H.V.S.R.)

La tecnica di sismica passiva (tecnica dei rapporti spettrali o H.V.S.R., *Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e non richiede nessun tipo di perforazione, né stendimento di cavi, né energizzazioni esterne diverse dal rumore ambientale che in natura già esiste ovunque. I risultati che si possono ottenere da una registrazione di questo tipo sono:

- la **frequenza di risonanza del sito**, che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale. Si dovranno adottare adeguate precauzioni nel costruire edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno, per evitare l'effetto di *doppia risonanza*, estremamente pericoloso per la stabilità degli stessi;

Dott. Geol. Matteo Collareda	<i>Dott.ssa Claudia Tomassoli</i>
con la collaborazione di:	<i>Dott.ssa Laura Guerra</i> <i>Dott. Geol. Emanuele Mammoliti</i>

- la **frequenza fondamentale di risonanza di un edificio**, qualora la misura venga effettuata all'interno dello stesso. In seguito, sarà possibile confrontarla con quella caratteristica del sito (*free field*) e capire se, in caso di sisma, la struttura potrà essere o meno a rischio;
- la **velocità media delle onde di taglio V_s** , calcolata tramite un apposito codice di calcolo. È necessario, per l'affidabilità del risultato, conoscere la profondità di un riflettore noto dalla stratigrafia (prova penetrometrica, sondaggio, ecc.) e riconoscibile nella curva H/V. Sarà quindi possibile calcolare la $V_{s,30}$ e la relativa categoria di sottosuolo come esplicitamente richiesto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni del 17/01/2018;
- la **stratigrafia del sottosuolo** con un *range* di indagine compreso tra 0,5 m e 700 m di profondità anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 m. Il principio su cui si basa la presente tecnica, in termini di stratigrafia del sottosuolo, è rappresentato dalla definizione di strato inteso come unità distinta da quelle sopra e sottostante per un contrasto d'impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e la densità del mezzo stesso.

Le basi teoriche della tecnica H.V.S.R. si rifanno in parte alla sismica tradizionale (riflessione, rifrazione, diffrazione) e in parte alla teoria dei microtremori. La forma di un'onda registrata in un sito x da uno strumento dipende:

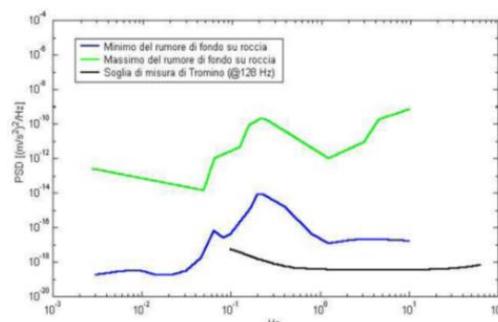
- dalla forma dell'onda prodotta dalla sorgente s ;
- dal percorso dell'onda dalla sorgente s al sito x (attenuazioni, riflessioni, rifrazioni, incanalamenti per guide d'onda);
- dalla risposta dello strumento.

Possiamo scrivere questo come:

segnale registrazione al sito x = sorgente * effetti di percorso * funzione trasferimento strumento

Il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica oltre che, ovviamente, dall'attività dinamica terrestre. Si chiama anche *microtremore* poiché riguarda oscillazioni molto piccole, molto più piccole di quelle indotte dai terremoti. I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi, poiché il rumore non è generato *ad hoc*, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva. Nel tragitto dalla sorgente s al sito x le onde elastiche (sia di terremoto che microtremore) subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamenti per fenomeni di guida d'onda, attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo attraversato. Questo significa che, se da un lato l'informazione riguardante la sorgente è persa e non sono più applicabili le tecniche della sismica classica, è presente comunque una parte debolmente correlata nel segnale che può essere estratta e che contiene le informazioni concernenti il percorso del segnale e, in particolare, relative alla struttura locale vicino al sensore. Dunque, anche il debole rumore sismico, che tradizionalmente costituisce la parte di segnale scartata dalla sismologia classica, contiene informazioni. Questa informazione è però sepolta all'interno del rumore casuale e può essere estratta attraverso tecniche opportune.

Una di queste tecniche è la teoria dei rapporti spettrali o semplicemente H.V.S.R., che è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali del sottosuolo, informazione di notevole importanza nell'ingegneria sismica. Per l'acquisizione dei dati è stato utilizzato un tromometro digitale della ditta Moho S.r.l. modello *Tromino® ENGY-Plus* che rappresenta la nuova generazione di strumenti ultra-leggeri e ultra-compatti in alta risoluzione adatti a tali misurazioni. Lo strumento racchiude al suo interno tre velocimetri elettrodinamici ortogonali tra loro ad alta definizione con intervallo di frequenza compreso tra 0,1 Hz e 256 Hz. Nella figura a fianco si riporta la curva di rumore di Tromino® a confronto con i modelli standard di rumore sismico massimo (in verde) e minimo (in blu) per la Terra. Gli spettri di potenza sono espressi in termini di accelerazione e sono relativi alla componente verticale del moto.



Sintesi dei risultati

Le frequenze di risonanza del terreno fanno parte degli “effetti di sito” che, assieme all’instabilità per azione sismica, caratterizzano la vulnerabilità del territorio quale elemento indispensabile per la stima del rischio sismico. In linea di principio, visto che il suolo è assimilabile ad un corpo viscoelastico, è possibile misurarne le frequenze proprie di oscillazione in ogni punto: infatti, le frequenze sono determinate dalle proprietà meccaniche e, in maniera secondaria, dalla morfologia attorno al punto di misura.

Analizzando la “Carta delle frequenze” e la “Carta delle indagini” successivamente descritte, si vede come sia stato indagato integralmente il territorio previsto dall’incarico e come le n° 83 misure H.V.S.R. eseguite nei vari livelli di approfondimento, siano state distribuite in modo da interessare completamente il comune di Arzignano: la distribuzione delle prove è stata ottimizzata per vedere il “modo” di rispondere dei vari depositi alle sollecitazioni sismiche.

Durante le fasi interpretative delle misure HVSR si è cercato di individuare la frequenza “fondamentale” considerando la finestra frequenziale di 0,1-20 Hz, che risulta essere quella di normale interesse ingegneristico-strutturale.

Nella tabella seguente è riportata esclusivamente la sintesi dei risultati delle misure H.V.S.R. eseguite o recuperate appositamente per gli studi di MS3 mediante Tromino®; i report dei risultati di tali prove sono archiviati all’interno della cartella “Documenti”, nella struttura di archiviazione prevista dagli Standard di archiviazione e rappresentazione.

CODICE PROVA	F ₀ “FONDAMENTALE” [Hz] (INTERVALLO 0,1 - 20 Hz)	AMPIEZZA F ₀	CONDIZIONE DI AMPLIFICAZIONE (INTERVALLO 0,1-20 Hz)
024008P178	1.47	3.53	si
024008P179	6.25	5.97	si
024008P180	2.1	3	si
024008P181	1.25	4	si
024008P182	3.38	4.95	si
024008P183	5.25	5	si
024008P184	1.2	2.3	si
024008P185	2.5	4.55	si
024008P186	6	2.8	si
024008P187	3.66	3.1	si
024008P188	7.63	2.35	si
024008P189	5.59	4.9	si
024008P190	3.56	3	si
024008P191	20	4	si
024008P192	13	4	si
024008P193	2.44	3.85	si
024008P194	6.41	6	si
024008P195	2.4	4	si
024008P196	3.22	5.88	si
024008P197	2.28	2.5	si
024008P198	7.38	4.5	si
024008P199	4.5	3.1	si
024008P200	1.81	5	si
024008P201	4.47	3.41	si
024008P202	3.05	3.8	si
024008P203	3.41	2.1	si
024008P204	3.75	4	si
024008P205	2.06	2	si
024008P206	1.47	1.5	si

024008P207	2	3	si
024008P208	3.31	2.8	si
024008P209	1.88	3	si
024008P210	10	3	si
024008P211	1.47	3.1	si
024008P212	1.5	3.2	si
024008P213	3.91	3.9	si
024008P229	2.59	4.1	si
024008P214	9.66	4	si
024008P215	10.3	4	si
024008P216	5	6	si
024008P217	6.94	6	si
024008P218	2.81	3	si
024008P219	7.81	4.1	si
024008P220	6.72	3.1	si
024008P221	5.53	4	si
024008P222	9	4.5	si
024008P223	2.1	5	si
024008P224	16	6	si
024008P225	5	3	si
024008P226	6	5	si
024008P227	7.1	3.5	si
024008P228	8	2.1	si
024008P230	3	3.9	si
024008P231	2.2	5	si
024008P232	2	4.5	si
024008P233	1.84	4.5	si
024008P234	2.5	3.95	si
024008P235	1.8	3.1	si
024008P236	1.8	6	si
024008P237	3	4.8	si
024008P238	2	5	si
024008P239	2.16	3	si
024008P240	6.56	6	si
024008P241	8.25	3	si
024008P242	-	-	Disturbata
024008P243	5	3.2	si
024008P244	4.8	3.1	si
024008P245	6.25	3.1	si
024008P246	9.7	3.2	si
024008P247	2.1	2.4	si
024008P248	3.3	3.9	si
024008P250	2.03	2.8	si
024008P249	5.94	2.6	si
024008P251	14.25	3	si
024008P252	6.63	4	si
024008P253	-	-	Disturbata
024008P254	2.38	3.4	si
024008P256	2.19	3.9	si
024008P255	2.31	4.1	si
024008P257	2.4	3	si
024008P258	1.88	2.2	si
024008P287	2.66	5.1	si
024008P288	3.09	4.2	si

In allegato fuori testo sono invece riportati i report dei risultati di tali prove. In particolare, per ogni misura sono stati indicati:

Dott. Geol. Matteo Collareda	<i>Dott.ssa Claudia Tomassoli</i>
con la collaborazione di:	<i>Dott.ssa Laura Guerra</i> <i>Dott. Geol. Emanuele Mammoliti</i>

- i grafici rappresentanti il rapporto spettrale H/V registrato e l'andamento delle tre componenti spettrali;
- la time history del segnale e la documentazione fotografica;
- la qualità del segnale acquisito in base al progetto SESAME (*Linee guida 2005*).

6.2.2 Indagine sismica di tipo passivo/attivo in array (Re.Mi.)

È noto che la propagazione delle onde, nel caso di mezzi stratificati e trasversalmente isotropi, avviene in maniera diversa rispetto al caso di mezzi omogenei; non esiste più un'unica velocità, ma ogni frequenza è caratterizzata da una diversa velocità di propagazione a sua volta legata alle varie lunghezze d'onda. Queste lunghezze d'onda interessano il terreno a diverse profondità e risultano influenzate dalle caratteristiche elastiche che sono variabili, appunto, con la profondità. Questo comportamento viene definito *dispersione in frequenza* ed è fondamentale nello sviluppo dei metodi sismici che utilizzano le onde di superficie. Ovviamente, le lunghezze d'onda più grandi corrispondono alle frequenze più basse e vanno ad interessare il terreno più in profondità; al contrario, le lunghezze d'onda più piccole, poiché sono associate alle frequenze più alte, rimangono nelle immediate vicinanze della superficie. I metodi di prospezione sismica che utilizzano le onde di superficie si basano su modelli fisico-matematici nei quali il sottosuolo viene schematizzato come una serie di strati con caratteristiche elastiche lineari.

La procedura Re.Mi. è un metodo di prospezione sismica sviluppato presso l'Università di Reno in Nevada (Louie, 2001) e viene classificato come *metodo passivo* in quanto utilizza il rumore ambientale. I vantaggi derivanti da questo metodo sono molteplici poiché è veloce e semplice da usare in fase di acquisizione, raggiunge una buona profondità e risoluzione d'indagine ma, soprattutto, permette di ottenere migliori risultati in ambienti particolarmente urbanizzati. La fase di acquisizione deve essere effettuata con una serie di accorgimenti e precauzioni da adottare in sito e nella pianificazione della registrazione. Tutto è finalizzato alla registrazione di dati contenenti la miglior informazione possibile riguardo alla propagazione delle onde di Rayleigh con buon rapporto segnale-rumore.

Il rumore incoerente, cioè di tipo casuale, rappresenta nel caso Re.Mi. la fonte del segnale utile che si vuole registrare. I microtremori generati dall'ambiente si propagano nel suolo e di questi si cerca di distinguere il modo fondamentale di vibrazione dell'onda di Rayleigh dai modi superiori e dall'*aliasing* spaziale: risulta quindi necessario soddisfare la condizione di *omnidirezionalità* delle sorgenti, cioè si suppone che il rumore ambientale provenga sostanzialmente da tutte le direzioni.

I tempi di registrazione dei microtremori sono decisamente più elevati rispetto alle indagini di tipo attivo. La registrazione viene analizzata in finestre temporali che variano dai 10 ai 30 secondi. Sono da considerare la lunghezza dello stendimento L e la distanza intergeofonica Δx , che agisce sul segnale come una specie di filtro in frequenza; supponendo, infatti, che il segnale arrivi da tutte le direzioni, maggiore è la spaziatura, minore sarà la frequenza del segnale utile campionabile e viceversa: se la frequenza è più bassa, aumenta la profondità d'indagine. La fase più delicata è quella del *data processing*, che consiste nel trattamento dei dati acquisiti con l'obiettivo di stimare la velocità di fase delle onde di Rayleigh (V_r), che sono correlabili con le velocità V_s di propagazione delle onde S ($V_s \approx 1,1 V_r$). Le varie tecniche di processing trasformano l'informazione registrata nel dominio $x-t$ (spazio tempo), in un dominio dove l'energia associata all'evento è funzione della frequenza e di altre variabili. Tutto questo allo scopo di localizzare attraverso lo spettro la densità di energia maggiore, alla quale sono di solito associate le onde di Rayleigh. Con procedura manuale vengono selezionati dei punti sullo spettro, che andranno a formare la curva di dispersione sperimentale.

La scelta di questi valori, denominata *picking*, è condizionata da alcune indicazioni ma è imprescindibile dall'abilità e dall'esperienza dell'interprete anche in base ad altre conoscenze in merito al sito in esame.

Per ottenere un elevato dettaglio del segnale, il *sampling rate* utilizzato è stato di 512 Hz. La durata (lunghezza temporale) del segnale registrato per ogni misura è stato di circa 6 minuti. Il software utilizzato per l'analisi spettrale è [Grilla v.9.7.0 release 2021](#).

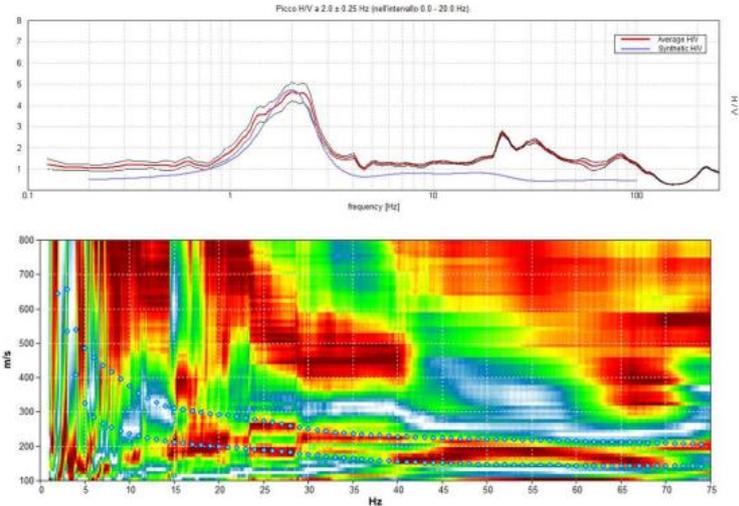
Data la necessità di analizzare con elevato dettaglio le basse frequenze (tipicamente anche al di sotto dei 10 Hz), sono stati utilizzati n°16 geofoni verticali a 4,5 Hz uniti in *array* lineari totalmente digitali (*SoilSpy Rosina*). Ogni geofono è munito di un digitalizzatore che converte il segnale e lo trasmette al sismografo tramite un'interfaccia USB. Tale sistema permette di avere elevati rapporti di rumore, un perfetto sincronismo e una estrema leggerezza. Tutti gli stendimenti eseguiti non presentavano sostanziali variazioni di quota e, quindi, i siti indagati sono stati considerati a sviluppo orizzontale.



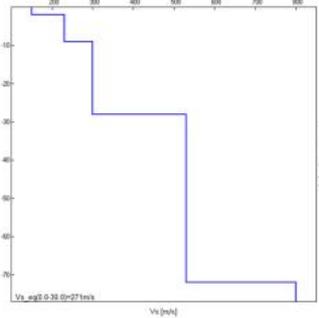
Sintesi dei risultati

Come detto in precedenza, nel territorio comunale sono state fatte una serie di misure sismiche passive di superficie Re.Mi. per approfondire le conoscenze sulle caratteristiche sismiche dei litotipi costituenti il territorio in esame: in particolare, esse sono state utilizzate per determinare la velocità di propagazione delle onde di taglio S (V_s) dei terreni testati. A seguire si riporta una scheda di esempio mentre per la presa visione completa si rimanda al relativo allegato.

MODELLED RAYLEIGH WAVE PHASE VELOCITY DISPERSION CURVE

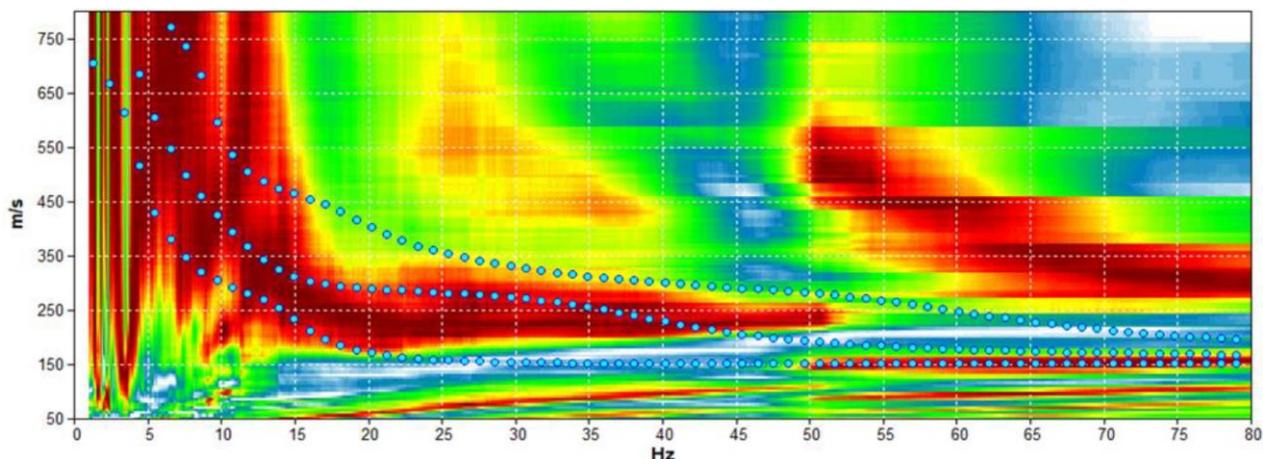


Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	V_s [m/s]
2.00	2.00	150
9.00	7.00	230
28.00	19.00	300
72.00	44.00	530
inf.	inf.	800

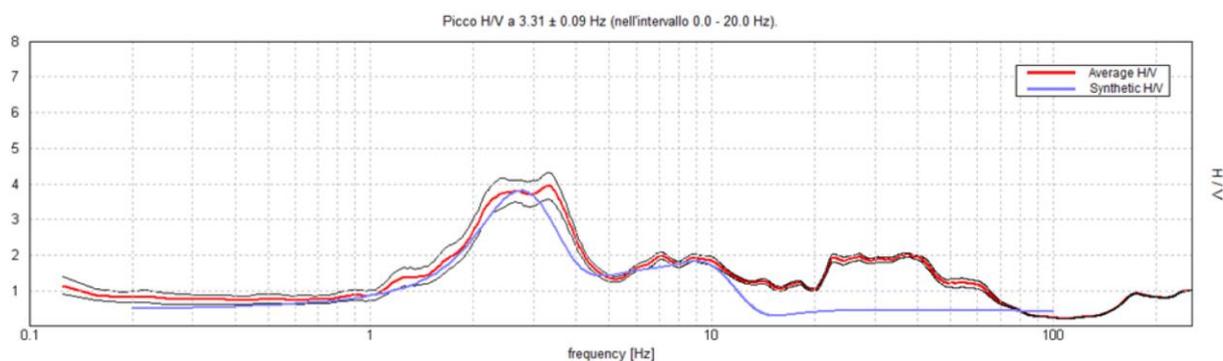


6.3 Modello geosismico del sottosuolo. Interpretazione e incertezze

La valutazione della risposta sismica locale, sia con approccio semplificato sia con modellazioni avanzate, non può prescindere da un'accurata ricostruzione del modello geosismico del sottosuolo tramite l'utilizzo di indagini geofisiche specifiche. Le misurazioni effettuate in *array* (Re.Mi.) ed a stazione singola (H.V.S.R.), hanno permesso di ricostruire, con una buona precisione, i modelli sismo-stratigrafici locali, poiché i segnali si presentano con un'elevata coerenza nel modo fondamentale. Inoltre, la presenza di un rumore di fondo caratterizzato da un ricco spettro frequenziale ha permesso di ottenere, nella maggior parte dei casi, un'elevata profondità di penetrazione per quanto riguarda le misure in *array*.



Spettro di velocità da misura sismica in array (L37): è possibile notare l'elevata coerenza del segnale e le basse frequenze indagate



Curva H/V da misura P248: la curva mostra un forte contrasto sismico alle medie frequenze (3-4 Hz)

La profondità del *bedrock* sismico ed il grado di rigidità della copertura, come ben noto, contribuiscono in maniera determinante nella valutazione della risposta sismica locale, amplificando gli effetti in modo considerevole. Tali amplificazioni saranno tanto più marcate quanto più elevati sono i contrasti di rigidità tra i vari sismo-strati.

I risultati hanno evidenziato un modello geologico del sottosuolo piuttosto regolare, in cui si riconosce il substrato vulcanico profondamente alterato, spesso ricoperto da depositi fini eluvio-colluviali e di conoide in zona collinare e pedecollinare, e celato nel fondovalle dai depositi grossolani dei materassi alluvionali dei torrenti Chiampo e Agno-Guà.

L'integrazione di tutte le informazioni tratte dalla geologia di superficie e dai dati di sottosuolo provenienti dai sondaggi e dalle indagini HVSR realizzate nell'ambito del presente studio hanno permesso la ricostruzione di un modello geologico-tecnico del sottosuolo presente al di sotto del centro urbano di Arzignano.

Dott. Geol. Matteo Collareda	<i>Dott.ssa Claudia Tomassoli</i>
con la collaborazione di:	<i>Dott.ssa Laura Guerra</i> <i>Dott. Geol. Emanuele Mammoliti</i>

Nelle zone collinari e pedecollinari del territorio comunale affiora il substrato geologico quasi sempre rappresentato dai prodotti vulcanici che vanno dal Paleocene sup. all'Eocene medio e sono definiti da tufi e brecce d'esplosione extradiatremiche, da ialoclastiti e da colate a chimismo basaltico. Intercalate ai termini vulcanici si rinvengono subordinatamente i calcari Nummulitici (LPS) che affiorano limitatamente sul territorio comunale.

Il substrato vulcanico non si presenta rigido nell'immediato sottosuolo, ma si può individuare un primo spessore di circa 15-25 m con $V_s \approx 400$ m/s, corrispondente alla porzione fratturata/alterata che in profondità tende invece ad irrigidirsi, fino a raggiungere anche il bedrock sismico. La limitata estensione areale degli affioramenti dei calcari Nummulitici non ha consentito una caratterizzazione sismica degli stessi.

Procedendo verso la zona pedecollinare e valliva del territorio, i substrati sono progressivamente celati da depositi argillosi-limosi eluvio-colluviali, fluvio-glaciali, di conoide di deiezione (MLec, MLfg, CLcz) e ghiaiosi-sabbiosi (GMfg) costituenti la coltre alluvionale dei torrenti Chiampo e Agno-Guà. Le alluvioni fini mostrano V_s comprese nel range 180-200 m/s, mentre le ghiaie del fondovalle mostrano entro i primi 15-20 m valori di $V_s \approx 280-340$, per poi incrementare a circa 400-500 m/s, prima di riconoscere il bedrock sismico.

In particolare, l'elaborazione congiunta degli spettri ottenuti con le onde di superficie e dei diagrammi H.V.S.R., insieme ai dati litostratigrafici censiti, hanno consentito di valutare gli spessori complessivi della copertura alluvionale. Le coperture eluvio-colluviali (MLec) si attestano intorno agli 8-10 m prima del substrato SFGR, mentre i depositi di conoide mostrano spessori leggermente superiori anche fino a circa 18-20 m. Gli spessori del letto ghiaioso del fondovalle sono ben documentati dai numerosi sondaggi e pozzi, ed ulteriormente vincolati dalle indagini sismiche; si osservano spessori massimi di circa 80-90 m nella valle del T. Chiampo, mentre in corrispondenza del Centro di Tezze si osservano spessori anche superiori ai 100 m.

7 ELABORATI CARTOGRAFICI

Nel presente capitolo si riportano le descrizioni degli elaborati cartografici prodotti a seguito delle analisi effettuate; nel caso delle carte già presentate per il Livello 1 di Microzonazione sismica, queste sono state **aggiornate** e, dove necessario **modificate**, in virtù dei risultati delle nuove indagini reperite e/o eseguite e delle analisi di approfondimento condotte per la realizzazione del presente lavoro.

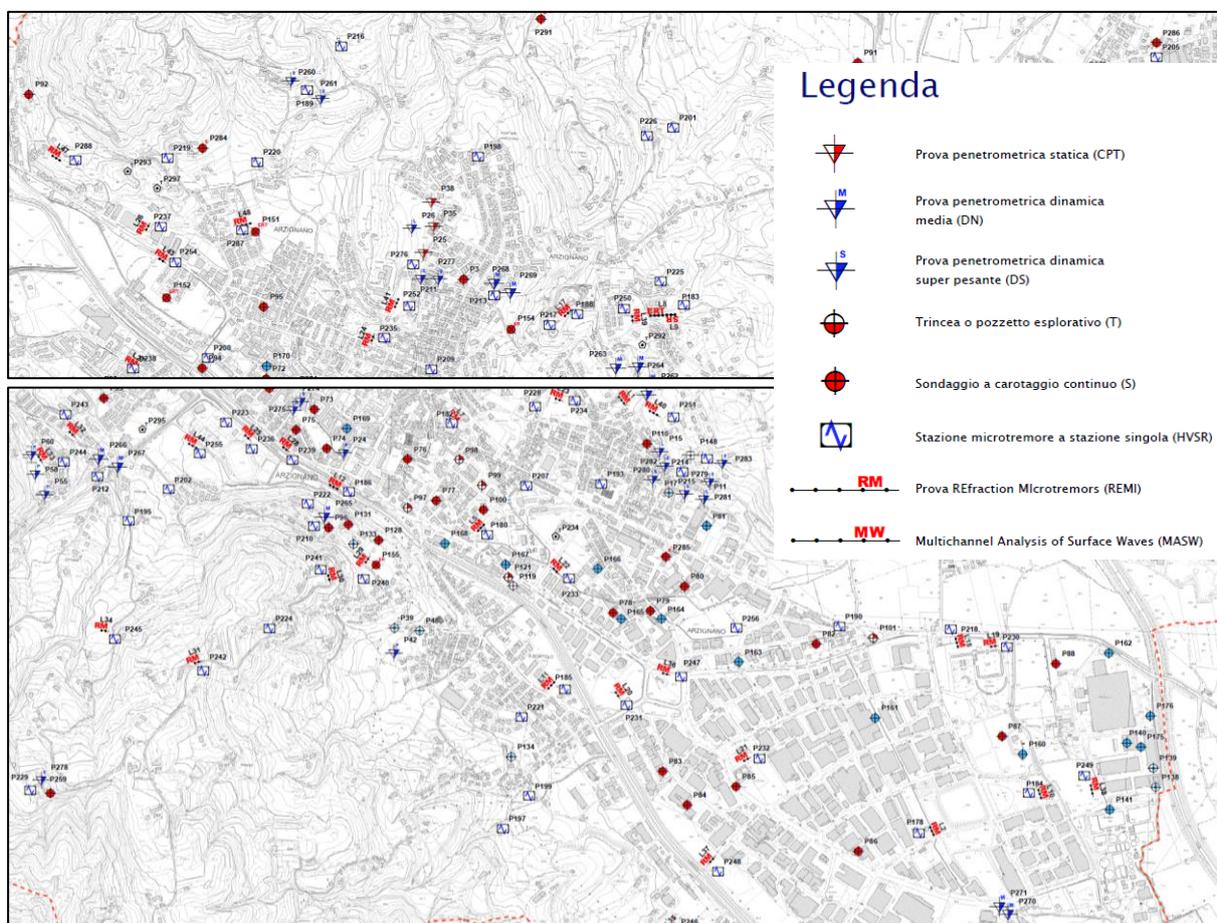
7.1 Carta delle indagini (Livello 1)

Si tratta della cartografia elaborata sulla base della Carta Tecnica Regionale alla scala 1:10.000, con ubicate le indagini eseguite espressamente per le analisi di MS e quelle desunte da lavori pregressi eseguiti nel comune di Arzignano.

In particolare, sono state ubicate le indagini provenienti da:

- Microzonazione sismica di Livello 1
- Catalogo ISPRA
- Studi geologici pregressi raccolti presso l'Ufficio Tecnico Comunale;
- Indagini geognostiche e geofisiche di nuova realizzazione;
- Indagini pregresse dall'archivio dello scrivente.

Nella figura precedente è riportato un estratto della “Carta delle indagini” prodotta per il presente lavoro che dimostra come sia stato indagato, in modo dettagliato, l'intero territorio comunale; i rapporti delle indagini di nuova realizzazione, insieme a quelle raccolte e /o realizzate per il livello 1 di MS, sono stati schedati, informatizzati e inserite nel supporto informatico allegato all'interno della cartella “Indagini \ Documenti”.



7.2 Carta delle frequenze

La misura delle vibrazioni ambientali (note anche come rumore sismico ambientale o microtremori) o della sismicità di fondo (*weak motion*) consente di analizzare la variazione della risposta sismica di un sito al variare delle condizioni litostratigrafiche.

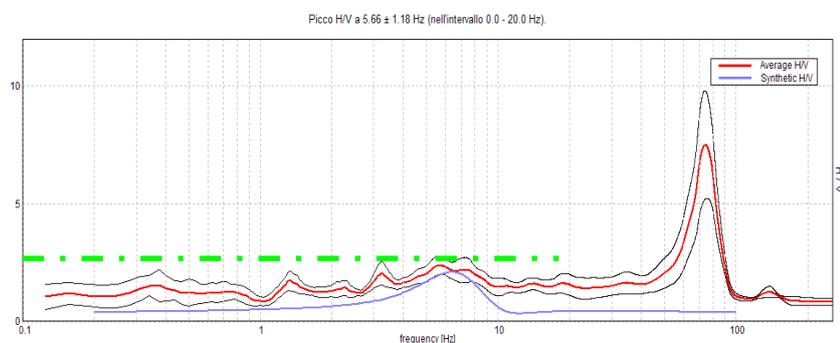
Durante le indagini di MS dell'area aquilana dopo il terremoto del 6 aprile 2009, i risultati di tali analisi si sono rilevati estremamente utili sin dalle prime fasi di elaborazione delle carte di Livello 1.

L'analisi dei microtremori attraverso la tecnica *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (H.V.S.R.) consente di mettere in luce fenomeni di risonanza sismica e di stimare le frequenze alle quali il moto del terreno può essere amplificato (frequenza fondamentale di risonanza del terreno, F_0). Il metodo consente inoltre di valutare qualitativamente l'entità dell'amplificazione (ampiezza del picco H.V.S.R. alla frequenza F_0) - anche se l'ampiezza del picco H.V.S.R. è una grandezza da interpretare con cautela - e di fornire una stima indicativa sulla profondità del contrasto di impedenza che causa la risonanza sismica. I risultati delle indagini H.V.S.R. da microtremori hanno consentito di realizzare la Carte delle Frequenze e hanno fornito informazioni utili a definire e delineare la Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS), hanno dato informazioni su locali criticità e sono stati utili nella pianificazione delle indagini lineari.

I siti selezionati per le indagini sismologiche sono stati distribuiti in corrispondenza delle differenti unità litologiche presenti nell'area, al fine di verificare e valutare l'influenza dei litotipi e delle loro geometrie, sulla risposta sismica locale. In allegato fuori testo sono riportate le schede di sintesi dei risultati di tali prove.

Dal punto di vista ingegneristico-strutturale il valore di risonanza del sottosuolo rappresenta un parametro fondamentale per una corretta progettazione sismica delle strutture. È ormai consolidata, sia a livello accademico sia professionale, l'ipotesi che le strutture subiscano le sollecitazioni sismiche maggiori quando c'è coincidenza tra la frequenza di vibrazione naturale del terreno investito da un'onda sismica e quella naturale dell'edificio. Si dovrà quindi porre estrema attenzione nell'edificare strutture aventi gli stessi periodi di vibrazione del terreno.

Tutte le valutazioni sulle condizioni di amplificazione di sito sono state effettuate considerando la finestra frequenziale di 0,1-20 Hz, in quanto tali frequenze risultano essere quelle di normale interesse ingegneristico-strutturale. Inoltre, le amplificazioni sismiche considerate nella curva H/V sono state quelle con un rapporto superiore a 2: infatti, in base al progetto [SESAME](#), che di fatto fornisce le linee guida per misure sismiche H.V.S.R., il rapporto sotto il quale non si devono considerare le amplificazioni sismiche dovute ad effetti locali è fissato a 2 (linea tratteggiata nella figura sotto).



Sono attribuite condizioni di amplificazione stratigrafica per quei siti in cui la curva mediana di interpolazione del grafico presenta picchi con ampiezza H/V superiore a 2 (criterio SESAME, 2004; Albarello e Castellaro, 2011) all'interno del campo di frequenze compreso tra 0,1 e 20 Hz

Nell'ambito del presente studio, le frequenze di risonanza sono state ottenute utilizzando il software applicativo Grilla in dotazione a Tromino®, secondo la procedura descritta in Castellaro et al. (2005) e Albarello e Castellaro (2011), che prevede quanto segue:

- larghezza delle finestre di analisi pari a 20 s;
- lisciamento secondo una finestra triangolare con ampiezza pari al 10% della frequenza centrale;
- rimozione delle finestre con rapporto STA/LTA (media a breve termine/media a lungo termine) superiore a 2;
- rimozione manuale di eventuali transienti ancora presenti;
- verifica dell'affidabilità delle curve H/V secondo i criteri di qualità SESAME (2004).

Sintesi dei risultati

In sostanza, questa carta, elaborata sulla base della C.T.R. alla scala 1:10.000, evidenzia come la frequenza caratteristica di risonanza di un sito sia variabile e condizionata dai rapporti litostratigrafici che si sviluppano con la profondità. Non viene considerata l'amplificazione dovuta agli effetti topografici e alle morfologie complesse sepolte.

I risultati delle analisi sono stati cartografati, come visibile nell'estratto della "Carta delle frequenze" riportata nella pagina seguente, tramite dei cerchi di diverso colore e con un diametro proporzionale all'ampiezza del picco.

Osservando la Carta delle frequenze, realizzata tramite le misure di rumore ambientale a stazione singola eseguite per il presente studio, è possibile formulare alcune interessanti osservazioni:

- il comune di Arzignano presenta un ampio range di frequenze di risonanza con valori H/V, in generale, abbastanza elevati, per cui risulta possibile ipotizzare elevate amplificazioni del moto sismico in superficie;
- nell'area del fondovalle del comune, che rappresenta anche la porzione maggiormente urbanizzata del territorio, si evidenzia una risonanza alle medio-basse frequenze (1,0 -2,8 Hz) correlabile al passaggio tra la copertura, con spessore di 80-90 metri, e il substrato;
- nella porzione collinare e pedecollinare, invece, si registrano picchi H/V con frequenza maggiori di 6,0 Hz, associabili ai modesti spessori di copertura che ricoprono il substrato alterato posizionato ad una profondità inferiore rispetto all'area del fondovalle.

Frequenza (F0)



1.20 Hz ≤ F0 ≤ 2.81 Hz



3.00 Hz ≤ F0 ≤ 6.00 Hz



6.25 Hz ≤ F0 ≤ 10.30 Hz

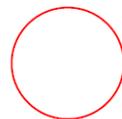


13.00 Hz ≤ F0 ≤ 20.00 Hz

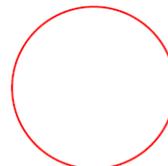
Ampiezza del picco



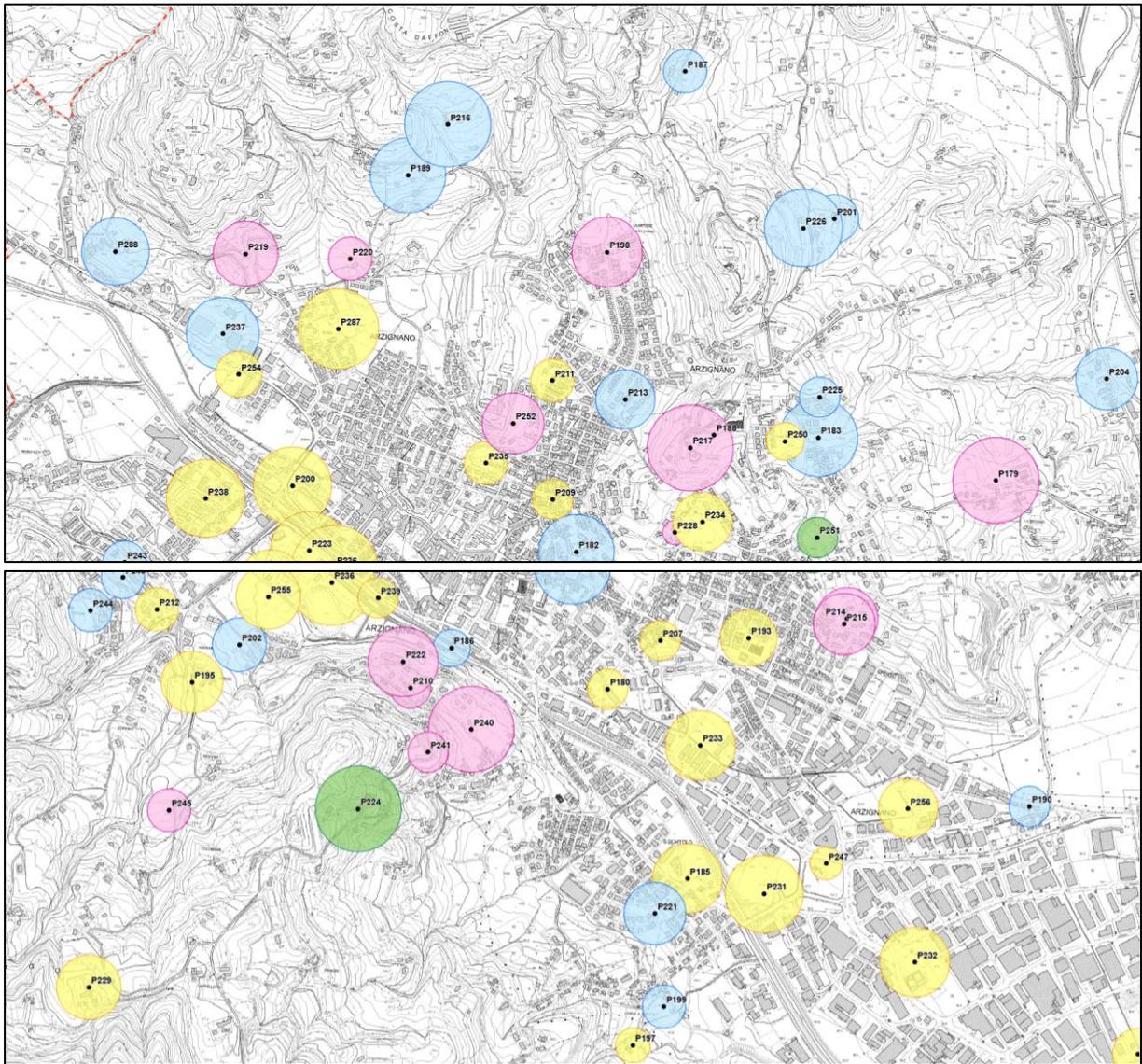
1.5 H/V



4 H/V



6 H/V



Dott. Geol. Matteo Collareda	<i>Dott.ssa Claudia Tomassoli</i>
con la collaborazione di:	<i>Dott.ssa Laura Guerra</i> <i>Dott. Geol. Emanuele Mammoliti</i>

7.3 Carta geologico-tecnica (Livello 1)

La “Carta geologico-tecnica” (CGT) per la microzonazione sismica serve per individuare gli elementi geologici che, in prospettiva sismica, potrebbero assumere un ruolo rilevante nell’esaltazione degli effetti di un terremoto.

Questa carta, durante lo studio di livello 1, è stata elaborata sulla base della Carta Tecnica Regionale alla scala 1:10.000, e ha riguardato l’integrazione e la rivisitazione in chiave sismologica dei contenuti geolitologici, geomorfologici e idrogeologici ricavati dalla consultazione dei seguenti studi:

- Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (approvato con D.G.R. 708/2012);
- Piano di Assetto Idrogeologico del Brenta Bacchiglione (anno 2012);
- Piano di Emergenza Provinciale (anno 2006);
- Piano di Protezione Civile Comunale;
- Indagine geologica del Piano di Assetto del Territorio (anno 2015).

Per l’elaborazione della “Carta geologica-tecnica” sono state, quindi, analizzate le informazioni di carattere geologico disponibili e, sulla base delle caratteristiche meccaniche e degli ambienti genetico-deposizionali dei terreni, le varie unità litologiche sono state accorpate in classi distinte e rappresentative dei depositi costituenti Arzignano.

Alla fine, sono state create due unità principali (“Terreni di copertura” e “Substrato geologico”) che contengono una serie di unità litologiche derivate dalla selezione e, talora, dall’accorpamento delle litologie locali.

Visto che le definizioni previste dagli “standard di rappresentazione e archiviazione informatica” non ricoprono tutti gli ambienti deposizionali, le litologie riconducibili sia all’ambiente fluviale che fluvioglaciale, sono state classificate come appartenenti all’ambiente glaciale (fg).

Per evidenziare i possibili effetti di amplificazione stratigrafica (contrasto di impedenza tra mezzi geologici differenti) e predisporre le informazioni utili per la MOPS (Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica), sulla base degli studi specifici di carattere geofisico, sono stati individuati i contatti tra litologie che possono rispondere in modo differente alla sollecitazione sismica: le indagini hanno verificato che sono presenti risposte sismiche variabili in relazione ai differenti ambienti geomorfologici (orli di scarpate morfologiche, creste e picchi isolati).

In sostanza, per riconoscere, in via preliminare, le aree soggette o non soggette ad amplificazione sismica e quelle di attenzione per instabilità, in questa carta sono state indicate le seguenti situazioni:

- delimitazione del substrato geologico (roccia) dai terreni di copertura: le unità litologiche individuate dal P.A.T. sono state riviste sulla base delle conoscenze dei luoghi, delle prove eseguite, ed uniformate alle indicazioni delle linee guida della Protezione Civile;
- irregolarità del rilievo marcate: orli di scarpata, orli di terrazzo, creste e picchi isolati che possono esaltare gli effetti di amplificazione topografica;
- elementi tettonico-strutturali ricavati dai cataloghi nazionali;
- traccia delle sezioni geologiche rappresentative del territorio comunale riprese dallo studio di MS1;
- informazioni sulla profondità della falda ricavate da indagini pregresse e sulla profondità di pozzi per acqua e sondaggi che hanno raggiunto o meno, il substrato geologico.

Per evidenziare i possibili effetti di amplificazione stratigrafica (contrasto di impedenza tra mezzi geologici differenti, ovvero effetti litologico-stratigrafici), sulla base delle carte litologiche del PAT associate alla consultazione della cartografia geologica generale, sono stati individuati i contatti tra litologie che possono rispondere in modo differente alla sollecitazione sismica.

In conclusione, sulla base delle indagini geognostiche redatte e delle info pregresse, si sono distinte le seguenti unità geologico-tecniche:

<i>Carta Geologico-Tecnica per la Microzonazione Sismica</i>	<i>Carta Geolitologica del P.A.T. (localmente modificata)</i>
SFGR	<i>Rocce superficialmente alterate e con substrato compatto (lave di colata e di neck, ialoclastiti compatte e brecce di neck)</i>
LPS	<i>Rocce compatte stratificate (F.ne dei Calcari Nummulitici)</i>
MLec	<i>Materiali della copertura detritica colluviale poco consolidati e costituiti da frazione limo-argillosa prevalente con subordinate inclusioni sabbioso-ghiaiose e/o blocchi lapidei. Materiali di deposito superficiale di limitato spessore su vaste aree</i>
CLcz	<i>Materiali a tessitura eterogenea dei depositi di conoide di deiezione torrentizia</i>
GMfg	<i>Materiali granulari fluviali e/o fluvioglaciali antichi a tessitura prevalentemente ghiaiosa e sabbiosa più o meno addensati. Materiali sciolti di deposito recente ed attuale dell'alveo mobile e delle aree di esondazione recente</i>

Le forme d'instabilità di versante sono state riprese dalla *Tav. c050301 - Carta Geomorfologica del Piano di Assetto del Territorio* e dalla tavola del PAI mostrate nei paragrafi introduttivi. Si è tenuto conto della tipologia del dissesto e dello stato di attività del fenomeno nel definire la classe di appartenenza. Lo stato di attività di un fenomeno di dissesto fornisce informazioni relativamente al tempo in cui esso si è verificato, e una previsione del tipo di evoluzione, anche in senso temporale, dello stesso.

La focalizzazione delle onde sismiche in corrispondenza di creste, cime o cigli di scarpata è il fenomeno che sta alla base dell'amplificazione topografica. Nella carta prodotta sono state evidenziate le irregolarità morfologiche più marcate che potrebbero produrre particolari amplificazioni sismiche: sono state inserite le informazioni derivanti da fotointerpretazione mettendo in evidenza gli orli di scarpata morfologica e le creste.

Vista la morfologia dei rilievi collinari, è possibile riscontrare, oltre a quelle stratigrafiche, la presenza di amplificazioni dovute agli "effetti di valle" legati alle riflessioni multiple causate dall'intrappolamento delle onde sismiche (P, S e superficiali) all'interno dei depositi di riempimento stessi. Nella "Carta geologico-tecnica" sono state indicate le zone più importanti in cui si ritiene che possano verificarsi tali fenomeni. In particolare, si precisa che, secondo quanto previsto dagli Standard per la Microzonazione Sismica, e sulla base di evidenze morfologiche e stratigrafiche, alle valli sono state assegnate la tipologia di "Valle sepolta larga ($C < 0,25$)".

Effetti stratigrafici associati ad amplificazioni di carattere topografico sono invece possibili per i detriti posti lungo i versanti, condizione che può contemporaneamente verificarsi anche per il substrato roccioso in posto.

Inoltre, nella CGT, come espressamente richiesto nelle linee guida della protezione civile e negli standard di rappresentazione e archiviazione informatica, è stata riportata la profondità del substrato geologico ricavata da sondaggi geognostici e la profondità della falda idrica.

Le tracce delle sezioni geologiche riportate in carta, sono state riprese allo studio di MS a cui si rimanda per la loro visualizzazione.

7.4 Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (Livello 1)

La "Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica" (MOPS), prodotta per il Livello 1 e rivisitata nelle aree su cui è stato svolto il presente studio in virtù dei risultati ottenuti dalle prove geofisiche condotte, ha come finalità la suddivisione del territorio comunale nelle seguenti aree:

1. Zone stabili
2. Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali
3. Zone di attenzione per instabilità

Inoltre, in essa sono rappresentate le seguenti informazioni:

- misure di rumore ambientale H.V.S.R.;
- morfologie sepolte.

La Carta delle MOPS è stata ricostruita alla scala 1:10.000 a partire dalla “Carta geologico-tecnica” per la microzonazione sismica precedentemente esposta, integrandone e rivedendone i contenuti.

7.4.1 ZONE STABILI

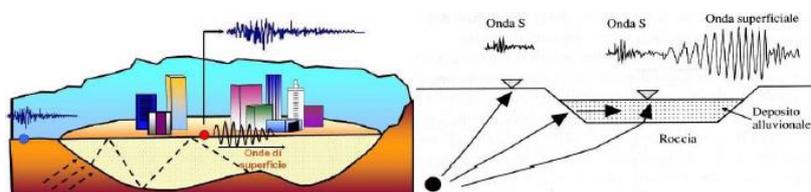
Nel comune di Arzignano non sono state individuate zone “stabili”. In sostanza, si noti che l’intero territorio è considerabile come stabile suscettibile di amplificazione sismica e presenta un’attenzione per instabilità a causa della potenziale liquefazione.

Infatti, è stato verificato che il moto sismico è modificabile rispetto a quello atteso in condizioni ideali di roccia rigida e pianeggiante, a causa delle caratteristiche litostratigrafiche locali.

7.4.2 ZONE STABILI SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI

Il comune di Arzignano risulterebbe suscettibile di amplificazioni locali per i seguenti motivi:

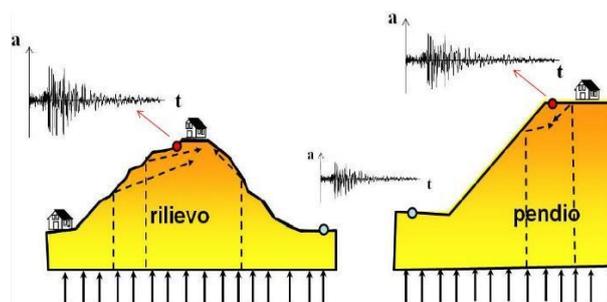
- A. **stratigrafia e caratteristiche dei litotipi.** Come evidenziato nella “Carta geologico-tecnica” e nelle considerazioni fin qui esposte, è stato accertato che sono presenti differenti risposte sismiche variabili in relazione ai diversi ambienti geomorfologici (detrito, roccia, eluvio-colluvio, fluvio-glaciale ecc.) ed al contatto tra le coperture ed il substrato roccioso che si ripercuotono sull’amplificabilità sismica del sito;
- B. **Forme sepolte ed effetti morfologici.** Nei fondivalle sono possibili sia “effetti di valle” associati alle riflessioni multiple causate dall’intrappolamento delle onde sismiche all’interno dei depositi che riempiono le valli, sia amplificazioni stratigrafiche causate dal contrasto di impedenza tra mezzi geologici diversi (per la presenza di materiali sciolti poggianti su substrato roccioso);



*Effetti di valle e bordo (2D o 3D)
Effetti legati alla interazione tra onde sismiche e morfologia sepolta con effetti di focalizzazione delle onde sismiche e generazione di onde di superficie in prossimità dei bordi*

Infatti, una buona parte del territorio comunale di Arzignano si sviluppa all’interno della valle del torrente Agno allungata in direzione nord ovest - sud est, dove il substrato roccioso si trova celato dalle coperture alluvionali, a profondità anche particolarmente elevate, per cui sono possibili gli “effetti di valle” appena descritti. Pertanto, nella carta sono state riportate le informazioni relative alla morfologia sepolta tramite l’asse di valle sepolta definita “larga”.

- C. **amplificazione topografica.** Per quanto riguarda l'amplificazione topografica, è stato qualitativamente coinvolto l'intero territorio collinare, senza fare particolari distinzioni, anche perché la normativa vigente in materia di costruzioni (D.M. 17.01.18) permetterebbe di suddividere omogeneamente le aree in condizioni geometriche ben ricostruibili: Arzignano è costituito da terreni di natura litoide costituenti pendii con inclinazioni superiori a 15° rispetto all'orizzontale e localmente superiore a 40° e dislivelli superiori a 30 m. Il territorio è morfologicamente complesso, quindi non assimilabile ad una condizione monodimensionale e/o piano parallela, pertanto, secondo la normativa è necessario predisporre analisi specifiche di risposta sismica locale. Come anticipato al punto A), si ricorda che nell'ambito collinare l'amplificazione sismica può essere legata, oltre che alle condizioni topografiche dei luoghi, anche a motivi di tipo stratigrafico (detrito su roccia, roccia meno competente su roccia compatta) e, spesso, tali effetti di sito sono associabili tra loro.



Effetti topografici 2D – 3D. - Effetti legati alla interazione tra onde sismiche e morfologia superficiale con effetti di focalizzazione delle onde sismiche

Si ritiene, pertanto, che tutto il territorio collinare di Arzignano sia assoggettabile ad amplificazione sismica per effetto topografico.

Per tale motivo, facendo riferimento sia alla normativa vigente in materia di costruzioni (NTC-18), sia alle esperienze condotte dagli scriventi in situazioni analoghe (mediante modellazioni numeriche avanzate per la verifica dell'amplificazione topografica), si ritiene che tutto l'ambiente studiato sia assoggettabile ad effetti legati alla interazione tra le onde sismiche e la morfologia superficiale.

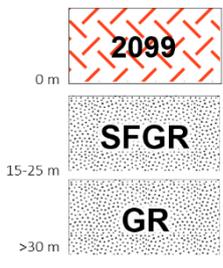
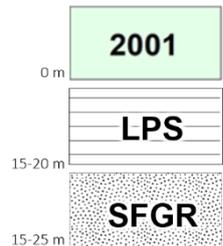
Inoltre, sono state riportate le irregolarità del rilievo marcate costituite dalle linee di cresta, scarpate morfologiche e picchi isolati, in cui sono ritenuti possibili effetti di amplificazione topografica. Nella MOPS sono stati inseriti gli elementi topografici desunti da fotointerpretazione.

Pertanto, sulla base di quanto finora esposto, sono state create 5 zone ordinate dalla Zona 1 alla Zona 5 considerando le caratteristiche litologiche e genetiche dei terreni della "Carta geologico-tecnica" e le potenziali risposte sismiche locali dal punto di vista stratigrafico. Inoltre, è stata creata la Zona 2099 associata alle formazioni alterate e/o fratturate.

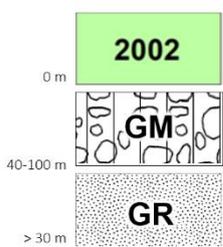
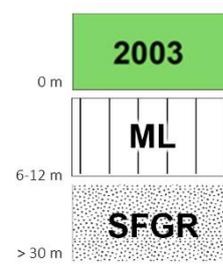
Ad ogni zona è stata assegnata una colonnina stratigrafica: fatto salvo qualche dubbio interpretativo, sono state rappresentate simbolicamente nella tabella che segue.

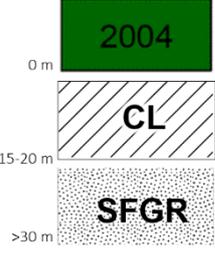
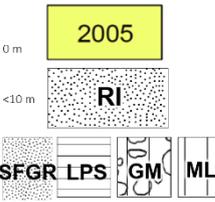
Si ricorda tuttavia che nonostante si sia cercato di creare differenti colonnine stratigrafiche per ciascuna combinazione dei terreni di copertura (e relativi spessori) e dei sottostanti substrati, resta comunque un certo grado di incertezza sulla tipologia del substrato al di sotto dei depositi sciolti dovuta all'assetto tettonico-stratigrafico dell'area caratterizzata da un complesso assetto strutturale.

Substrati geologici

<p>Zona 2099</p>  <p>0 m</p> <p>15-25 m</p> <p>>30 m</p>	<p>Substrato granulare cementato alterato e/o fratturato</p> <p>Substrato fratturato costituito da tufi e brecce d'esplosione extradiatremiche, da ialoclastiti e da arenarie basaltiche prodotte dallo smantellamento degli antichi accumuli vulcanici. Localmente si presentano ben suddivise in strati centimetrici e la stratificazione è resa più evidente dall'alternanza di strati a diversa tonalità tra loro, ma in genere la stratificazione è in banchi metrici e i giunti sono mal distinguibili. In alternanza ai prodotti vulcanoclastici si riscontrano basalti di colata lavica, il cui spessore varia da pochi metri a 10-15 m. Le colate sono talora marcate da un aumento della bollosità e della vacuolarità verso la parte superiore. Il grado di fratturazione delle vulcaniti è in genere piuttosto elevato con spaziatura metrica o decametrica, il grado di persistenza dei giunti è in genere modesto.</p>
<p>Zona 2001</p>  <p>0 m</p> <p>15-20 m</p> <p>15-25 m</p>	<p>Substrato lapideo stratificato</p> <p>LPS: Substrato lapideo stratificato costituito da biocalcareni e calcareniti arenacee compatte suddivise in strati di 20-100 cm di spessore (Calcari Nummulitici - Eocene Medio). Sono presenti come intercalazioni tra i depositi vulcanodetritici e rappresentano periodi di stasi dell'attività vulcanica eocenica durante i quali prevaleva la sedimentazione carbonatica. La fratturazione è quasi sempre modesta ed è caratterizzata da una spaziatura metrica o decametrica.</p>

Terreni di copertura

<p>Zona 2002</p>  <p>0 m</p> <p>40-100 m</p> <p>> 30 m</p>	<p>Ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo</p> <p>GMfg: Terreni grossolani prevalentemente ghiaioso sabbiosi di origine fluvio-glaciale costituenti le alluvioni delle varie fasi deposizionali del T. Chiampo e del T. Agno-Guà. Sono costituite prevalentemente da elementi calcareo dolomitici e filladici a cui si aggiungono abbondanti alluvioni di origine vulcanica; si tratta di accumuli caotici di materiale incoerente ghiaioso sabbioso con percentuali di materiale fine (limo e argilla) variabili tra il 5% e il 15%. In prossimità del rilievo il materasso alluvionale è interdigitato con frequenti corpi lenticolari sabbiosi e/o argillosi, mentre in superficie è presente una copertura di terreni limoso-argillosi di spessore variabile. Gli spessori variano da decine di metri ad oltre 100 m al centro della valle, si trova sopra il substrato GR.</p>
<p>Zona 2003</p>  <p>0 m</p> <p>6-12 m</p> <p>> 30 m</p>	<p>Limi inorganici, farina di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità</p> <p>MLec+MLfg: Terreni di copertura eluvio-colluviale e fluvio-glaciali prevalentemente limosi e limoso-argillosi. I depositi eluvio-colluviali sono presenti su tutto il territorio come coltre di alterazione del substrato vulcanico. Gli spessori medi di tali coperture sono di circa 6-12 m; si trovano sopra il substrato della Zona 2099.</p>

<p>Zona 2004</p>  <p>0 m 15-20 m >30 m</p>	<p>Argille inorganiche di medio-bassa plasticità, argille ghiaiose o sabbiose, argille limose, argille magre</p> <p>CLcz: Terreni di copertura di conoide di deiezione costituiti da materiali eterogenei in prevalenza fini, alternati con sabbie e ghiaie. La consistenza dei depositi di conoide è in generale medio-bassa. Gli spessori sono compresi tra i 15 e i 20 m; si trovano sopra il substrato della Zona 2099.</p>
<p>Zona 2005</p>  <p>0 m <10 m</p>	<p>RI: Terreni contenenti resti di attività antropica</p> <p>Terreni di riporto antropico, spesso riempimenti di siti dismessi di cave in cui è stata estratta ghiaia, poggianti sulle zone: 2099,2001,2002,2003.</p>

7.4.3 ZONE DI ATTENZIONE PER INSTABILITÀ

Per quanto riguarda le Zone di attenzione per instabilità, sono state inserite:

- aree di frana che derivano da una verifica incrociata tra le cartografie del progetto IFFI, quelle del P.A.I. e del PAT. Le frane presenti nella MOPS coincidono perfettamente con quelle riportate nella “Carta geologico-tecnica”;

Zone di attenzione per instabilità

-  ZA_{FR} – Zona di attenzione per Instabilità di versante – Zona 2003
-  ZA_{FR} – Zona di attenzione per Instabilità di versante – Zona 2099

7.5 Carta della pericolosità sismica locale (CPSL)

Le Linee Guida Regionali per la microzonazione sismica prevedono la realizzazione della “Carta di pericolosità sismica locale” (CPSL), nella quale vengono indicate le maggiori criticità del territorio e individuate le aree che richiedono approfondimenti per particolari tematiche e/o assetti stratigrafici-tettonici complessi. Nel territorio comunale è stato assegnato uno scenario di pericolosità sismica locale come riportato nella seguente descrizione:

Legenda

SCENARIO DI PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE

P1 : Zone suscettibili di instabilità



Zona caratterizzata da movimenti franosi attivi



Zona potenzialmente franosa o esposta a rischio frana

P2 : Zone suscettibili a liquefazione e cedimenti



Zona caratterizzata da coltri di terreno di riporto o che hanno subito riempimenti antropici

P3 : Zone suscettibili ad amplificazioni topografiche



Zona di ciglio H > 10 m (scarpata, bordo di cava, nicchia di distacco, orlo di terrazzo fluviale o di natura antropica...)



Zona di cresta rocciosa e/o cocuzzolo: appuntite - arrotondate

P4 : Zone suscettibili ad amplificazioni litologiche e geometriche



Zona di fondovalle ampie e di pianura con depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi



Zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale e conoide detritico-lacustre



Zona in presenza di argille residuali e terre rosse di origine eluvio - colluviale



Confine comunale

In particolare, la zona P4a è stata associata a tutti i materiali sciolti presenti nel comune come depositi alluvionali e fluvio-glaciali granulari e/o coesivi di fondovalle.

La zona P4c è stata assegnata ai depositi di tipo eluvio-colluviale/detritico derivanti dalle conoidi di deiezione e, la zona P4e ai depositi di origine eluvio-colluviale.

Infine, le frane, in base al loro stato di attività sono state collegate alle varie tipologie di P1.

Facendo riferimento alla tabella relativa alla procedura per la MS con i differenti livelli di approfondimento e per i differenti scenari di pericolosità sismica locale (fig. 2 nelle Linee Guida Regionali per la microzonazione sismica) si costata che **l'analisi di Livello 3 appare appropriata per il territorio comunale di Arzignano** per quanto riguarda la stima dei fattori di amplificazione che saranno calcolati tramite modelli numerici bi-dimensionali.

PROCEDURA DI MICROZONAZIONE SISMICA								
SIGLA	SCENARIO PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE	Verifica di $\sigma_{\text{max}}/\sigma_{\text{horiz}}$	(soglia)	1° livello	(soglia)	2° livello	(soglia)	3° livello
P1a	Zona caratterizzata da movimenti franosi attivi				cartografia			Analisi stabilità
P1b	Zona caratterizzata da movimenti franosi quiescenti				cartografia			Analisi stabilità
P1c	Zona potenzialmente franosa o esposta a rischio di frana				cartografia	Analisi di stabilità	Fs prossimo a 1	Analisi stabilità
P2a	Zona con terreni di fondazione particolarmente scadenti quali depositi altamente compressibili, ecc.	zona 4 pga>0,100 zona 3 pga<0,100	pga di sito >0,125		raccolta dati - cartografia	ABITATI* PREV.URBAN.* Cedimenti Eventuale verifica	PREV.URBAN.*	Cedimenti
P2b	Zona con depositi granulari fini saturi	zona 4 pga>0,100 zona 3 pga<0,100	pga di sito >0,125		raccolta dati - cartografia	ABITATI* PREV.URBAN.* Liquefazione Eventuale verifica	PREV.URBAN.*	Liquefazione
P2c	Zona caratterizzata da coltri di terreno di riporto o che hanno subito riempimenti antropici	zona 4 pga>0,100 zona 3 pga<0,100	pga di sito >0,125		raccolta dati - cartografia	ABITATI* PREV.URBAN.* Cedimenti	PREV.URBAN.*	Cedimenti
P3a	Linea di ciglio H>10 m (scarpata, bordo di cava, nicchia di cava, orlo di terrazzo fluviale o di natura antropica, ecc...)				H=10 m; a>15°	Effetti topografici		
P3b	Zona di cresta e/o cocuzzolo: appuntita - arrotondata				h=1/3H; a e a2>15°	Effetti topografici		
P4a	Zona di fondovalle ampie e di pianura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi				Vs30<800m/s, C<0,25 Vs30<800m/s, C<0,25	Effetti litologici	h>0,65/√Cv-1	Effetti lito-geometrici
P4b	Zona di fondovalle stretta (C>0,25) od in presenza di forme geometriche sepolte tali da non permettere di considerare il modello geologico monodimensionale				Vs30<800m/s- C>0,25			Effetti lito-geometrici
P4c	Zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale e conoide deltizio-lacustre				Vs30<800m/s	Effetti litologici		
P4d	Zona morenica con presenza di depositi granulari e/o coesivi (compresi le coltri loessiche)				Vs30<800m/s	Effetti litologici		
P4e	Zona con presenza di argille residuali e terre rosse di origine eluvio-colluviale				Vs30<800m/s	Effetti litologici		
P5a	Linea di contatto stratigrafico e/o tettonico tra litotipi con caratteristiche fisico-meccaniche molto diverse				cartografia	Comportamenti differenziali		
P5b	Zona ove sono presenti o potenzialmente presenti cavità sotterranee o sinkhole				cartografia			Comportamenti differenziali

Dott. Geol. Matteo Collareda	<i>Dott.ssa Claudia Tomassoli</i>
con la collaborazione di:	<i>Dott.ssa Laura Guerra</i> <i>Dott. Geol. Emanuele Mammoliti</i>

8 APPROFONDIMENTI DI LIVELLO 3

Come illustrato nelle pagine precedenti, il comune di Arzignano non si presta ad analisi di Risposta Sismica Locale a strati piano-paralleli per la stima del fattore di amplificazione, a causa delle sue condizioni geologico-morfologiche, che non permettono l'instaurarsi di soli effetti monodimensionali.

Nel caso in esame, vista la morfologia dei luoghi, gli effetti bidimensionali possono giocare un ruolo dominante nell'amplificabilità dei depositi. In particolar modo, nelle aree di cresta e di raccordo pianura-collina si potranno generare delle amplificazioni del moto sismico atteso in superficie, a causa delle articolate morfologie e alla combinazione tra effetti stratigrafici e topografici. Inoltre, nelle zone vallive, l'effetto stratigrafico si può sommare all'effetto amplificativo delle morfologie sepolte, incidendo ulteriormente sull'amplificabilità del moto sismico di base.

Per questo, le quantificazioni della risposta sismica di sito (amplificazione stratigrafica + amplificazione topografica) sono state condotte utilizzando delle modellazioni bidimensionali lungo sezioni rappresentative del comune di Arzignano. Tali valutazioni sono state realizzate in corrispondenza delle aree da microzonare al Livello 3, ed in generale su tutto il territorio urbano e urbanizzabile.

La tecnica di risoluzione numerica adoperata è quella alle differenze finite (FDM) implementata nel codice di calcolo FLAC 8.0 (Itasca, 2018), operante nel dominio del tempo. Il codice effettua un'analisi lagrangiana del continuo risolto mediante uno schema di avanzamento temporale di tipo esplicito.

In particolare, la quantificazione numerica degli effetti sarà rappresentata dai fattori amplificativi FA (fattore di amplificazione in termini di accelerazione) nell'intervallo 0.1-0,5s - 0.4-0,8s e 0.7-1.1s. A partire dai risultati di tali modellazioni e interpolando i valori ottenuti, è stata prodotta una "Carta dei fattori di amplificazione FA (0,1-0,5s)" una "Carta dei fattori di amplificazione FA (0,4-0,8s)" e una "Carta dei fattori di amplificazione FA (0,7-1,1s).

8.1.1 Descrizione del metodo

Il codice di calcolo FLAC 2D v.8.0 (*Fast Lagrangian Analysis of Continua*) della Itasca (2016) è basato sul metodo delle differenze finite con un procedimento di tipo esplicito. La flessibilità nella modellazione della geometria del problema, la disponibilità di elementi strutturali, l'elevato numero di modelli costitutivi implementati e la possibilità di svilupparne anche di nuovi, rendono FLAC idoneo allo studio di tutti i problemi riguardanti il comportamento meccanico di mezzi continui (terreni, rocce, ecc.) e di strutture interagenti. Sviluppato inizialmente per le applicazioni di ingegneria geotecnica e ingegneria mineraria in campo statico, esso ha trovato successivamente, con l'introduzione del modulo dinamico, largo impiego anche per la soluzione di problemi di risposta sismica locale. Il codice di calcolo FLAC, anche per i problemi in campo statico, risolve le equazioni di equilibrio dinamico di un mezzo continuo:

$$\rho \cdot \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial t} = \sum_j \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (8.1)$$

dove:

- ρ è la densità
- x_j la componente i -esima del vettore posizione
- \dot{u}_i la componente i -esima del vettore velocità
- g_i la componente dell'accelerazione di gravità (forze di volume) lungo la direzione i
- τ_{ji} la generica componente del tensore degli sforzi.

Il comportamento meccanico dei materiali è espresso dalla legge costitutiva:

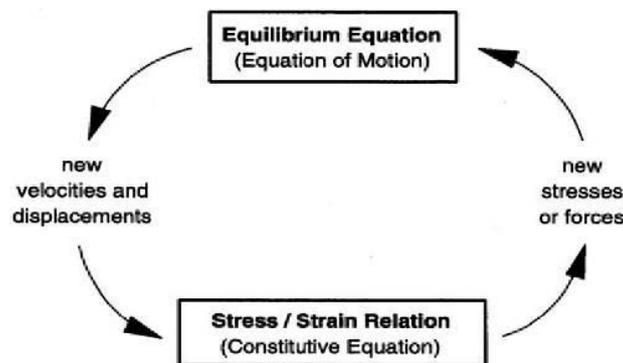
$$\tau_{ji} = M(\tau_{ji}; \dot{\epsilon}_{ij}; k) \quad (8.2)$$

dove k è un parametro che tiene conto della storia di carico, M un funzionale ed $\dot{\epsilon}_{ij}$ il tensore velocità di deformazione espresso dalla:

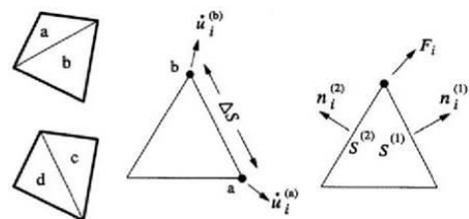
$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (8.3)$$

I materiali vengono rappresentati da elementi quadrilateri, o zone, che formano una griglia (*mesh*) che può essere configurata dall'utente in modo da modellare contatti stratigrafici e morfologie superficiali, anche complesse e irregolari. A ciascuna zona si assegnano le proprietà fisiche e meccaniche che ne caratterizzano il comportamento nell'analisi. I vertici di ogni zona costituiscono i nodi della griglia.

I metodi alle differenze finite come quelli agli elementi finiti traducono un sistema di equazioni differenziali come la (8.1) in un sistema di equazioni algebriche. Se i metodi agli elementi finiti hanno come punto centrale la definizione delle funzioni di forma, che descrivono la variazione delle grandezze che interessano il problema (tensioni, deformazioni) attraverso ciascun elemento, nei metodi alle differenze finite si prescinde da questa definizione della funzione di forma, e le equazioni algebriche vengono scritte direttamente in termini di variabili di campo (tensioni, spostamenti) definite nei nodi della *mesh*. In sintesi, l'algoritmo risolutivo dell'approccio esplicito si articola secondo il ciclo indicato nella seguente figura.



Ad ogni nuovo passo di calcolo (*step*), vengono risolte le equazioni di equilibrio dinamico, per cui dalle tensioni e dalle forze si ottengono i valori corrispondenti delle velocità di deformazione e degli spostamenti; successivamente, dalle velocità di deformazione e attraverso le equazioni dei legami costitutivi, si giunge a valori aggiornati delle tensioni. L'ipotesi base dell'approccio esplicito consiste nel fatto che, durante ciascuna fase, le grandezze vengono ricavate da altre grandezze i cui valori sono assunti costanti durante l'operazione. Ad esempio, attraverso le leggi costitutive, i valori delle velocità di deformazione sono considerati fissi durante l'operazione di calcolo delle tensioni: in altre parole, i nuovi valori calcolati delle tensioni non influenzano le velocità. Questo può apparire poco accettabile dal punto di vista fisico, poiché se c'è una variazione di tensione in un punto, questa necessariamente influenza i punti vicini alterandone le velocità di deformazione. Tuttavia, se l'intervallo di tempo Δt (*timestep*) corrispondente al singolo ciclo di calcolo



Dott. Geol. Matteo Collareda	<i>Dott.ssa Claudia Tomassoli</i>
con la collaborazione di:	<i>Dott.ssa Laura Guerra</i> <i>Dott. Geol. Emanuele Mammoliti</i>

è sufficientemente piccolo, tale alterazione non può propagarsi da un elemento all'altro in tale intervallo.

Tale approccio si è dimostrato particolarmente efficiente nella modellazione di problemi non lineari in presenza di grandi deformazioni. Per contro, essendo il Δt richiesto generalmente molto piccolo, sono necessari un gran numero di passi di integrazione cui corrispondono tempi di calcolo molto elevati.

Gli elementi quadrangolari della griglia vengono automaticamente suddivisi dal programma in due set sovrapposti di triangoli a deformazioni costanti.

Le equazioni alle differenze finite per ogni triangolo si ottengono dalla forma generalizzata del teorema della divergenza di Gauss:

$$\int_S \mathbf{f} \cdot \hat{\mathbf{n}} \cdot d\mathbf{s} = \int_A \text{div } \mathbf{f} \cdot dA \quad (8.4)$$

in cui:

- \mathbf{n} è il versore normale al contorno S del dominio triangolare
- \mathbf{f} la funzione generica (scalare, vettore o tensore)
- A la superficie del dominio triangolare di contorno S
- d_s la lunghezza incrementale lungo il contorno S .

Sostituendo ad \mathbf{f} un valore medio del vettore velocità, la relazione precedente consente di scrivere:

$$\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_i} \cong \frac{1}{2A} \sum_s (\dot{u}_i^{(a)} + \dot{u}_i^{(b)}) n_j \Delta s \quad (8.5)$$

dove (a) e (b) sono due nodi consecutivi sul generico lato del triangolo. Attraverso la (8.3) e la (8.5) è, quindi, possibile calcolare tutte le componenti del tensore velocità di deformazione. La legge costitutiva è poi utilizzata per calcolare un nuovo valore del tensore delle tensioni. Calcolate le tensioni, vengono calcolate le forze equivalenti applicate ai nodi. Le tensioni agiscono in ciascun triangolo come trazioni sui lati del triangolo stesso; ogni trazione è considerata equivalente a due forze agenti sui due nodi all'estremità del lato. Su ogni nodo del triangolo agiscono, quindi, due forze relative ai due lati convergenti nel nodo stesso:

$$\mathbf{F}_i = \frac{1}{2} \tau_{ij} (\mathbf{n}_i^{(1)} S^{(1)} + \mathbf{n}_i^{(2)} S^{(2)}) \quad (8.6)$$

Infine, per ciascun nodo vengono sommate tutte le forze dovute ai triangoli convergenti nel nodo stesso, le forze dovute a eventuali carichi esterni applicati e le forze di volume dovute alla gravità. In tal modo viene determinata la forza nodale netta ΣF_i ; se $\Sigma F_i = 0$, il nodo è in equilibrio, altrimenti subirà un'accelerazione espressa dalla seconda legge di Newton, nient'altro che la (8.1) espressa in termini incrementali:

$$\dot{u}_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \dot{u}_i^{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \left[\sum F_i^{(t)} \right] \frac{\Delta t}{m} \quad (8.7)$$

dove l'apice indica il tempo in corrispondenza del quale è valutata la variabile e m è la massa associata a ciascun nodo pari alla somma di un terzo delle masse dei triangoli convergenti nel nodo. Dalla relazione precedente si determinano nuovi valori della velocità e, quindi, del tensore velocità di deformazione per un nuovo ciclo.

Come detto, condizione essenziale dell'algoritmo descritto è che il *time step* Δt , corrispondente al singolo ciclo di calcolo, sia sufficientemente piccolo da rendere accettabile l'approssimazione di

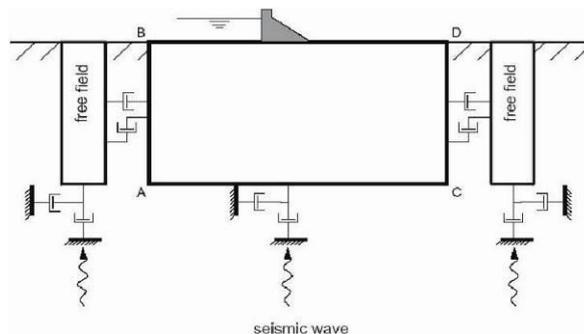
tensioni e velocità costanti sul singolo *step* di calcolo. In particolare, Δt deve essere inferiore ad un *time step* critico Δt_{cr} definito dalla:

$$\Delta t_{cr} = \min \left\{ \frac{A}{V_p \Delta x_{max}} \right\} \quad (8.8)$$

dove A è la superficie del subelemento triangolare, Δx_{max} la dimensione massima della zona (in genere la diagonale) e V_p la velocità delle onde di compressione. La funzione minimo è presa su tutte le zone. Il timestep critico è tanto più piccolo (e i tempi di calcolo quindi tanto più elevati) quanto più la rigidezza del materiale è elevata e quanto più piccolo è l'elemento. Il Δt di calcolo viene determinato internamente da FLAC, applicando un coefficiente di sicurezza pari a 2 al valore fornito dalla (8.8). Particolare attenzione va posta nella scelta delle dimensioni degli elementi della mesh, in quanto queste condizionano in maniera fondamentale l'accuratezza numerica della trasmissione delle onde. In particolare, per un'accurata modellazione viene consigliato di scegliere una altezza degli elementi h almeno pari ad un valore compreso tra un decimo e un ottavo della minima lunghezza d'onda di interesse λ_{min} :

$$h \leq \frac{\lambda_{min}}{10} \quad (8.9)$$

La λ_{min} è la lunghezza d'onda che corrisponde alla massima frequenza di interesse ed è legata ad essa dalla velocità di propagazione delle onde di taglio. I metodi alle differenze finite, così come quelli agli elementi finiti, si basano sulla discretizzazione, tramite una *mesh* di nodi, di una porzione finita dello spazio, per cui appropriate condizioni al contorno vanno imposte ai confini artificiali di tale regione. In ogni problema di propagazione di onde sismiche, parte dell'energia si allontana indefinitamente dalla regione di interesse verso il semispazio circostante per fenomeni di diffrazione e riflessione, dando luogo ad una perdita di energia indicata come *smorzamento di radiazione*. Al fine di modellare correttamente questo fenomeno, FLAC consente di minimizzare la riflessione delle onde sui contorni della *mesh*, imponendo su questi condizioni di campo libero (*free field boundaries*) o viscosi (*quiet boundaries*). La definizione delle condizioni al contorno è strettamente correlata all'applicazione della sollecitazione dinamica, come discusso in seguito.



I contorni *free-field* consistono sostanzialmente in colonne monodimensionali di larghezza unitaria, situate ai lati del modello, che simulano il comportamento di un mezzo infinitamente esteso (figura seguente).

In pratica, essi riproducono il moto libero del terreno che si avrebbe in assenza della configurazione bidimensionale e allo stesso tempo impediscono la riflessione ai bordi della *mesh* delle onde diffratte verso l'esterno. Come illustrato, i singoli nodi dei contorni laterali della griglia principale vengono accoppiati alla griglia *free-field* attraverso smorzatori viscosi che materialmente assorbono l'energia delle onde incidenti sui contorni, applicando delle forze viscosi proporzionali alla differenza tra il campo di velocità esistente al bordo e quello in condizioni *free-field*. Prima dell'applicazione delle condizioni *free-field* durante l'analisi dinamica, il modello deve essere in condizioni di equilibrio

Dott. Geol. Matteo Collareda	<i>Dott.ssa Claudia Tomassoli</i>
con la collaborazione di:	<i>Dott.ssa Laura Guerra</i> <i>Dott. Geol. Emanuele Mammoliti</i>

statico, per cui è necessario eseguire una analisi statica preliminare per determinare lo stato tensionale e deformativo all'interno del modello. All'atto dell'applicazione delle condizioni *free-field*, tutte le variabili di stato determinate dall'equilibrio statico vengono quindi applicate alle colonne monodimensionali ai bordi del modello.

I contorni *free-field* sono di notevole utilità, in quanto consentono di evitare l'allontanamento dei confini laterali, altrimenti necessario in assenza di confini assorbenti, per la minimizzazione delle onde riflesse dai contorni.

I contorni *quiet* sono invece costituiti, secondo la formulazione di Lysmer e Kuhlemeyer (1969), da smorzatori viscosi attaccati alla griglia e agenti in direzione normale e tangenziale al contorno stesso; essi consentono un pressoché completo assorbimento delle onde di volume che incidono sul contorno. I contorni *quiet* possono essere applicati su contorni verticali, orizzontali o inclinati. Essi vanno applicati al confine inferiore della *mesh* per simulare la base elastica, mentre ai bordi del modello, come detto, è preferibile l'utilizzo dei contorni *free-field*.

Le sollecitazioni dinamiche possono essere applicate sia ai bordi della *mesh* sia ai suoi nodi interni in una delle seguenti forme:

- storia temporale di accelerazioni;
- storia temporale di velocità;
- storia temporale di tensioni;
- storia temporale di forze.

Nell'applicare la sollecitazione dinamica, bisogna però tenere conto di alcune limitazioni che derivano da particolari incompatibilità tra forme di applicazione dell'input e delle condizioni al contorno. Se, ad esempio, queste sono rappresentate da *quiet boundaries* (come avviene solitamente per il bordo inferiore della *mesh*), il loro effetto viene annullato se si applica un accelerogramma o una storia di velocità.

Quindi, in questo caso, la base è modellata come rigida, cioè perfettamente riflettente, dando luogo a irrealistiche sovrastime del moto sismico. Per simulare correttamente una base elastica occorre applicare ai *quiet boundaries*, alla base della *mesh*, una storia temporale di tensioni. A tal fine, un accelerogramma di input deve essere integrato per ottenere una storia temporale di velocità e questa viene infine convertita in tensioni tramite le seguenti relazioni:

$$\sigma_n = 2(\rho V_p) v_n \quad \sigma_s = 2(\rho V_s) v_s \quad (8.10)$$

dove:

- ρ è la densità;
- σ_n, σ_s rispettivamente tensione applicata in direzione normale e tangenziale al contorno;
- V_p, V_s rispettivamente velocità delle onde di compressione e di taglio del materiale che viene simulato al di sotto del contorno inferiore (costituente la base elastica);
- v_n, v_s rispettivamente la velocità di input normale e tangente al contorno.

In definitiva, un input costituito da onde S sarà quindi applicato come una storia temporale di tensioni tangenziali, mentre le onde P tramite una storia temporale di tensioni normali al contorno. Entrambe le sollecitazioni sono applicate con incidenza verticale.

La non linearità e le proprietà dissipative dei terreni possono essere modellate in FLAC secondo differenti modalità: attraverso l'adozione di un legame costitutivo propriamente non lineare o, a partire dalla versione 5.0 (Itasca, 2005), tramite semplici modelli di *smorzamento isteretico*. Le proprietà dissipative possono altresì essere modellate attraverso la formulazione di Rayleigh.

L'adozione di una legge sforzi-deformazione non lineare rappresenta, teoricamente, il modo più efficace per tenere conto della degradazione di rigidezza al procedere della deformazione e della

dissipazione di energia per isteresi. Questi modelli possono essere accoppiati con modelli di filtrazione per simulare la generazione e dissipazione di eccessi di pressioni neutre e/o fenomeni di liquefazione e consentono, inoltre, la valutazione delle deformazioni permanenti. Però, dal punto di vista pratico, i modelli non lineari sono spesso complessi e richiedono la definizione di molti parametri e lunghi processi di calibrazione.

La complessità dei modelli non lineari e la comodità di un utilizzo diretto delle curve di tipo G / G0 e D / D0, generalmente fornite dalle prove di laboratorio e dalle correlazioni empiriche, ha portato all'introduzione di semplici modelli di *smorzamento isteretico (hysteretic damping)* nella recente versione 5.0 del codice.

Durante ciascuno *step* di calcolo, in funzione del valore medio del tensore di velocità di deformazione, viene restituito un fattore moltiplicativo da usarsi nel legame costitutivo, in modo da correggere il valore del modulo tangente di taglio associato a ciascun elemento. Il modello isteretico implementato utilizza solo curve continue che esprimono la variazione del modulo di taglio con la deformazione tangenziale; pertanto, i parametri da fornire in input che definiscono la forma di tali curve vanno ricavati attraverso regressione dei dati sperimentali. Analisi di calibrazione dello smorzamento isteretico sono necessarie prima di un suo uso nella pratica corrente.

Nel caso di analisi lineari, o per modellare comunque lo smorzamento a basse deformazioni che spesso i legami costitutivi non lineari non riescono a cogliere, si può utilizzare la formulazione di Rayleigh. Essa conduce ad uno smorzamento dipendente dalla frequenza, in contrasto con le evidenze sperimentali sul comportamento dei terreni. Il suo impiego richiede, pertanto, una oculata scelta dei parametri che lo definiscono, per limitare la variazione dello smorzamento con la frequenza (Lanzo et al., 2003 e 2004). Lo smorzamento di Rayleigh è stato originariamente formulato per le analisi strutturali ed è espresso in forma matriciale attraverso la definizione di una matrice di smorzamento **C** proporzionale alla matrice di massa **M** e a quella di rigidezza **K**:

$$\mathbf{C} = \alpha_R \mathbf{M} + \beta_R \mathbf{K} \quad (8.11)$$

dove α_R e β_R sono i coefficienti di Rayleigh che hanno dimensione rispettivamente di s^{-1} e s . È possibile dimostrare (Chopra, 1995) che lo smorzamento ξ_j associato al j -esimo modo di vibrazione del deposito è espresso dalla:

$$\xi_j = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_R}{\omega_j} + \beta_R \omega_j \right) \quad (8.12)$$

dove ω_j è la frequenza circolare relativa al modo j .

I coefficienti di Rayleigh vengono comunemente determinati attraverso due procedure, a seconda che si fissi il valore dello smorzamento modale in corrispondenza di una o due frequenze naturali opportunamente selezionate (dette frequenze di controllo). Il codice FLAC adotta la prima procedura in accordo alla quale i coefficienti di Rayleigh sono espressi dalle:

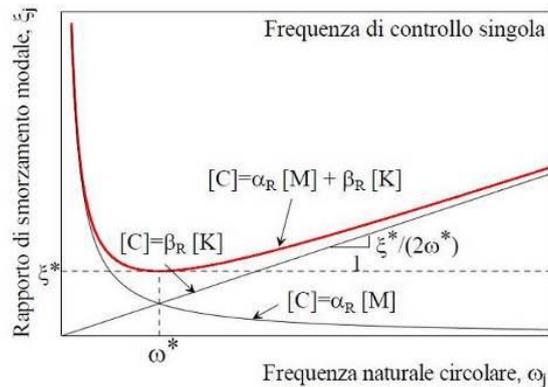
$$\alpha_R = \xi^* \omega^* \quad , \quad \beta_R = \frac{\xi^*}{\omega^*} \quad (8.13)$$

avendo fissato lo smorzamento modale al valore ξ in corrispondenza della singola frequenza ω .

Per ciascun elemento della *mesh* occorre specificare il rapporto di smorzamento ξ^* del materiale e la frequenza ω^* . A titolo di esempio, nel caso di smorzamento ξ^* e frequenza ω^* costante per tutto il deposito, è possibile dimostrare che un'analisi lineare eseguita con FLAC fornisce gli stessi risultati di un'analisi modale, con rapporto di smorzamento modale dell'intero sistema variabile con la frequenza circolare naturale ω_j secondo la:

$$\zeta_j^* = \frac{\zeta^*}{2} \left(\frac{\omega^*}{\omega_j} + \frac{\omega_j}{\omega^*} \right) \quad (8.14)$$

riportata nella figura seguente, nella quale si nota come ζ_j assuma un minimo (pari al valore imposto ξ^*) in corrispondenza della frequenza di controllo ω^* , mentre sia sovrastimato nel campo dei valori maggiori e minori di ω^* .



La formulazione di Rayleigh viene applicata a livello del singolo elemento della *mesh* per cui, tra i dati di input, occorre specificare per ciascun elemento il valore del rapporto di smorzamento del materiale che lo costituisce ξ^* e la frequenza di controllo ω^* (o meglio il valore f^*). La scelta di f^* è cruciale per fissare il campo di frequenza in corrispondenza del quale lo smorzamento mostra variazioni contenute rispetto a ξ^* .

In generale, f^* deve essere scelta nel campo di frequenza significativo per il problema in esame sia in termini di frequenze naturali del sistema che di frequenze predominanti dell'input. In prima approssimazione, si può collocare f^* tra la frequenza fondamentale del sistema e la frequenza predominante dell'input (frequenza corrispondente al massimo dello spettro di Fourier o di risposta). Se questi valori sono distanti è comunque opportuno esaminare con analisi parametriche l'influenza sui risultati delle diverse scelte di f^* . In definitiva, per ciascun materiale occorre fornire i seguenti parametri di input:

- peso dell'unità di volume;
- nel caso di analisi lineari modulo di taglio (G_0) e di elasticità volumetrico (k), o, in alternativa modulo di Young (E) e coefficiente di Poisson (ν);
- nel caso di analisi non lineari occorre fornire i parametri caratteristici del modello adottato;
- rapporto di smorzamento (ξ^*) e frequenza di controllo (f^*) se si adotta la formulazione di Rayleigh.

Il codice offre notevoli potenzialità di dati in output, potendo restituire la storia temporale di tutte le grandezze di interesse: spostamenti, velocità, accelerazioni, deformazioni e tensioni. L'interfaccia grafica consente, inoltre, di costruire ed esportare i grafici delle sopraccitate grandezze, in funzione della profondità o lungo un generico profilo.

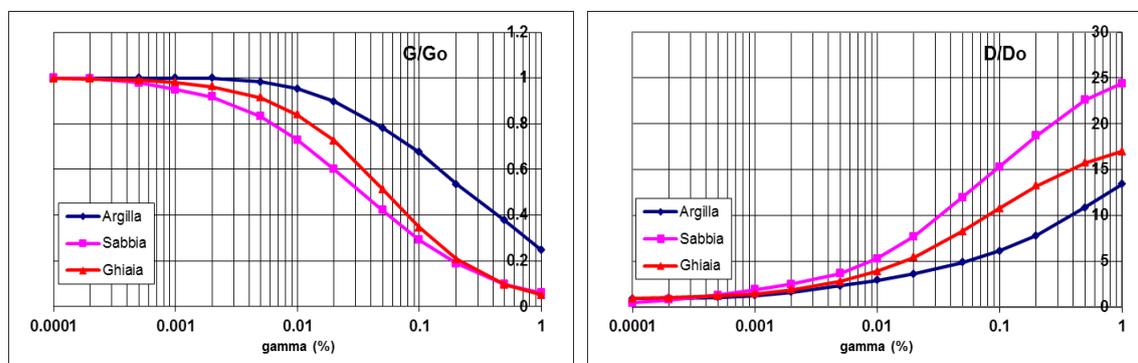
8.1.2 Analisi numeriche condotte

Per quantificare l'azione sismica in superficie sono state realizzate delle sezioni di rigidità del sottosuolo in corrispondenza delle aree da approfondire al Livello 3; su tali profili è stata successivamente condotta la modellazione numerica, come precedentemente spiegato. Le sismostratigrafie e i valori di rigidità utilizzati sono quelli ottenuti dalle indagini sismiche eseguite per il presente lavoro.

Il modello geometrico è stato discretizzato con una maglia ad elementi quadrangolari, le dimensioni dei quali sono state stabilite in funzione delle lunghezze d'onda minime caratterizzanti il fenomeno di propagazione sismica, determinabili con la relazione di Kuhlemeyer & Lysmer ($h_{max} < V_s / 10 * f_{max}$) in funzione delle velocità delle onde di taglio nei diversi terreni del modello e della frequenza massima di interesse dei segnali accelerometrici selezionati ($f_{max}=10$ Hz).

Lungo le frontiere laterali dei modelli sono stati introdotti particolari elementi assorbenti (*free - field boundaries*) che, oltre ad evitare la riflessione delle onde in maniera analoga agli smorzatori viscosi introdotti da Lysmer & Kuhlemeyer (1969), forzano i nodi delle frontiere laterali a riprodurre il moto di *free - field*, essenziale per le analisi di risposta sismica locale bidimensionale.

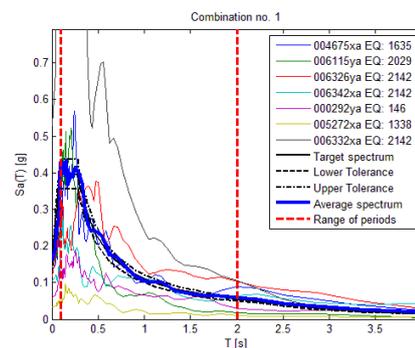
Per limitare la riflessione delle onde in corrispondenza della frontiera inferiore del modello, sono stati utilizzati degli smorzatori viscosi (*quiet boundaries*), mentre le proprietà dissipative dei materiali sono state ottenute attraverso la formulazione di Rayleigh per quanto riguarda il *substrato geologico* (smorzamento 0,02%); per i materiali di copertura è stato utilizzato lo *smorzamento isteretico* tramite le curve G/G_0 e D/D_0 indicate negli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica e sotto riportate.



Nel rispetto della normativa vigente - D.M. 17/01/2018 - è stata assunta una severità dell'azione sismica con la probabilità di superamento (P) e con il periodo di ritorno (T_r) relativi allo stato limite considerato. In particolare, è stata considerata una vita nominale della costruzione (V_n) di 50 anni, un coefficiente d'uso (C_u) pari a II e quindi una vita di riferimento $V_r = 50$ anni. A partire da queste indicazioni, si è determinato un periodo di ritorno dell'azione sismica di 475 anni corrispondente ad una probabilità di superamento del 10% allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (SLV).

L'input sismico utilizzato è rappresentato da una settupla di storie accelerometriche applicate alla base del modello e riferite agli spettri di normativa calcolati per il sito in esame, considerando un sottosuolo di roccia affiorante (classe A) con topografia orizzontale (T1) e correttamente deconvoluto (v. *Dynamic Analysis* della Itasca, 2016).

In particolare, gli accelerogrammi sono stati ricavati tramite l'utilizzo del software REXEL - *computer aided record selection for code - based seismic structural analysis*.

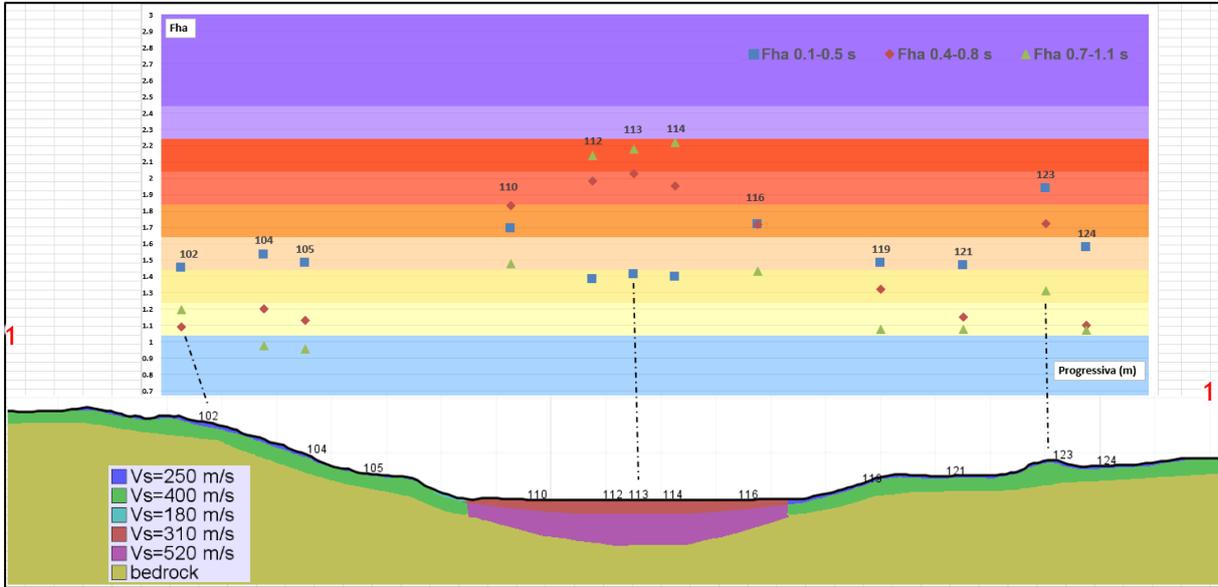


La *history* (storia temporale) ricavata al tetto del modello (per ogni input sismico applicato) rappresenta la storia accelerometrica orizzontale attesa nel sito d'indagine: ogni *history* è stata successivamente plottata in uno spettro di risposta elastico e mediata in una curva rappresentativa (accelerogramma medio).

Infine, per calcolare il Fattore di Amplificazione (FA) si è confrontato lo spettro medio in ingresso con quello in uscita, calcolando il rapporto dell'intensità di *Housner* per periodi compresi tra 0,1 s e 0,5

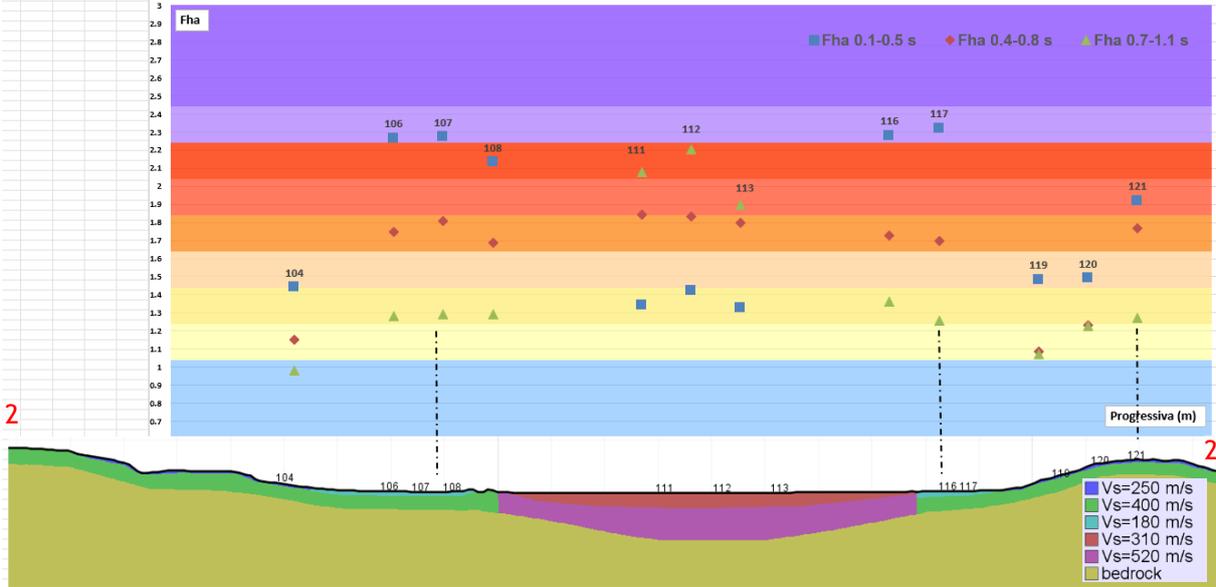
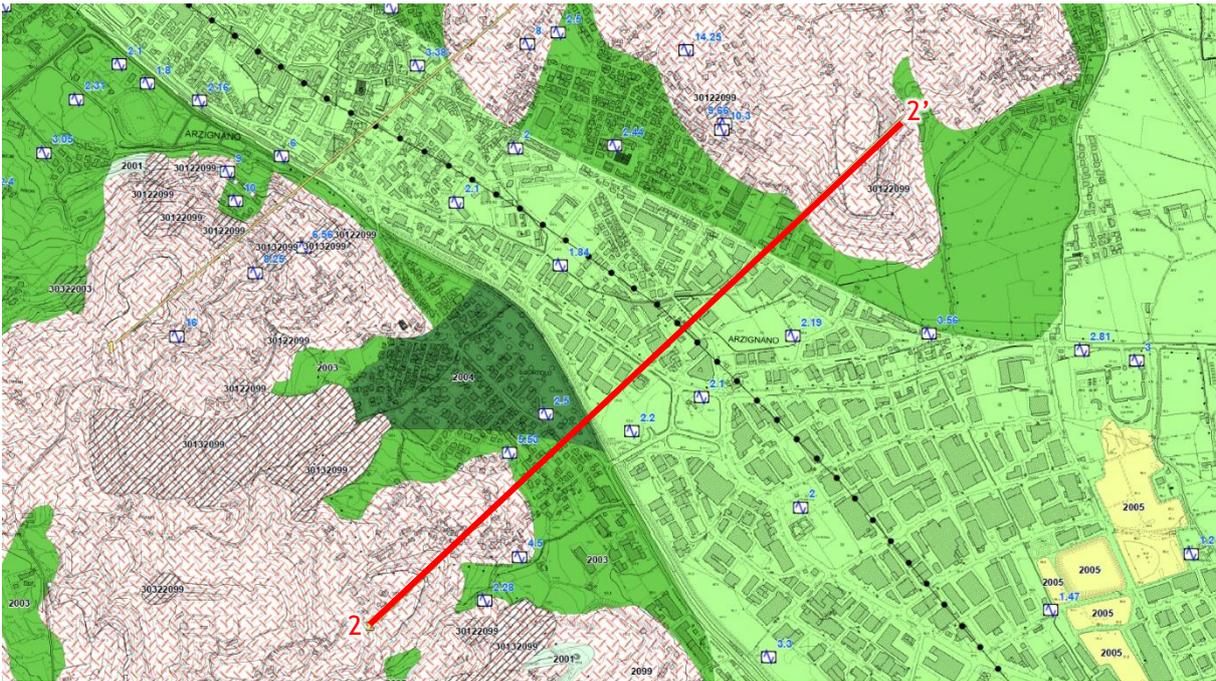
s (FA), tra 0,4 s e 0,8 s e tra 0,7 - 1,1 s poiché, in tali intervalli, si ha la massima risposta in accelerazione. Di seguito si riporta, per le n°4 sezioni analizzate, il modello sismo - stratigrafico utilizzato per le analisi, la traccia in pianta nella Carta MOPS e un profilo con i valori dei fattori di amplificazione FA in ciascun punto analizzato nella sezione. Inoltre, come è possibile osservare dai profili di FA, all'interno di ogni area MOPS sono state inserite diverse history, che hanno fornito valori di amplificazione variabili a seconda delle condizioni morfologiche e topografiche. Successivamente, è stata fatta la scelta del fattore di amplificazione più rappresentativo per il sito e per le MOPS analizzate, e riportato nelle cartografie prodotte.

MODELLAZIONE 1-1'



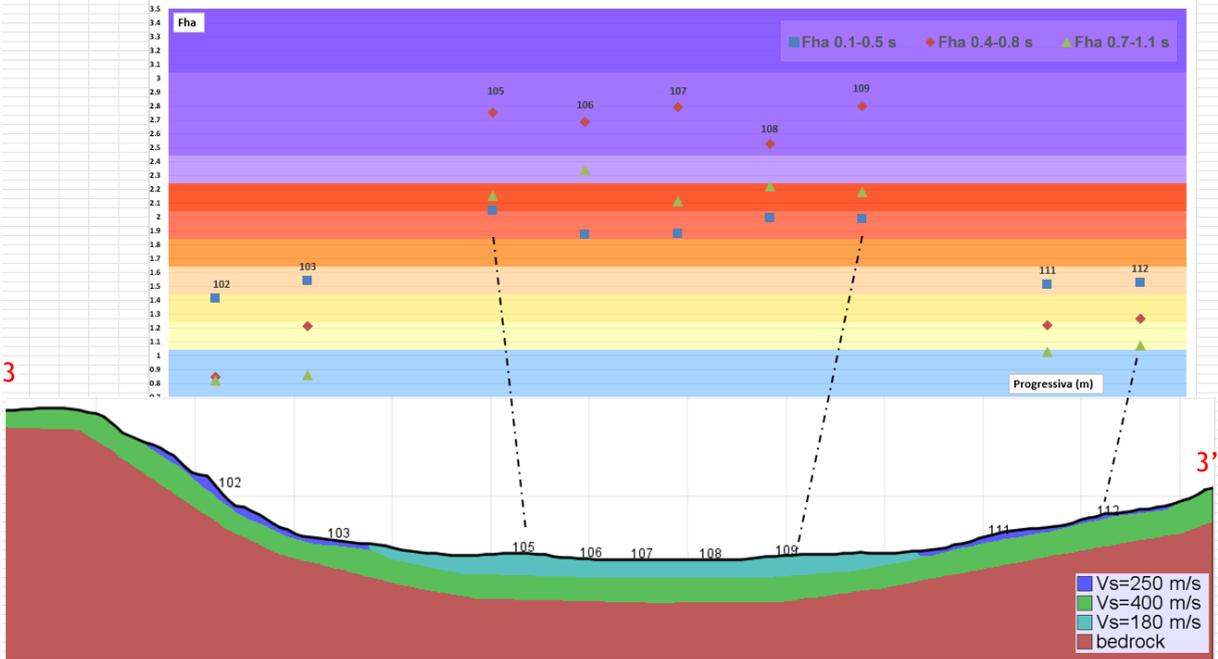
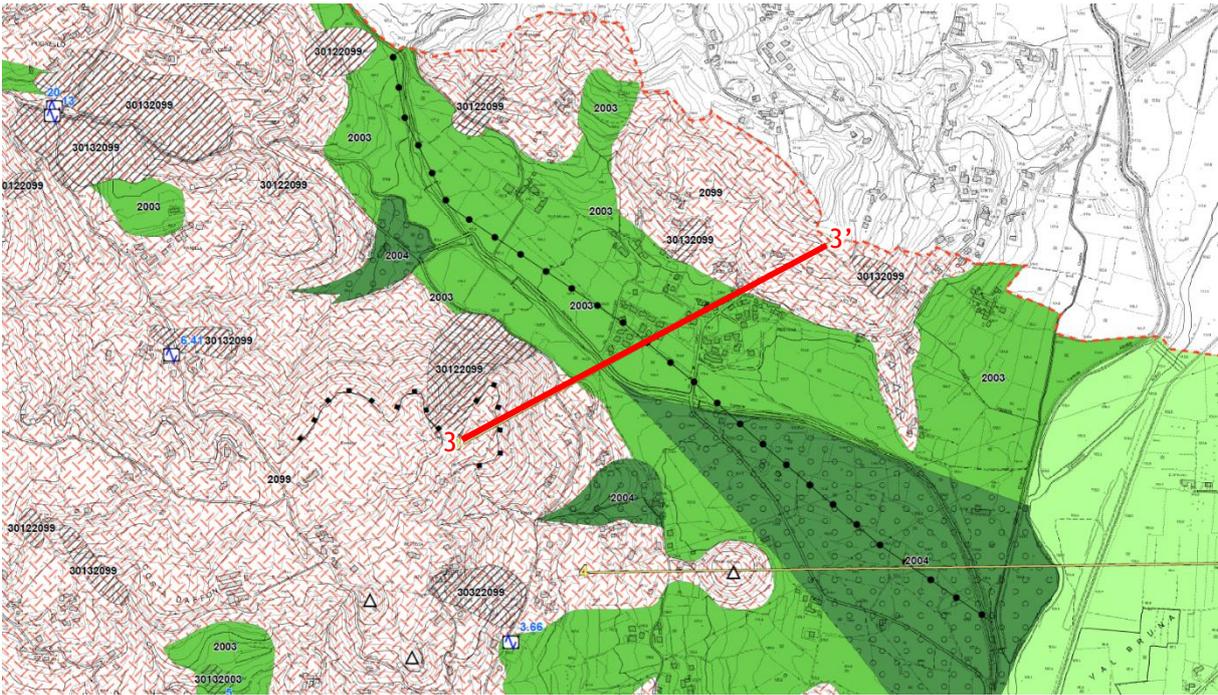
	FA 0,1-0,5s	FA 0,4-0,8s	FA 0,7-1,1
Mops 2099 (in versante)	1.5	1.1	1.1
Mops 2099 (in cresta)	1.9	1.7	1.3
Mops 2002	1.3	1.9	2.1

MODELLAZIONE 2-2'



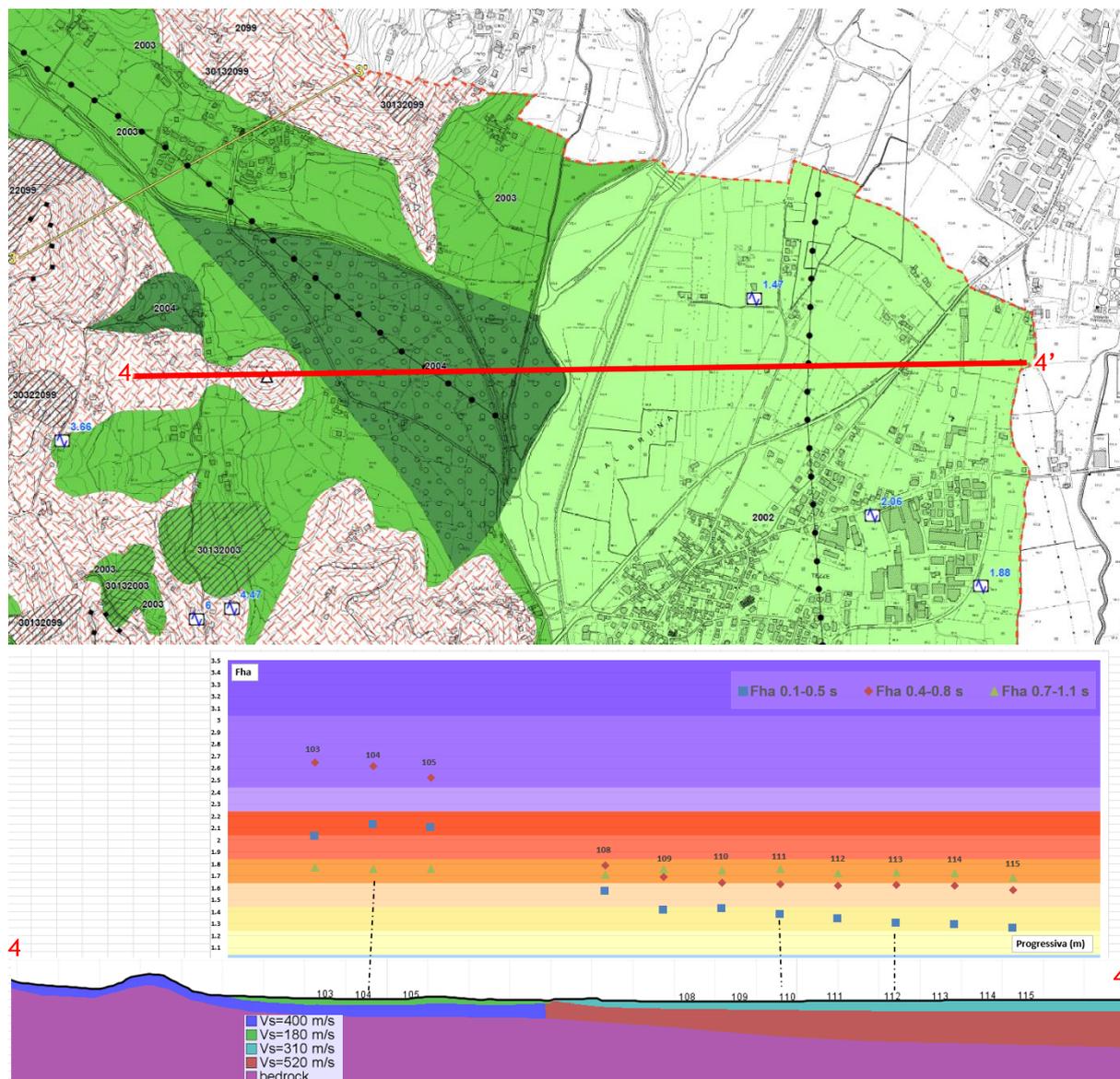
	FA 0,1-0,5s	FA 0,4-0,8s	FA 0,7-1,1
Mops 2003 (MLec)	2.3	1.7	1.3

MODELLAZIONE 3-3'



	FA 0,1-0,5s	FA 0,4-0,8s	FA 0,7-1,1
Mops 2003 (MLfg)	1.9	2.5	2.1

MODELLAZIONE 4-4'



	FA 0,1-0,5s	FA 0,4-0,8s	FA 0,7-1,1
Mops 2002	1.3	1.8	1.7
Mops 2004	2.1	2.5	1.7

A partire dai risultati ottenuti è stato possibile ottenere la “Carta dei fattori di amplificazione FA(0,1-0,5s)”, la “Carta dei fattori di amplificazione FA(0,4-0,8s)”, e la “Carta dei fattori di amplificazione FA (0,7-1,1s)”, da cui si evince che:

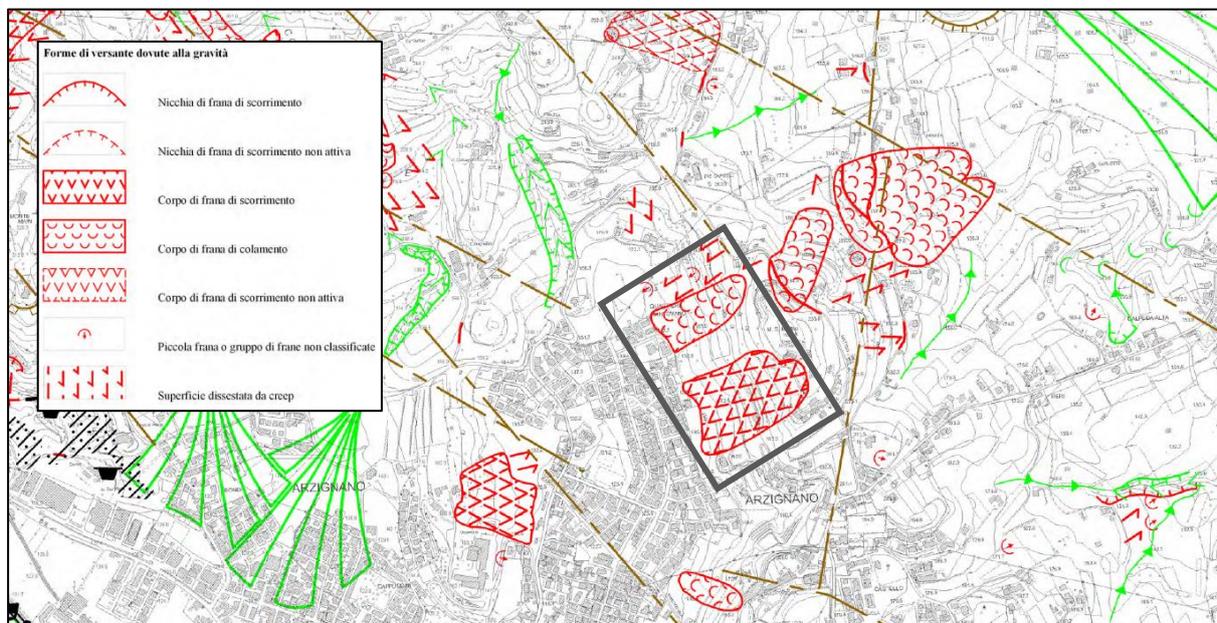
- il comune di Arzignano è caratterizzato da valori amplificati del moto sismico di base che variano da 1,1 a 2,5;
- i valori amplificativi massimi di Fa 0,1-0,5s (sensibili ai contrasti superficiali) sono associati alle aree con depositi eluvio-colluviali o con depositi di conoide. Essendo gli spessori di copertura ridotti, i principali contrasti di impedenza sono a profondità minori di 30 m;

Dott. Geol. Matteo Collareda	<i>Dott.ssa Claudia Tomassoli</i>
con la collaborazione di:	<i>Dott.ssa Laura Guerra</i> <i>Dott. Geol. Emanuele Mammoliti</i>

- relativamente ai substrati, i fattori ottenuti sono correlati all'unione dell'effetto topografico (amplificazione in corrispondenza di creste e/o picchi isolati) e del fattore stratigrafico, dovuto a contrasti sismici interni ai litotipi e legati a diversi gradi di rigidità della roccia andando in profondità. I valori massimi si sono ottenuti nel range 0,1-0,5s, essendo i contrasti sismici compresi nei primi 30 - 40 m dal p.c. locale;
- per quanto riguarda i depositi di fondovalle, (mops 2002), è interessante osservare il comportamento dei fattori di amplificazione che varia procedendo dalle porzioni di valle più stretta verso la valle più larga nella zona Est e Sud-Est di Arzignano, in corrispondenza della quale la coltre alluvionale tende anche ad ispessirsi. Nel caso dei fattori 0,1-0,5s, sensibile ai contrasti superficiali i depositi fluviali rispondono in modo omogeneo lungo tutta la vallata con FA ridotti. Per periodi più alti si osservano FA maggiori, in accordo con l'elevato spessore della coltre alluvionale sovrastante il substrato (80-100 m); in particolare nelle porzioni di valle più stretta i fattori di amplificazione risultano massimi, in quanto all'effetto stratigrafico si somma un'amplificazione per effetto di valle.

9 VERIFICA DELLA STABILITA' DEL VERSANTE IN CONDIZIONI SIMSICHE MEDIANTE METODO PSEUDO-STATICO DI NEWMARK

Per quanto riguarda le aree di frana, queste sono state desunte dal controllo incrociato di CARG, PAI e PAT, riportate nella "Carta geologico-tecnica". Si ricorda che, come previsto dagli standard nazionali, all'interno delle zone di attenzione per instabilità di versante sono state inserite le frane con qualsiasi grado di attività. All'interno della perimetrazione di terzo livello ricadono solo due frane, di seguito evidenziate.



Estratto carta geomorfologica del PAT di Arzignano

In particolare, al fine di verificare la stabilità in condizioni sismiche, è stato effettuato uno studio di stabilità di versante in condizioni dinamiche, secondo il metodo pseudo-statico di Newmark. Lo studio è stato condotto sul dissesto di seguito riportato, segnalato nella carta geomorfologica del PAT di Arzignano come frana attiva di scorrimento.



Metodo di verifica

La valutazione dei fattori di sicurezza alla stabilità è stata condotta mediante il programma di calcolo SLOPE v.2022 della GEOSTRU. In particolare, in questa sede si è fatto riferimento al metodo di Janbu, che prevede l'utilizzo di superfici di scivolamento di forma qualsiasi.

Il metodo di Janbu è un semplice, ma accurato, metodo per l'analisi di stabilità dei pendii, basato sul principio dell'equilibrio limite e delle strisce, pertanto viene considerato l'equilibrio di una potenziale massa di terreno in scivolamento suddivisa in n strisce verticali di spessore sufficientemente piccolo da ritenere ammissibile l'assunzione che lo sforzo normale N_i agisca nel punto medio della base della striscia.

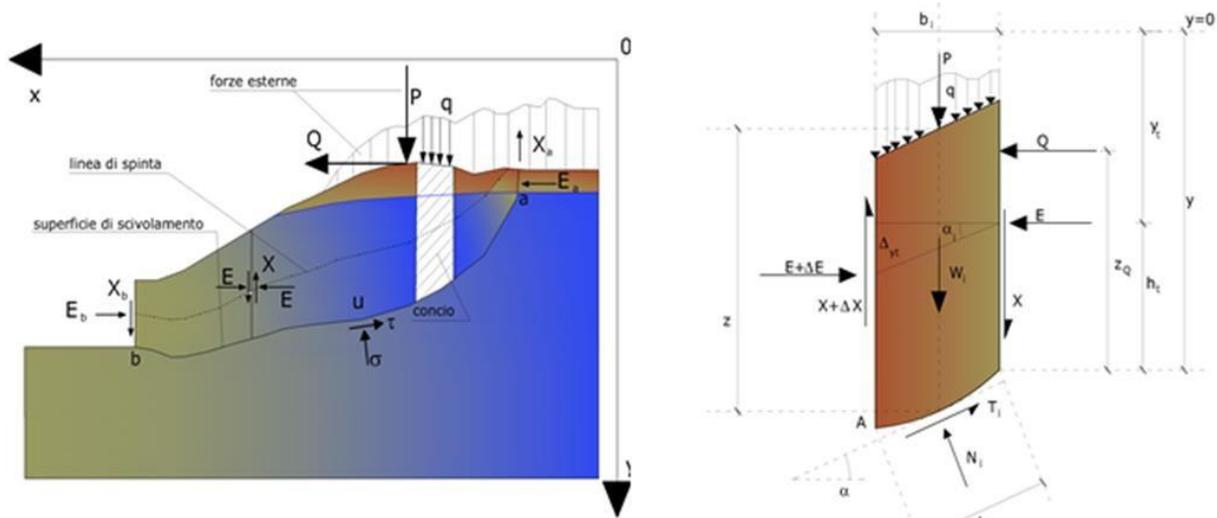
Le equazioni da prendere in considerazione sono:

- L'equazione di equilibrio alla traslazione orizzontale del singolo concio;
- L'equazione di equilibrio alla traslazione verticale del singolo concio;
- L'equazione di equilibrio dei momenti.

Il fattore di sicurezza risulta calcolato dalla seguente formula:

$$F = \frac{\sum \{c_i \times b + (W_i - u_i \times b_i + \Delta X_i) \times \tan \varphi_i\} \times \frac{\sec^2 \alpha_i}{1 + \tan \alpha_i \times \tan \varphi_i / F}}{\sum W_i \times \tan \alpha_i}$$

in cui i diversi parametri assumono i significati descritti nella seguente figura.

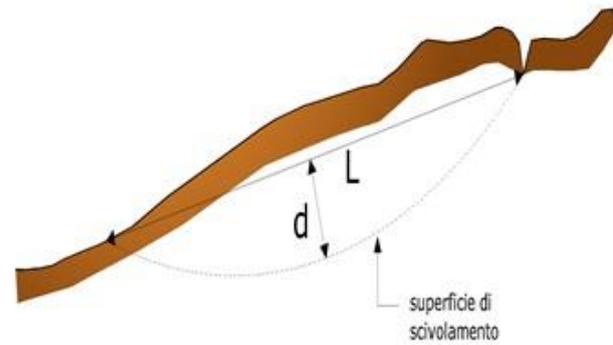
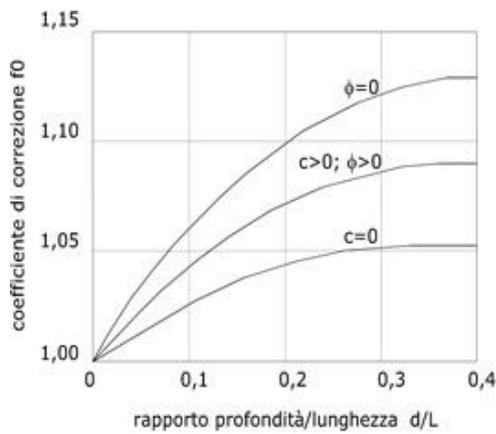


Azioni sul concio i-esimo secondo le ipotesi di Janbu e rappresentazione d'insieme dell'ammasso

Janbu, inoltre, propone un metodo per la correzione del fattore di sicurezza che tiene conto della forma della frana e dei parametri geotecnici:

$$F_{\text{corretto}} = f_0 \cdot F$$

dove f_0 è riportato in grafici funzione di geometria e parametri geotecnici (figura seguente). Tale correzione è molto attendibile per pendii poco inclinati.



Correzione del fattore di sicurezza in funzione della forma della frana e dei parametri geotecnici

La stabilità nei confronti dell'azione sismica viene verificata con il metodo pseudo-statico considerando un incremento della spinta a tergo del blocco dovuta all'accelerazione (verticale ed orizzontale) provocata dal sisma stesso. Tali valori dell'accelerazione provocata dal sisma sono valutati come una frazione dell'accelerazione di gravità g e i coefficienti moltiplicatori di g (K_x e K_y) variano con le caratteristiche sismiche della zona. Per i terreni che sotto l'azione di un carico ciclico possono sviluppare pressioni interstiziali elevate viene considerato un aumento in percento delle pressioni neutre che tiene conto di questo fattore di perdita di resistenza.

Ai fini della valutazione dell'azione sismica vengono quindi considerate le seguenti forze:

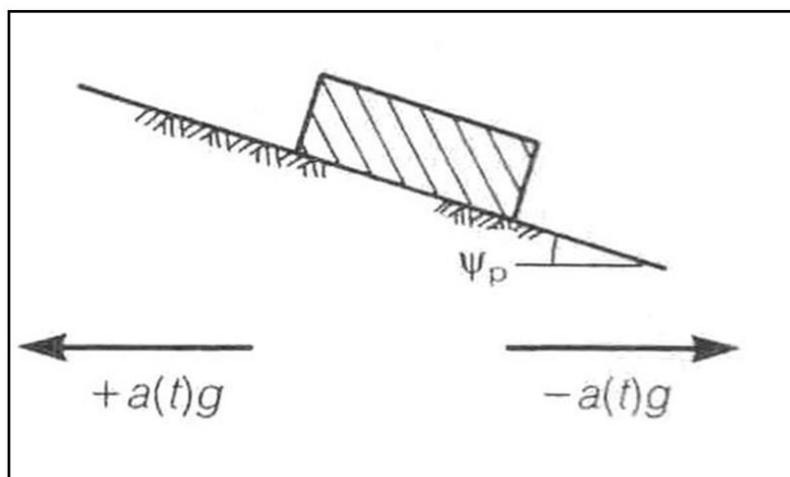
$$F_H = K_x W$$

$$F_V = K_y W$$

Essendo F_H e F_V rispettivamente la componente orizzontale e verticale della forza d'inerzia applicata al baricentro di ogni concio, W il peso del concio e K_x e K_y i coefficienti sismici orizzontale e verticale già introdotti in precedenza.

Gli effetti dello spostamento indotto dal sisma sono stati calcolati con il metodo di Newmark.

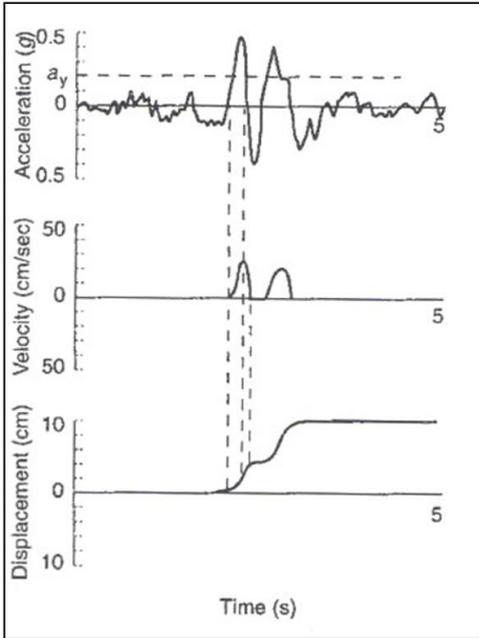
L'analisi alla Newmark è un metodo di analisi numerica utile alla definizione dello spostamento di una frana potenziale, considerata come un blocco rigido disposto su un pendio, imponendo le forze dinamiche (sisma) agenti sul blocco stesso. In sostanza il metodo valuta lo spostamento di un blocco di massa pari a quella del corpo in frana, sottoposto alla accelerazione indotta dal sisma.



Schematizzazione del metodo di Newmark

Una volta definita la superficie di scorrimento il programma utilizzato (soft QSIM) definisce l'accelerazione critica che determina il movimento del blocco equivalente al volume della frana e successivamente confronta tale valore con l'accelerogramma del sito per valutare per quanto tempo il blocco rimane in condizioni di accelerazione superiori a quella critica.

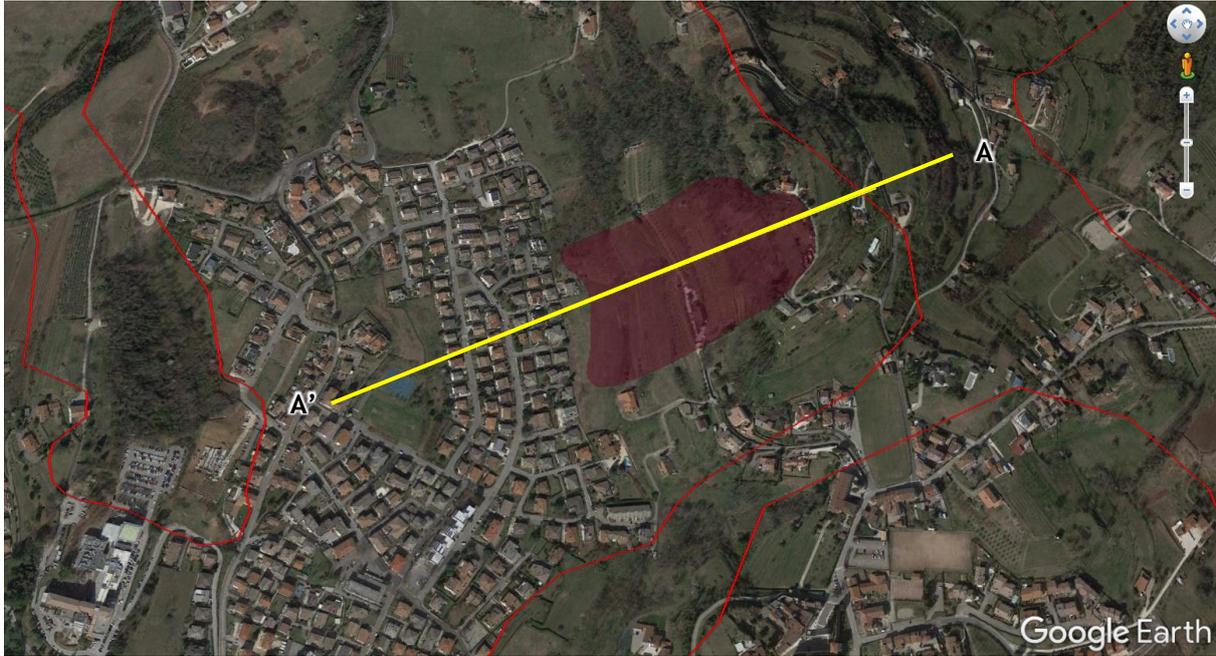
Il calcolo degli spostamenti permanenti avviene attraverso la doppia integrazione (accelerazione>>velocità>>spostamento) delle porzioni dell'accelerogramma che supera il valore di accelerazione critica (al di sopra del quale si ha instabilità).



Esemplificazione della metodologia di Newmark, con doppia integrazione dell'accelerogramma

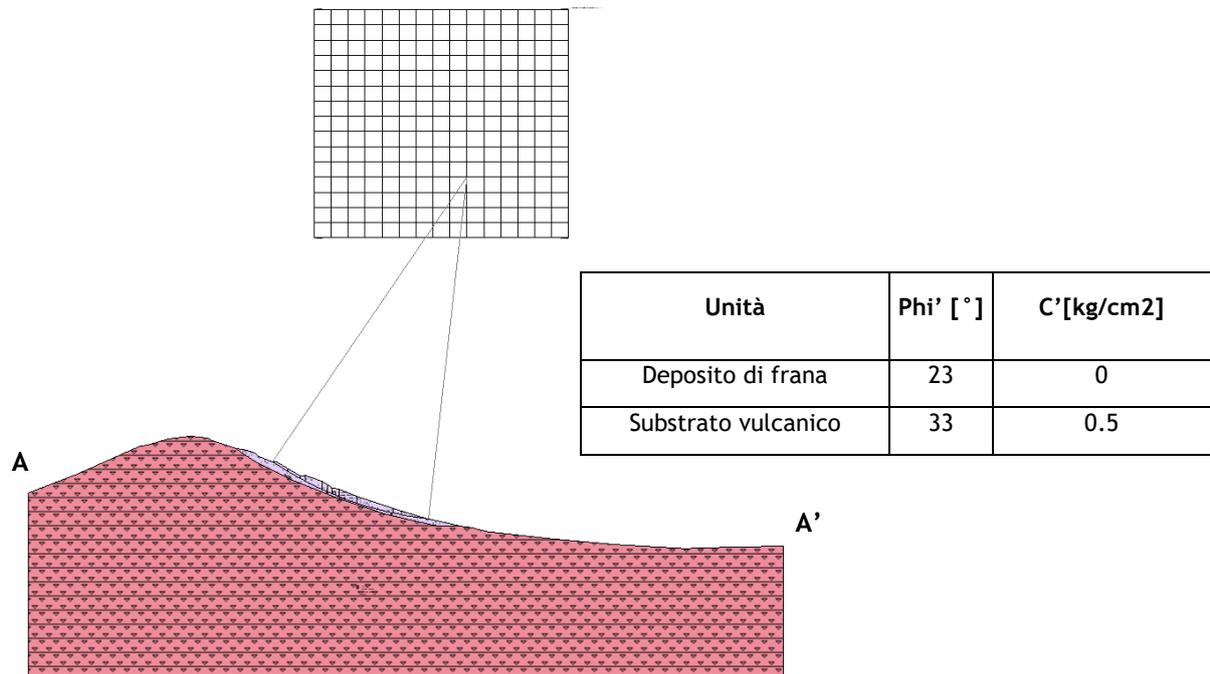
In pratica il programma calcola lo spostamento massimo per ciascun accelerogramma considerato di riferimento, per la porzione di pendio di cui il metodo pseudostatico ha definito il fattore di sicurezza minimo.

Verifica di stabilità



Traccia della sezione

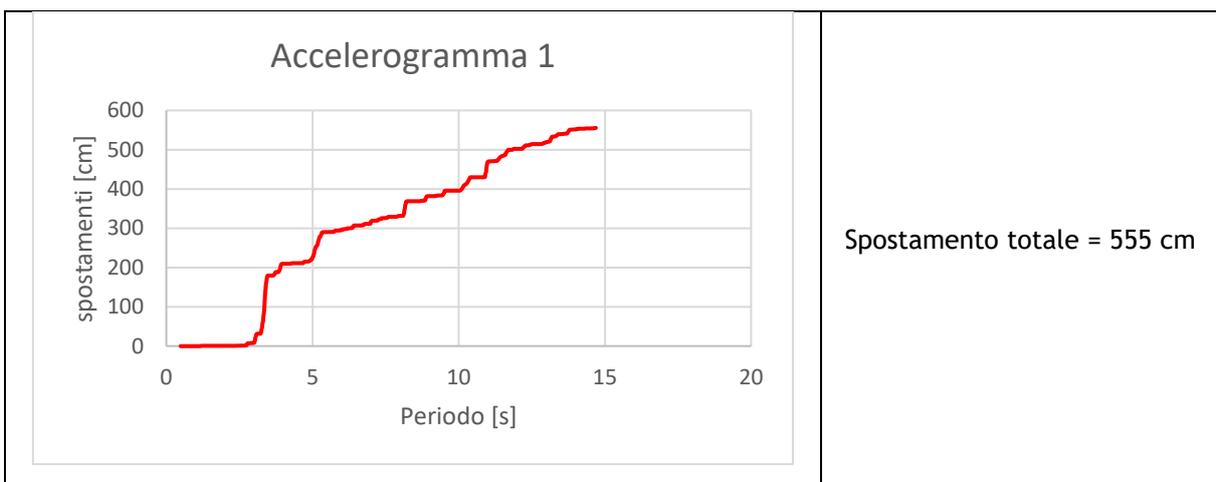
La verifica è stata effettuata sulla zona di attenzione per instabilità 30122099 mostrata. Il modello è stato definito considerando la sezione topografica più sfavorevole (zona di massima acclività) e quindi cautelativa, per il modello geologico ci si è rifatti alle numerose indagini geognostiche condotte nelle aree limitrofe, mentre si è effettuato uno studio di back-analysis per la restituzione dei parametri geotecnici del deposito instabile.



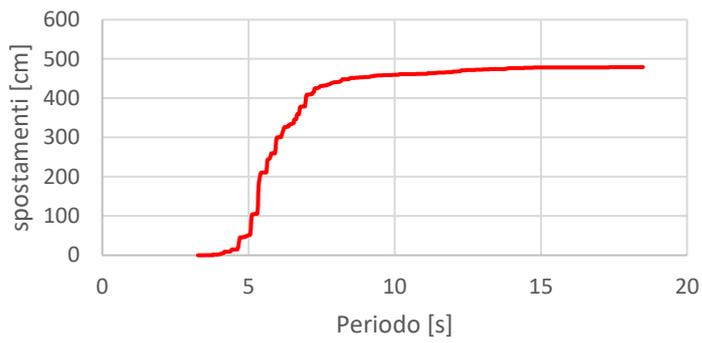
Modello geo-slope con superficie di scorrimento calcolate

Sono state calcolate quindi le superfici di scorrimento ed i relativi fattori di sicurezza. Successivamente, sulla superficie con F_s minore, è stata calcolata l'accelerazione critica ed è quindi stata effettuata l'analisi dinamica. Lo spostamento sismo-indotto è risultato pari a 351 cm, che rappresenta la media degli spostamenti calcolati per gli accelerogrammi ottenuti dall'analisi di RSL.

A seguire si riportano i grafici degli spostamenti ottenuti per ciascuno degli accelerogrammi.

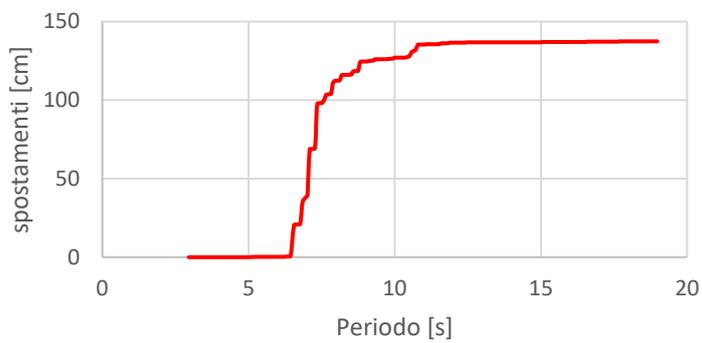


Accelerogramma 2



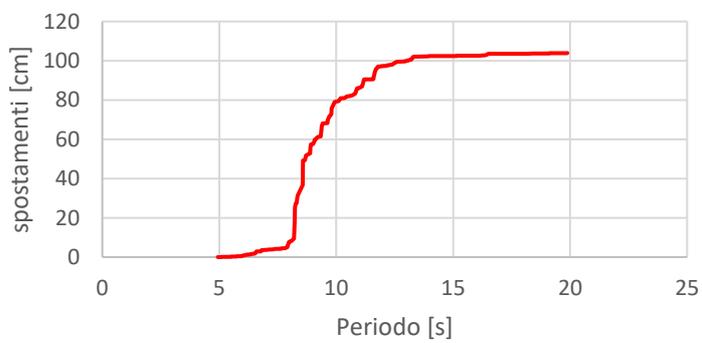
Spostamento totale = 479 cm

Accelerogramma 3



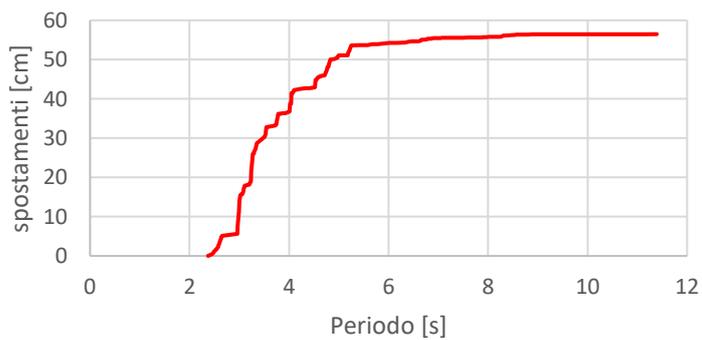
Spostamento totale = 137 cm

Accelerogramma 4



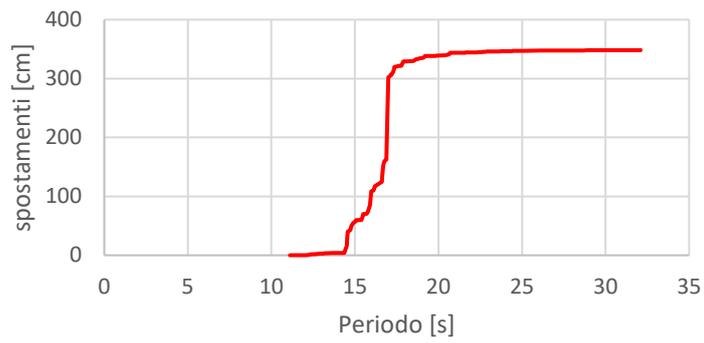
Spostamento totale = 103 cm

Accelerogramma 5



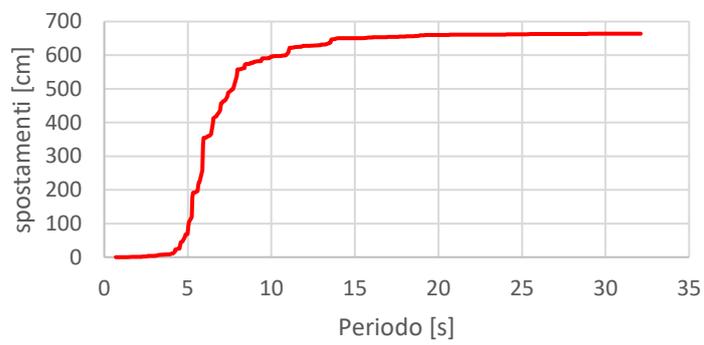
Spostamento totale = 170 cm

Accelerogramma 6



Spostamento totale = 348 cm

Accelerogramma 7



Spostamento totale = 664 cm

Dott. Geol. Matteo Collareda	<i>Dott.ssa Claudia Tomassoli</i>
con la collaborazione di:	<i>Dott.ssa Laura Guerra</i> <i>Dott. Geol. Emanuele Mammoliti</i>

10 PROPOSTA PER LE NORME TECNICHE OPERATIVE (NTO)

Nel presente capitolo viene proposta una norma di riferimento da inserire all'interno delle "Norme Tecniche Operative - NTO" del Comune di Arzignano al fine di recepire e rendere operativo lo studio di Microzonazione Sismica condotto.

Art.X Riduzione del rischio sismico

Lavoro di riferimento: Studio di Microzonazione Sismica di Livello 3

Lo studio di Microzonazione Sismica di Livello 3 identifica vari scenari di pericolosità sismica locale che concorrono alla definizione delle scelte di Piano.

Lo studio è parte integrante dello strumento urbanistico comunale, ma nel caso di esecuzione di opere o di interventi nel territorio non potrà in alcun modo sostituire le indagini e le elaborazioni puntuali, esplicitamente previste dalle vigenti Norme Tecniche sulle Costruzioni, con le successive modifiche e integrazioni.

Lo studio di Microzonazione Sismica di Livello 3 ha chiaramente evidenziato le criticità sismiche del territorio comunale per quanto riguarda l'amplificazione sismica locale, a causa delle condizioni topografiche e dei contatti sismo-stratigrafici tra litologie che possono rispondere in modo differente alla sollecitazione sismica. In particolare, lo studio ha mostrato che:

- Le zone collinari e di raccordo, caratterizzate da depositi eluvio-colluviali e detritici con spessori ridotti a copertura del substrato e morfologie articolate, hanno presentato amplificazioni massime nel range 0,1-0,5s, sensibile ai contrasti sismici superficiali;
- le zone vallive, caratterizzate da coperture fluvioglaciali ghiaiose-sabbiose e con bedrock sismico a profondità variabili per lo più tra 45-90 m dal p.c. locale, hanno presentato amplificazioni massime nel range 0,4-0,8s e 0,7-1,1s, sensibile ai contrasti sismici medio-profondi;
- infine, i substrati presentano valori amplificativi correlati all'unione dell'effetto topografico (amplificazione in corrispondenza di creste e/o picchi isolati) e del fattore stratigrafico, dovuto a contrasti sismici interni ai litotipi e legati a diversi gradi di rigidità della roccia andando in profondità (roccia alterata su roccia compatta).

Inoltre, l'analisi dei microtremori attraverso la tecnica Horizontal to Vertical Spectral Ratio (H.V.S.R.) ha consentito di stimare le frequenze di risonanza dei depositi, che dal punto di vista ingegneristico-strutturale rappresentano un parametro fondamentale per una corretta progettazione sismica delle strutture (cfr. Carta delle frequenze).

Per questo, in fase di progettazione, attraverso la consultazione delle cartografie dello studio di MS, si dovranno valutare le condizioni di amplificabilità/risonanza del sito al fine di valutare la metodologia più appropriata per determinare l'azione sismica:

- modellazioni numeriche di Risposta Sismica Locale;
- approccio semplificato da Categoria di Sottosuolo e Categoria Topografica.

La determinazione della velocità delle onde di taglio Vs, indispensabili per la ricostruzione del modello sismo-stratigrafico, dovrà essere fatta utilizzando appropriate indagini sismiche, in foro (cross-hole, down-hole, cono sismico) o in superficie (MASW, Re.Mi., ESAC, sismica a rifrazione in onde s).

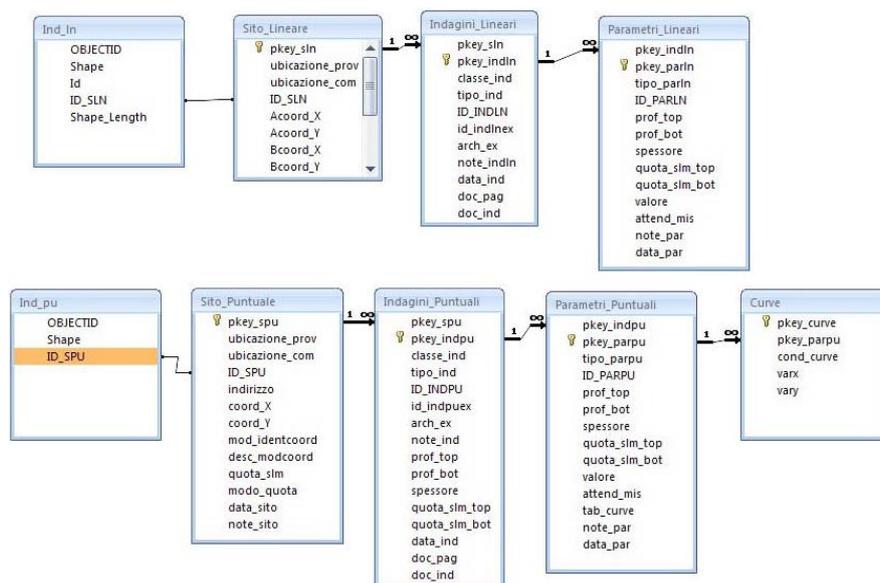
11 REDAZIONE CARTOGRAFICA E CREAZIONE BASI INFORMATIVE

L'analisi di MS ha prodotto informazioni che sono state cartografate secondo le indicazioni previste dalle linee guida emanate dalla Protezione Civile Nazionale.

I *layers* informativi prodotti sono stati organizzati secondo la banca dati geografica definita dagli "Standard di rappresentazione e Archiviazione Informatica" - versione 4.2 - emanati dalla "Commissione tecnica per il monitoraggio degli studi di Microzonazione Sismica". Gli Standard sopraccitati definiscono le specifiche tecniche per la redazione in ambiente GIS degli elaborati cartografici della MS.

Per quanto riguarda la rappresentazione cartografica, anch'essa è stata realizzata utilizzando le vestiture previste dagli "Standard di rappresentazione e Archiviazione Informatica" - versione 4.2.

Il contenuto informativo della "Carta delle indagini" si esplica attraverso la relazione tra gli *shapefiles* (Ind_pu e Ind_ln) e le tabelle ad essi collegate, appositamente strutturate per archiviare i dati alfanumerici dei siti, delle indagini e dei parametri delle indagini.



Relazione fra tabelle e shapefiles
 (Figura 2.1-1 "Standard di Rappresentazione e archiviazione informatica" - versione 4.0b)

Lo *shapefile* Ind_pu rappresenta la primitiva puntuale che posiziona spazialmente il relativo punto d'indagine, identificato univocamente nel campo ID_SPU; quest'ultimo costituisce la chiave di collegamento (*join*) alla tabella **Sito_Puntuale**, destinata all'archiviazione dei parametri di georeferenziazione dei punti d'indagine.

La tabella **Indagini_Puntuale** descrive le tipologie d'indagine eseguite e le informazioni necessarie alla tracciabilità, mediante collegamento esterno con la relativa documentazione in formato pdf. Infine, nella tabella **Parametri_Puntuale** sono archiviati i parametri associati alle prove descritte nella tabella Indagini_Puntuale.

Lo *shapefile* Ind_ln costituisce la primitiva lineare che posiziona spazialmente le indagini lineari, identificati univocamente nel campo ID_SLN; quest'ultimo rappresenta la chiave di collegamento alla tabella **Sito_Lineare**, nella quale vengono archiviate le codifiche del tracciato. La tabella **Indagini_Lineari** definisce la tipologia d'indagine eseguita e le informazioni necessarie alla sua tracciabilità, tramite un collegamento esterno con documentazione corrispondente, in formato pdf. Infine, la tabella **Parametri_Lineari** contiene i parametri definiti dalle prove descritte nella tabella Indagini_Lineari.

Il contenuto informativo riportato nella “Carta delle frequenze” è definito dal campo VALORE della tabella Parametri_Puntuali, dove viene specificato il valore della frequenza fondamentale di risonanza espresso in Hertz (Hz) nell’intervallo compreso tra 0,1 Hz e 20,0 Hz. La restituzione grafica dei valori di frequenza si riferisce a quanto proposto per la “Carta delle frequenze” di risonanza negli “Standard di rappresentazione cartografica e archiviazione informatica - versione 4.2.

Le suddette tabelle sono state compilate e archiviate nel database di Access **Cdl_tabelle.mdb** contenuto, assieme agli *shapefile* Ind_pu e Ind_In, nella cartella Indagini.

La “Carta geologico-tecnica” e la “Carta delle microzonee omogenee in prospettiva sismica” sono state realizzate in formato vettoriale e rappresentano le informazioni contenute nelle cartelle GeoTec ed MS1.

La cartella **GeoTec** contiene i seguenti *layers* informativi.

Nome file	Tipo <i>shapefile</i>	Descrizione
<i>Elineari</i>	Lineare	Elementi lineari (escluse le isobate)
<i>Epuntuali</i>	Puntuale	Elementi puntuali
<i>Geoidr</i>	Puntuale	Elementi puntuali geologici e idrogeologici
<i>Geotec</i>	Poligonale	Unità geologico tecniche
<i>Forme</i>	Poligonale	Forme poligonali

Nella cartella **MS1** sono invece contenuti i seguenti *shapefile*

Nome file	Tipo <i>shapefile</i>	Descrizione
<i>Stab</i>	Poligonale	Zone stabili suscettibili di amplificazione locale
<i>Instab</i>	Poligonale	Zone di attenzione per instabilità

Nella cartella **MS23** sono contenuti i seguenti *shapefile*

Nome file	Tipo <i>shapefile</i>	Descrizione
<i>Stab</i>	Poligonale	Zone stabili suscettibili di amplificazione locale
<i>Instab</i>	Poligonale	Zone suscettibili di instabilità

Tutti gli spetti di risposta elastici calcolati sono stati salvati nella cartella “MS23/Spettri” della struttura di archiviazione dei file. In particolare, secondo gli Standard, è necessario fornire, per ogni terna di fattori di amplificazione, lo spettro medio risultante.

Pertanto, nella cartella “MS23/Spettri”, si riportano n° 7 file .txt contenenti gli spettri medi ottenuti dall’elaborazione numerica dei n.7 accelerogrammi di input nominati con un codice progressivo (ArzignanoPSA001.txt ArzignanoPSA07.txt).

Quindi, dal punto di vista operativo, un professionista che necessita di recuperare lo spettro relativo ad una determinata area del comune di Arzignano dovrà:

1. Aprire lo shp stab/instab e vedere in quale poligono ricade l'area di interesse

2. Aprire la tabella degli attributi dello shp e leggere il nome dello spettro associato al poligono di interesse (es. ArzignanoPSAO02);

3. Andare nella cartella "Spettri" e cercare la cartella con il nome suddetto: al suo interno troverà lo spettro elastico medio ottenuto dalla modellazione.

La cartografia di base utilizzata per l'elaborazione dello studio è la C.T.R. del Veneto, le cui coordinate sono espresse in WGS84 Zona 33N.

Infine, secondo quanto riportato nella Versione degli Standard 4.2, è stato necessario inserire, nella Carta delle Indagini, una serie di punti baricentrici dei poligoni riportati nello shp Stab, indicanti la stratigrafia rappresentativa della zona Mops di appartenenza. Ogni punto, inoltre, è stato archiviato nel software SoftMS e vi è stato associato un file pdf riportante una descrizione dettagliata delle aree omogenee dal punto di vista sismico che costituiscono il comune di Arzignano.

12 BIBLIOGRAFIA

- ✦ A. Viganò, G. Bressan, G. Ranalli, S. Martin (2008) - Focal mechanism inversion in the Giudicarie - Lessini seismotectonic region (Southern Alps, Italy): Insight on tectonic stress and strain
- ✦ Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta - Bacchiglione. Piano Stralcio per l'assetto idrogeologico del bacino idrografico del fiume Livenza (P.A.I.L.).
- ✦ L. Benedetti, P. Tapponnier, C.P. Geoffroy King, M. Bertrand, I. Manighetti: "Growth folding and active thrusting in the Montello region, Veneto, northern Italy"
- ✦ C. Braitenberg, B. Grillo, I. Nagy, S. Zidarich, A. Piccin (2007) - La stazione geodetico-geofisica ipogea del Bus De La Genziana - Pian Cansiglio. Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan" pp. 105 - 120
- ✦ Brammerini F., Di Pasquale G., Naso G., Severino M. (2008) - Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica - Parti I e II - Gruppo di lavoro "Indirizzi e criteri generali per la Microzonazione Sismica" del Dipartimento della Protezione Civile
- ✦ Castellaro S., Albarello D. (2011). Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola. Ingegneria sismica, pp. 32 - 62
- ✦ Castellaro S., Mulargia F., Bianconi L. (2005). Passive Seismic Stratigraphy: A new efficient, fast and economic technique. Geologia tecnica & ambiente, pp. 77 - 102
- ✦ CERI Centro di ricerca "Previsione, Prevenzione e Controllo dei Rischi Geologici" (2004) - La microzonazione sismica. Metodi, esperienze e normativa
- ✦ Chopra L. (1995). Dynamic of Structures: theory and applications to earthquake engineering. Prentice Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics. Prentice - Hall
- ✦ Dey A. and Morrison H.F. (1979) - Resistivity modelling for arbitrary shaped two-dimensional structures. Geophysical Prospecting, 27, 1020-1036
- ✦ Facciorusso J. et al. (2012) - Microzonazione Sismica - Uno strumento consolidato per la riduzione del rischio - L'esperienza della Regione Emilia - Romagna - a cura del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia - Romagna
- ✦ Ghosh B.; Madabhushi S. P. G. (2003). A numerical investigation into effects of single and multiple frequency earthquake input motion. Soil Dyn. Earthquake Eng., 23(8), 691-704
- ✦ Gruppo di lavoro MPS (2004) - Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'OPCM 3274 del 20 Marzo 2003. Rapporto conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano - Roma
- ✦ Iervolino I., Galasso C., Cosenza E. (2009) - REXEL: computer aided record selection for code - based seismic structural analysis - Bulletin of Earthquake Engineering, 8: 339 - 362
- ✦ Itasca (2011). FLAC Fast Lagrangian Analysis of Continua. v.7.0. User's Manual
- ✦ Kuhlmeier R. L.; Lysmer J. (1969). Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems. J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE, 99(5), 421-427
- ✦ Lanzo G., Pagliaroli A., D'Elia B. (2003). Numerical study on the frequency-dependent viscous damping in dynamic response analyses of ground. In Latini & Brebbia (eds), Earthquake Resistant Engineering Structures, WIT Press, Southampton, Boston, pp. 315-324
- ✦ Lanzo G., Pagliaroli A., D'Elia B. (2004a). Influenza della modellazione di Rayleigh dello smorzamento viscoso nelle analisi di risposta sismica locale. Atti XI Congresso Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia", Genova, Italia, 25 - 29 Gennaio
- ✦ Lanzo G., Silvestri F. (1999) - Risposta Sismica Locale. Hevelius Ed.
- ✦ Louie, J. N. (2001). Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays, Bull. Seism. Soc. Am., 91, 347-364
- ✦ M. Locati, R. Camassi e M. Stucchi, 2015. DBMI15, la versione 2015 del Database Macrosismico Italiano. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI15>
- ✦ Mucciarelli M. e Gallipoli M.R. (2001) - A critical review of 10 Years of microtremor H.V.S.R. technique - Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, 42, P. 255 - 266
- ✦ Mucciarelli M. e Gallipoli M.R. (2006) - Comparison between V_{s30} and other estimates of site amplification in Italy - Conf. Earthq. Eng. And Seismol., Ginevra, 3 - 8 Sept. no 270
- ✦ Mucciarelli M (2011) - Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici - Progetto ricerca 2007PTRC4C - Aracne editrice
- ✦ Rota M., Zuccolo E., Taverna L., Corigliano M., Lai C.G., Penna A. (2012) - "Mesozonation of the Italian territory for the definition of real spectrum-compatible accelerograms", in stampa sul Bulletin of Earthquake Engineering
- ✦ SESAME Project (2005) - "Site Effects Assessment Using Ambient Excitations"
- ✦ Silvester P.P. and Ferrari R.L. (1990) - Finite elements for electrical engineers (2 nd ed.) Cambridge University Press.
- ✦ Slejko D. et al (1987) - Modello sismotettonico dell'Italia Nord - Orientale. CNR
- ✦ Spallarossa D. e Barani S. (2007) - Report, Disaggregazione della Pericolosità Sismica in Termini di M - R - ϵ - Progetto DPC-INGV S1, <http://esse1.mi.ingv.it/d14.html>

13 ALLEGATI FUORI TESTO

1. Carta delle indagini	Scala 1:10.000
2. Carta geologico-tecnica	Scala 1:10.000
3. Carta delle frequenze	Scala 1:10.000
4. Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica	Scala 1:10.000
5. Carta della pericolosità sismica locale	Scala 1:10.000
6. Carta di microzonazione sismica FA 0,1-0,5s - Livello 3	Scala 1:10.000
7. Carta di microzonazione sismica FA 0,4-0,8s - Livello 3	Scala 1:10.000
8. Carta di microzonazione sismica FA 0,7-1,1s - Livello 3	Scala 1:10.000
9. Carta delle sezioni geologico-tecniche	Scala 1:10.000
10. DVD contenente i file pdf dello studio e le basi informative	