



PON GOVERNANCE 2014-2020

Rischio Sismico e Vulcanico

Attività A2.4 | Definizione di metodi avanzati di valutazione della qualità delle indagini e dei risultati degli studi di MS

Definizione di metodi avanzati di valutazione della qualità delle indagini e dei risultati degli studi di MS

Versione 6.0

Pubblicato in data 13/12/2021



UNIONE EUROPEA
Fondo Sociale Europeo
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Agenzia per la Coesione Territoriale



GOVERNANCE
E CAPACITÀ
ISTITUZIONALE
2014-2020



PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile



Consiglio Nazionale delle Ricerche





PON GOVERNANCE 2014-2020 Rischio Sismico e Vulcanico

Attività A2.4 | Definizione di metodi avanzati di valutazione della qualità delle indagini e dei risultati degli studi di MS

Definizione di metodi avanzati di valutazione della qualità delle indagini e dei risultati degli studi di MS

Versione 6.0

Pubblicato in data 13/12/2021



PON GOVERNANCE E CAPACITÀ ISTITUZIONALE 2014-2020

PROGRAMMA PER IL SUPPORTO AL RAFFORZAMENTO DELLA GOVERNANCE IN MATERIA DI RIDUZIONE DEL RISCHIO SISMICO E VULCANICO AI FINI DI PROTEZIONE CIVILE

DIPARTIMENTO DELLA PROTEZIONE CIVILE

Struttura responsabile dell'attuazione del Programma

Fabrizio Curcio (responsabile), Eliana Mazzaro (supporto)

Immacolata Postiglione (delega funzioni specifiche)

Unità di coordinamento

Fabrizio Bramerini, Angelo Corazza, Luigi D'Angelo, Fausto Guzzetti, Francesca Romana Paneforte, Paola Stefanelli

Unità operativa rischi

Paola Bertuccioli, Sergio Castenetto, Stefano Ciolli, Andrea Duro, Emilio De Francesco, Marco Falzacappa, Domenico Fiorito, Pietro Giordano, Antonella Gorini, Giuseppe Naso, Stefania Renzulli, Daniele Spina

Unità di raccordo DPC

Silvia Alessandrini, Sara Babusci, Pierluigi Cara, Patrizia Castigliengo, Valter Germani, Maria Penna

Unità amministrativa e finanziaria

Valentina Carabellese, Francesca De Sandro, Susanna Gregori, Maria Cristina Nardella

Hanno fatto parte della struttura

Angelo Borrelli, Gabriella Carunchio, Luciano Cavarra, Pietro Colicchio, Biagio Costa, Lavinia Di Meo, Gianluca Garro, Antonio Gioia, Francesca Giuliani, Italo Giulio, Fabio Maurano, Natale Mazzei, Agostino Miozzo, Paolo Molinari, Anna Natili, Roberto Oreficini Rosi, Lucia Palermo, Simona Palmiero, Ada Paolucci, Sara Petrinelli, Biagio Prezioso, Umberto Rosini, Marco Rossitto, Sisto Russo, Chiara Salustri Galli, Maria Siclari, Maurilio Silvestri, Gianfranco Sorchetti, Vincenzo Vigorita

REGIONI

Referenti

Basilicata: Claudio Berardi, Antonella Belgiovine, Maria Carmela Bruno, Cinzia Fabozzi, Donatella Ferrara, Cosimo Grieco, Guido Loperte (coordinatore), Alfredo Maffei, Pietro Perrone; *Calabria:* Fortunato Varone (coordinatore); *Campania:* Mauro Biafore (coordinatore), Claudia Campobasso, Luigi Cristiano, Emilio Ferrara, Luigi Gentilella, Maurizio Giannattasio, Francesca Maggiò, Celestino Rampino; *Puglia:* Tiziana Bisantino (coordinatore), Carlo Caricasole, Domenico Donvito, Franco Intini, Teresa Mungari, Fabrizio Panariello, Francesco Ronco, Zoida Tafila; *Sicilia:* Giuseppe Basile, Antonio Bruccheri, Aldo Guadagnino, Maria Nella Panebianco, Antonio Torrisi

Sono stati referenti

Basilicata: Alberto Caivano; *Calabria:* Giuseppe Iritano, Domenico Pallaria, Francesco Russo (coordinatore), Carlo Tansi, Luigi Giuseppe Zinno; *Puglia:* Giuseppe Tedeschi; *Campania:* Crescenzo Minotta; *Sicilia:* Nicola Alleruzzo

Affidamento di servizi del DPC al CNR-IGAG

Responsabile Unico del Procedimento: Mario Nicoletti

Direttore di Esecuzione Contrattuale: Fabrizio Bramerini

Referenti rischio sismico: Fabrizio Bramerini, Sergio Castenetto, Daniele Spina, Antonella Gorini, Giuseppe Naso

Referente rischio vulcanico: Stefano Ciolli

Referenti pianificazione di emergenza: Domenico Fiorito, Stefania Renzulli

CNR-IGAG (operatore economico rischio sismico e vulcanico)

Massimiliano Moscatelli (referente)

Struttura di coordinamento

Gianluca Carbone, Claudio Chiappetta, Francesco Fazio, Massimo Mari, Silvia Massaro, Federico Mori, Edoardo Peronace, Attilio Porchia, Francesco Stigliano (coordinatore operativo)

Struttura tecnica

Angelo Anelli, Massimo Cesarano, Eleonora Cianci, Stefania Fabozzi, Gaetano Falcone, Cora Fontana, Angelo Gigliotti, Michele Livani, Amerigo Mendicelli, Giuseppe Occhipinti, Federica Polpetta, Alessandro Settimi, Rose Line Spacagna, Daniel Tentori, Valentina Tomassoni

Struttura gestionale

Lucia Paciucci (coordinatrice gestionale), Francesca Argiolas (supporto gestionale), Federica Polpetta (supporto gestionale), Francesco Petracchini

Revisori

Emilio Bilotta, Paolo Boncio, Paolo Clemente, Maria Ioannilli, Massimo Mazzanti, Roberto Santacroce, Carlo Viggiani

Supporto tecnico-amministrativo

Francesca Argiolas, Patrizia Capparella, Martina De Angelis, Marco Gozzi, Alessandro Leli, Patrizia Mirelli, Simona Rosselli

Hanno fatto parte della struttura

Raffaella Ciuffreda, Giuseppe Cosentino, Melissa Di Salvo, Giovanni Di Trapani, Rosa Marina Donolo, Carolina Fortunato, Biagio Giaccio, Marco Modica, Marco Nocentini, Andrea Rampa, Laura Ragazzi, Gino Romagnoli, Paolo Tommasi, Vitanonio Vacca

A 2.4 Definizione di metodi avanzati di valutazione della qualità delle indagini e dei risultati degli studi di MS

Responsabile DPC: Giuseppe Naso

Responsabile CNR-IGAG: Gianluca Carbone, Edoardo Peronace

A cura di

Massimo Cesarano; Attilio Porchia; Gino Romagnoli

Con il contributo di

Gianluca Carbone, Edoardo Peronace, Emanuele Tarquini.

versione colophon 06/12/2021

Sommario

Descrizione dell'attività ed obiettivi	6
SEZIONE 1 - Metodi avanzati di valutazione della qualità delle indagini e dei risultati degli studi di MS	9
1 Premessa	10
2 Fase 1: selezione dei parametri significativi	11
2.1 Tipologie di parametri estratti	13
3 Fase 2: metodologia di estrazione di alcuni parametri dalla banca dati degli studi di MS	14
3.1 Interfaccia di accesso alle interrogazioni	14
3.2 Raccolta e catalogazione delle curve di variazione di G/G_0 e di D (%) in funzione della deformazione	19
3.3 Analisi statistiche per le curve sperimentali di variazione di G/G_0 e di D (%) in funzione della deformazione, archiviate per unità gt	22
4 Fase 3: elaborazione di statistiche tecniche aggiornate del parametro VS	27
4.1 Estrazione del parametro Vs	27
4.2 Estrazione del parametro Vs in associazione al parametro L	28
4.2.1 Elaborazioni e analisi statistiche del parametro Vs associato al parametro L	29
4.2.2 Variazione con la profondità del parametro Vs associato al parametro L	33
4.2.3 Analisi dei cluster finalizzata al raggruppamento di unità gt	41
5 Bibliografia	46
SEZIONE 2 - Omogeneizzazione degli studi di MS a scala regionale: L'esempio della Calabria per la realizzazione di una carta geologico-tecnica regionale e di Contesto Territoriale	48
1 Premessa	49
2 Costruzione della legenda standard di riferimento	51
3 Applicazioni	57
3.1 Dalla carta geologica alla carta geologico-tecnica a scala nazionale	57
3.2 <i>Scala Regionale</i>	61
Fase 1: La carta geologica regionale	61
Fase 2: Codifica dei Gruppi Geologico-Tecnici (GGT)	64
Fase 3 Codifica delle Unità Geologico-Tecniche (UGT)	65

3.3	La carta geologico-tecnica di Contesto Territoriale	69
4	Realizzazione di carte Tematiche di Contesto Territoriale: La carta delle Aree a Risposta Sismica Omogenea (ARSO)	72
5	Conclusioni	75
6	Bibliografia	76

Descrizione dell'attività ed obiettivi

Viene di seguito descritta l'attività "A2.4.: Definizione di metodi avanzati di valutazione della qualità delle indagini e dei risultati degli studi di MS", aggiornando e integrando i risultati delle precedenti versioni (attività A2.4 del 27/11/2020, versione 4.0 e precedenti), con l'obiettivo di fornire dei contributi tecnico-scientifici determinanti per la valutazione ed il miglioramento della qualità degli studi di Microzonazione Sismica (MS), mediante l'utilizzo della Banca dati nazionale degli studi di MS (DB_MS). Lo stato di attuazione degli studi di Microzonazione sismica (MS) nei comuni italiani, costantemente aggiornato e consultabile al link <http://www.webms.it/servizi/stats.php>, ad oggi, giugno 2021, ha oltrepassato il 50% della copertura. L'insieme dei dati provenienti da indagini pregresse e di nuova acquisizione, collezionate per ogni studio di MS, costituisce una banca dati unica a livello internazionale, per la mole e variabilità delle informazioni archiviate. L'avanzamento degli studi di MS e quindi l'aggiornamento continuo e arricchimento del DB_MS ha reso necessario lo sviluppo di una nuova procedura automatica di estrazione dei dati, finalizzata a rendere questi disponibili e consultabili a tutti gli utenti interessati. Grazie all'innovativo e rapido metodo di estrazione dei dati, di seguito descritto, sono state effettuate analisi statistiche su alcuni parametri ritenuti significativi ai fini della caratterizzazione delle unità geologico-tecniche e alla valutazione dell'amplificazione sismica di sito.

Un esempio di utilizzo di tali dati è l'associazione della parametrizzazione delle singole unità geologico-tecniche a un prodotto cartografico di base per gli studi di MS, rappresentato dalla Carta Geologico-Tecnica, in questo esempio realizzato a grande scala. L'analisi dei prodotti cartografici della MS sinora consegnati ha messo in evidenza, in molti casi, una disomogenea classificazione delle unità geologico-tecniche. Sono state infatti riscontrate, anche in comuni limitrofi, attribuzioni delle stesse unità geologiche a differenti unità geologico-tecniche. Ciò ha reso necessario l'avvio di un processo di omogeneizzazione del dato a scala nazionale, con lo scopo di fornire una carta geologico-technica di riferimento per tutto il territorio nazionale, in cui le singole unità geologiche siano anche corredate da intervalli di valori dei parametri geofisici e geotecnici principali (Romagnoli et al., 2019). Partendo dalla definizione della metodologia per la realizzazione della Carta geologico-technica a scala nazionale, si è passati a descrivere il flusso di lavoro necessario per il passaggio a scale più dettagliate per la realizzazione di carte geologico-techniche a scala regionale e di contesto territoriale, accompagnata quest'ultima da una matrice delle possibili combinazioni a scala di contesto delle unità geologico tecniche. Cartografie tematiche di questo tipo possono avere molteplici utilizzi, anche per la realizzazione di studi di pericolosità finalizzati a scenari di rischio.

A scala di contesto territoriale e considerando gli obiettivi della microzonazione sismica, quali la definizione di fattori di amplificazione in microzone omogenee dal punto di vista sismico, l'attività di ricerca è stata finalizzata a definire gli ingredienti necessari per una macrozonazione di contesto analizzando per ora esclusivamente l'aspetto relativo all'amplificazione stratigrafica. Partendo dunque dalla ricostruzione del modello geologico di sottosuolo attraverso la carta geologico-technica di contesto e la suddetta matrice, a ciascuna unità geologico tecnica che compone tale modello è possibile associare i parametri per la modellazione numerica di RSL, quali la velocità delle onde di taglio (V_s) in relazione a una determinata profondità e le proprietà dinamiche definite dalle curve di variazione del modulo di taglio ($G/G_0(\gamma)$) e del damping ($D(\gamma)$), parametri, questi che possono essere estratti dalle statistiche sulla Banca dati nazionale degli studi di MS (DB_MS).

Tenendo conto della metodologia di estrazione dei dati descritta nei paragrafi seguenti, l'attività di ricerca si è concentrata su un'analisi statistica avanzata del parametro V_s e delle proprietà dinamiche in relazione alle unità geologico-techniche.

Per meglio descrivere l'attività si è scelto di suddividere il documento in due sezioni:

- SEZIONE 1: Metodi avanzati di valutazione della qualità delle indagini e dei risultati degli studi di MS;
- SEZIONE 2: Omogeneizzazione degli studi di MS a scala regionale: realizzazione di una carta geologico-tecnica regionale e di Contesto Territoriale per la regione Calabria.

La **SEZIONE 1** del documento riporta una prima parte in cui vengono descritti i parametri ritenuti significativi ai fini del calcolo dell'amplificazione di sito e la procedura di estrazione degli stessi dal DB-MS; per consentire l'interrogazione e lo scaricamento dei dati d'interesse dal DB-MS agli utenti che ne facciano richiesta è stato implementato un apposito script in Python che restituisce i dati richiesti in formato tabellare. Nella seconda parte della sezione 1 verranno presentati i nuovi dati relativi all'analisi statistica condotta sul parametro Vs e sulle curve di decadimento in relazione alle unità geologico tecniche di appartenenza.

L'obiettivo è quello di fornire delle statistiche robuste sulla variabilità dei due principali parametri necessari per la modellazione di RSL in funzione delle unità geologico tecniche di riferimento, finalizzate anche allo sviluppo di strumenti (applicativi e tools in ambiente WEB) e cartografie per il miglioramento del calcolo della pericolosità sismica a scala vasta mediante approcci semplificati).

La **SEZIONE 2** del documento è focalizzata alla realizzazione di una procedura standard per la realizzazione di cartografie geologiche e geologico-tecniche multiscala. Lo scopo di definire una procedura standard è dettato dalla necessità di avere come risultato finale un prodotto omogeneo e confrontabile a tutte le scale di rappresentazione e, soprattutto, di rendere il processo riproducibile.

Si è partiti dalla costruzione di una legenda standard di riferimento che contemplasse la variabilità litologica nazionale e che fosse allo stesso tempo una legenda di conversione tra le "formazioni" geologiche e le unità geologico-tecniche. La legenda distingue le "formazioni" geologiche in 10 Gruppi Geologici (GG) principali utilizzando come criterio l'età e ambiente genetico, nella fattispecie sono stati distinti 8 GG per il substrato geologico e 2 per i terreni di copertura. A loro volta, i GG relativi al substrato vengono suddivisi in sub-Gruppi Geologici in funzione della litologia o associazione litologica prevalente, mentre, per i GG relativi alle coperture, la distinzione in sub-GG avviene utilizzando la granulometria prevalente e l'ambiente deposizionale. Sempre in relazione ai criteri descritti, ad ogni sub-GG è stato associato un Gruppo Geologico-Tecnico (GGT) di appartenenza. I GGT rappresentano il raggruppamento delle unità geologico-tecniche degli standard v4.2 (Commissione Tecnica, per la Microzonazione Sismica 2020) in 4 litologie principali per i terreni di copertura (sabbie, ghiaie, argille e litoidi) e 4 litologie di substrato (lapidei, granulari, coesivi, alternanze). Ogni gruppo include la variabilità litologica delle singole unità (ad esempio: GGT Sabbie SX composto dalle Unità gt SW; SP; SC; SM) che può essere rappresentata solo in condizioni di scala cartografica adeguata.

La legenda standard di riferimento così realizzata è stata applicata alla scala nazionale ottenendo una carta geologica riclassificata in GG e sub-GG, ed una carta geologico-tecnica classificata in GGT.

Alla scala regionale, dalla riclassificazione delle "formazioni" geologiche di base in GG e sub-GG si ottiene una carta geologica regionale riclassificata con dettaglio superiore in relazione alla scala della cartografia di base utilizzata. Il passaggio alla carta geologico-tecnica regionale avviene attraverso l'introduzione di un ulteriore elemento standard di riferimento, ovvero la matrice degli ambienti. Solo per i GG di copertura (GG1 e GG2) la matrice degli ambienti associa ad ogni sub-GG in relazione all'ambiente deposizionale una univoca Unità Geologico-Tecnica, permettendo di passare dalla rappresentazione in Gruppi Geologico-Tecnici (GGT) a quella in Unità Geologico-Tecniche (UGT).

Alla scala di CT, l'aumento di dettaglio avviene attraverso la ricostruzione dei reciproci rapporti geometrici assunti dalle UGT le quali, per cause tettoniche o stratigrafiche (intercalazioni), si trovano ad assumere posizioni diverse indipendentemente dall'età. Le unità sono quindi distinte, in relazione alla loro posizione, attraverso un pedice numerico.

L'intero processo consente di avere a disposizione diversi prodotti cartografici omogenei dal punto di vista della cartografia tematica in prospettiva sismica a differente scala: nazionale, regionale e di CT. La disponibilità di queste cartografie omogenee multiscala consente di sviluppare metodologie di analisi per lo studio delle pericolosità geologiche, dell'amplificazione stratigrafica, nonché consente di utilizzare le carte per revisionare gli studi di MS già validati e come coordinamento cartografico per quelli in fase di programmazione. Il flusso di lavoro impostato, avendo a disposizione una carta nazionale di riferimento, consente di applicare la metodologia anche in altre Regioni garantendo l'omogeneità del dato.

Le basi cartografiche utilizzate nella procedura descritta sono la carta geologica d'Italia alla scala 1:500.000 (Pantaloni et Al., 2006), la carta geologica d'Italia alla scala 1:100.000 (Amanti et Al., 2007) e la carta geologica della Regione Calabria a scala di 1:25.000 (Casmez, 1967).

SEZIONE 1 - Metodi avanzati di valutazione della qualità delle indagini e dei risultati degli studi di MS

1 Premessa

Nella presente sezione vengono sintetizzati i risultati delle analisi statistiche tecniche, aggiornate ad aprile 2021, su alcuni dei parametri archiviati nella banca dati nazionale della microzonazione sismica (di seguito DB-MS; disponibile per la consultazione su www.webms.it, sito realizzato da CNR IGAG per il Dipartimento della Protezione Civile Nazionale), derivanti dalle indagini raccolte negli studi di microzonazione sismica (MS) realizzati sul territorio nazionale.

Gli studi di MS, redatti secondo gli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica (ICMS 2008), consentono di raccogliere e catalogare in maniera uniforme dati e parametri derivanti da indagini geologiche, geotecniche e geofisiche, seguendo specifici standard di archiviazione (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica 2018a). L'insieme dei dati provenienti da indagini pregresse e di nuova acquisizione, collezionate per ogni studio di MS, costituisce una banca dati unica a livello internazionale, per la mole e variabilità delle informazioni archiviate.

Lo stato di attuazione degli studi di Microzonazione sismica (MS) nei comuni italiani, costantemente aggiornato e consultabile al link <http://www.webms.it/servizi/stats.php>, attualmente (aprile 2021), ha oltrepassato il 50% dei comuni previsti. Nel dettaglio, partendo dai 3888 comuni italiani per i quali sono stati finanziati studi di MS, caratterizzati da una pericolosità sismica di base avente valori di $a_g \geq 0.125$ g, circa il 52% (2011 comuni) sono dotati di studi di MS validati, mentre il restante 48% pari a 1877 comuni, saranno sottoposti a studi di MS nel prossimo futuro (Figura 1-1) (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica 2018b).

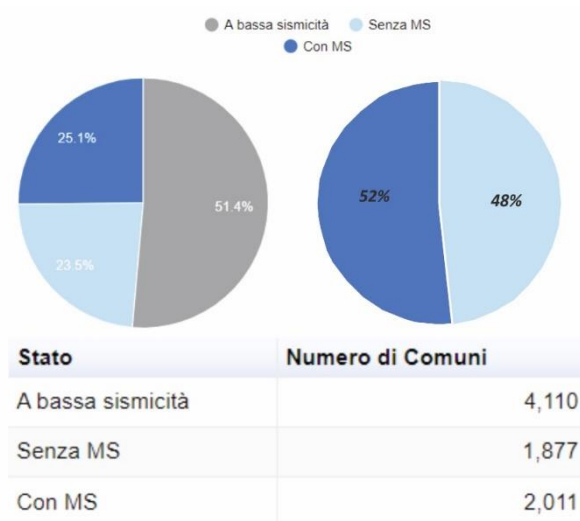


Figura 1-1 Stato di attuazione degli studi di MS nei Comuni Italiani aggiornato ad aprile 2021 (da <http://www.webms.it/servizi/stats.php>).

L'avanzamento degli studi di MS e, quindi, l'aggiornamento continuo del DB_MS ha reso necessario lo sviluppo di una procedura automatica di estrazione dei dati, finalizzata a rendere questi dati disponibili e consultabili a tutti gli utenti interessati. Tale procedura consente l'estrazione dei parametri ritenuti più significativi utilizzando un apposito servizio all'interno del portale webMS, sviluppato considerando l'esperienza maturata nel corso dell'attività di progetto degli scorsi anni (Romagnoli G., 2019).

L'attività di ricerca è stata svolta seguendo quattro fasi di lavoro di seguito elencate (Figura 1-2):

- Fase 1 – selezione dei parametri ritenuti significativi da estrarre dal DB-MS;
- Fase 2 – descrizione delle metodologie di estrazione dei parametri dal DB-MS;
- Fase 3 – elaborazione e analisi di statistiche tecniche utilizzando i valori dei parametri estratti in formato tabellare e successiva trasformazione in shapefile su cui sono state effettuate opportune interrogazioni spaziali;
- Fase 4 – elaborazione di mappe e cartografie tematiche tramite l'utilizzo dei parametri e delle analisi statistiche elaborate (es. carta Vs30, carta geologico-tecnica a diversa scala, ecc....).

Le fasi 1 e 2 sono propedeutiche all'elaborazione delle analisi statistiche.

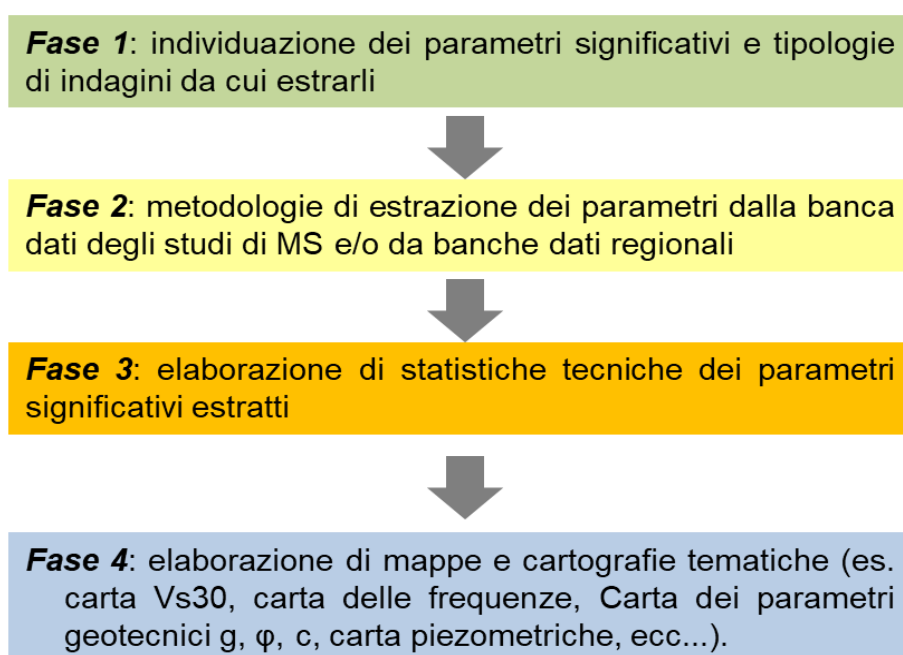


Figura 1-2 Fasi propedeutiche di lavoro in cui è articolata l'attività di ricerca.

2 Fase 1: selezione dei parametri significativi

La prima parte dell'attività ha previsto l'individuazione dei parametri geologici, geofisici e geotecnici da estrarre dal DB-MS ritenuti maggiormente significativi. Oltre ai parametri considerati per il Calcolo di IOCT (VS, VP, E, G, CP, L, ecc.; Gruppo di lavoro PON 2020), si è ritenuto opportuno aggiungere anche i parametri ottenibili da prove penetrometriche sia dinamiche che statiche, molto diffuse nel DB_MS, e utili nel caso di valutazioni stratigrafiche anche per studiare specifici aspetti come, ad esempio, la suscettibilità a liquefazione. Nel dettaglio, tali parametri sono la resistenza alla punta QC e quella laterale FS per le prove penetrometriche statiche (CPT, CPTE e CPTU) e i parametri del numero di colpi (PT, PTS, SPT, PTM e PTL) relativi rispettivamente alle prove penetrometriche dinamiche (SPT), super pesante (DS), pesante (DP), media (DN) e leggera (DL).

Pertanto tutti i parametri selezionati vengono di seguito elencati per punti con la sigla e nomenclatura utilizzata negli attuali Standard di rappresentazione e archiviazione informatica (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica (2020)):

- > **VS** - velocità onde s (m/s)
- > **VP** - velocità onde p (m/s)
- > **E** - modulo di Young (MPa)
- > **G** - modulo di taglio (MPa)
- > **CP** - coefficiente di Poisson
- > **L** - litologia strato
- > **SG** - soggiacenza falda (m)
- > **F0** - frequenza fondamentale di risonanza (Hz)
- > **PV** - peso dell'unità di volume (kN/m³)
- > **DR** - densità relativa di terreni incoerenti (%)
- > **IP** - indice di plasticità di terreni pseudocoerenti (%)
- > **F1** - angolo di attrito in tensioni efficaci (°)
- > **C** - coesione efficace (MPa)
- > **CU** - coesione non drenata (MPa)
- > **E1** - indice dei vuoti
- > **W** - contenuto d'acqua
- > **GH** - ghiaia (%), **SA** - sabbia (%), **LM** - limo (%), **AR** - argilla (%) associate ad altri parametri
- > **QC** - resistenza alla punta in prove penetrometriche statiche (CPT, CPTE e CPTU)
- > **FS** - resistenza laterale in prove penetrometriche statiche (CPT, CPTE e CPTU)
- > **PT** - numero di colpi da prove SPT
- > **PTS** - numero di colpi da prova penetrometrica dinamica super pesante
- > **SPT** - numero di colpi da prova penetrometrica dinamica pesante
- > **PTM** - numero di colpi da prova penetrometrica dinamica media
- > **PTL** - numero di colpi da prova penetrometrica leggera

I due parametri relativi alle proprietà dinamiche dei suoli, **RT** - curva di decadimento del modulo secante di rigidezza a taglio (γ , G/G_0) e **IS** - curva di variazione dello smorzamento con la deformazione a taglio (γ , **D**), sono ritenuti significativi ai fini della valutazione dell'amplificazione di sito (Kumar et al., 2018). A causa della erronea archiviazione sul DB_MS, questi parametri sono stati oggetto di un lavoro di raccolta, catalogazione e analisi ad hoc.

Come già evidenziato nell'attività dello scorso anno, abbinando il parametro litologia strato "L" agli altri parametri, è possibile effettuare elaborazioni e analisi statistiche finalizzate alla parametrizzazione delle singole unità geologico-tecniche. I parametri estratti possono essere interrogati per posizione, profondità, tipologia e convertiti in ambiente GIS in formato shapefile, per analisi geostatistiche.

Ulteriori utilizzi delle statistiche tecniche dei parametri estratti possono riguardare la realizzazione di prodotti cartografici di riferimento per studi di pericolosità e di rischio sismico (Fase 4). A tal fine, per esempio, i dati archiviati nel DB_MS, relativi sia alle stratigrafie estratte da circa 35000 sondaggi, che i profili verticali di Vs da indagini geofisiche, sono stati utilizzati per la realizzazione di una nuova carta a scala nazionale della Vs 30 (Mori et al., 2020).

2.1 Tipologie di parametri estratti

Di tutti i parametri selezionati vengono di seguito descritti, nel dettaglio, i parametri analizzati statisticamente, con le indicazioni delle diverse tipologie d'indagine dalle quali sono stati estratti, denominati secondo le rispettive sigle utilizzate negli Standard di rappresentazione e archiviazione informatica (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, 2020):

- > Litologia strato **"L"**; il parametro corrisponde alla sigla con cui vengono classificate le unità geologico-tecniche. Negli studi di MS le unità geologico-tecniche vengono suddivise in due grandi gruppi, costituiti dai terreni di copertura e dal substrato geologico (Gruppo di lavoro ICMS, 2008). Il parametro **"L"** è stato estratto da tutte le indagini geognostiche comprendenti i vari tipi di sondaggi: a carotaggio continuo (S), a carotaggio continuo che intercetta il substrato (SS), a distruzione di nucleo (SD), a distruzione di nucleo che intercetta il substrato (SDS), pozzo per idrocarburi (PI), trincea o pozzetto esplorativo (T), pozzo per acqua (PA).
- > Velocità propagazione onde di taglio **"VS"**; questo parametro viene estratto da indagini geofisiche puntuali in foro, quali dilatometro sismico SDMT, prova penetrometrica con cono sismico SCPT, prova in foro downhole DH, crosshole CH, uphole UH. A tale parametro è possibile associare il parametro **"L"** (litologia strato) dell'unità geologico-tecnica del sondaggio su cui è effettuata la prova. A differenza di quanto analizzato nella versione 2.0 del documento, per le indagini puntuali è stata considerata una distanza massima di 5 m tra i due siti puntuali relativi all'indagine geofisica e geognostica... Alcuni dei suddetti parametri possono inoltre essere estratti anche da indagini geofisiche lineari, quali array sismico ESAC_SPAC, verticale virtuale lungo profilo sismica a riflessione SL, verticale virtuale lungo profilo sismica a rifrazione SR, MASW, SASW, REMI, FTAN. A tali parametri è possibile associare il parametro **"L"** (litologia strato) dell'unità geologico-tecnica di un eventuale sondaggio disponibile, selezionato se ricadente all'interno della stessa MOPS a una distanza inferiore ai 100 m dal baricentro dell'indagine lineare.
- > Angolo di attrito in tensioni efficaci **"F1"** (ϕ') e Coesione **"C"** (c); questi parametri vengono estratti da prove geotecniche di laboratorio quali, taglio diretto TD, triassiale CD e/o triassiale CU. A tali parametri, ottenuti da indagini geotecniche di laboratorio effettuate su campioni indisturbati prelevati da sondaggi (SC), è possibile associare direttamente la rispettiva unità geologico-tecnica tramite la correlazione con il parametro **"L"**.
- > Angolo di attrito in tensioni efficaci **"F1"** (ϕ'), Coesione non drenata **"CU"** e densità relativa **"DR"**; questi parametri vengono estratti da relazioni empiriche correlate a indagini geotecniche in sito quali: prove penetrometriche statiche con punta meccanica CPT, con punta elettrica CPTE, con piezocono CPTU, prova penetrometrica dinamica in foro SPT, prova penetrometrica dinamica super pesante DS, pesante DP, media DN, leggera DL; prova dilatometrica DMT, prova scissometrica VT. In questo caso non è possibile associare direttamente la rispettiva unità geologico-tecnica tramite la correlazione con il parametro **"L"**.
- > Peso dell'unità di volume **PV** (γ) densità relativa **DR**, indice di plasticità **IP**, e percentuali di ghiaia **GH**, sabbia **SA**, limo **LM** e argilla **AR**; questi parametri vengono estratti da analisi su campione SM.
- > Parametri correlati ai risultati delle indagini in sito da prove penetrometriche sia dinamiche, **PT**, **SPT**, **PTS**, **SPT**, **PTM**, **PTL**, relativi al numero di colpi per le diverse tipologie di prove e considerando i due parametri **QC** resistenza alla punta, e **FS** resistenza laterale.
- > γ , **G/G₀** (**RT**), γ , **D** (**IS**); questi parametri vengono estratti da indagini geotecniche di laboratorio su campioni indisturbati quali: colonna risonante RC, taglio semplice ciclico TSC, taglio torsionale ciclico TTC, triassiale ciclica TC da cui è possibile ricavare la **RT** - curva di decadimento del modulo secante di rigidezza a taglio (γ , **G/G₀**), e la **IS** - curva di variazione dello smorzamento con la deformazione a taglio (γ , **D**). Purtroppo, interrogando il DB_MS, i

dati relativi alle curve di decadimento sono molto scarsi. si è quindi attivato un Gruppo di lavoro con l'obiettivo di raccogliere e catalogare tutte le curve di variazione di G/G_0 e di D (%) in funzione della deformazione, disponibili a livello nazionale. I risultati di tale lavoro sono descritti nel paragrafo 3.2.

3 Fase 2: metodologia di estrazione di alcuni parametri dalla banca dati degli studi di MS

Viene di seguito descritta la metodologia utilizzata per l'estrazione dei parametri selezionati, ritenuti maggiormente significativi, elencati nel paragrafo 1 (§1). La metodologia di estrazione iniziale, già descritta e definita nelle versioni precedenti del presente documento (Gruppo di lavoro PON 2020), è stata revisionata e aggiornata attraverso la realizzazione di un'interfaccia grafica, ottenuta tramite l'esecuzione di uno script in linguaggio Python, ovvero, di una porzione di codice in grado di svolgere una serie di operazioni in modo autonomo. Per la selezione delle indagini da considerare si è scelto di estendere a 5 m la distanza tra le indagini puntuali del parametro e l'indagine geognostica e a 100 m per quella tra indagine lineare e geognostica, ottenendo come risultato la discretizzazione metro per metro del valore del parametro in profondità.

3.1 Interfaccia di accesso alle interrogazioni

Al fine di permettere a un utente qualificato di accedere al servizio mediante delle credenziali di accesso e di poter scaricare in modo autonomo i parametri selezionati dalla banca dati del DB_MS, è stata predisposta un'interfaccia web, che sarà resa disponibile all'interno del portale WebMS, dalla quale è possibile selezionare e scaricare tutti i parametri di interesse elencati nel capitolo 1.

Lo script in linguaggio Python viene eseguito una volta che i vari campi, presenti nell'interfaccia grafica (Figura 3 1), vengono opportunamente selezionati.

Figura 3-1 Interfaccia grafica con cui sarà possibile interrogare il sistema per scaricare i parametri di interesse dal DB_MS.

La prima informazione che viene richiesta è la scelta del parametro di interesse selezionando dal menu a tendina (Figura 3-2) uno dei seguenti parametri:

- VS - velocità onde s (m/s)
- VP - velocità onde p (m/s)
- E - modulo di Young (MPa)
- G - modulo di taglio (MPa)
- CP - coefficiente di Poisson
- L - litologia strato
- SG - soggiacenza falda (m)
- F0 - frequenza fondamentale di risonanza (Hz)
- PV - peso dell'unità di volume (kN/m³)
- DR - densità relativa di terreni incoerenti (%)
- IP - indice di plasticità di terreni pseudocoerenti (%)
- F1 - angolo di attrito in tensioni efficaci (°)
- C - coesione efficace (MPa)
- CU - coesione non drenata (MPa)
- E1 - indice dei vuoti
- W - contenuto di acqua
- QC - resistenza alla punta in prove penetrometriche statiche (CPT, CPTE e CPTU)
- FS - resistenza laterale in prove penetrometriche statiche (CPT, CPTE e CPTU)
- PT - numero di colpi da prove SPT
- PTS - numero di colpi da prova penetrometrica dinamica super pesante
- SPT - numero di colpi da prova penetrometrica dinamica pesante
- PTM - numero di colpi da prova penetrometrica dinamica media
- PTL - numero di colpi da prova penetrometrica leggera

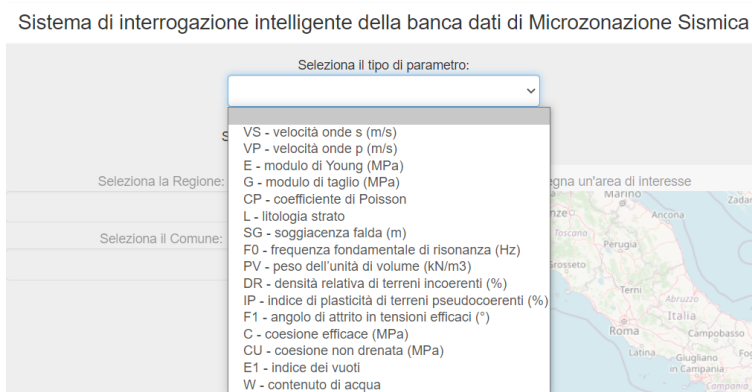


Figura 3-2 Tipologia di parametri selezionabili dal menu a tendina dell'interfaccia grafica.

Il secondo passo è quello di selezionare l'area di interesse. Questa selezione può essere effettuata geograficamente tracciando direttamente sulla mappa un'area circolare con raggio massimo limitato o in maniera alfanumerica selezionando la regione da cui si desidera estrarre il parametro (Figura 3-3). In quest'ultimo caso, nel menu a tendina viene visualizzata, la numerosità del parametro selezionato nelle singole Regioni. Una volta selezionata la Regione è possibile selezionare un Comune tra quelli per cui esiste uno studio di MS. Sarà possibile selezionare la voce "TUTTI", per estrarre tutti i dati regionali disponibili (Figura 3-3).

Figura 3-3 Interfaccia grafica: selezione geografica o alfanumerica (Regione e Comune)

Nella maschera successiva, viene richiesto se si desidera o meno associare i valori del parametro selezionato alla successione litostratigrafica, ovvero al parametro “L” relativo alla sigla dell’unità gt corrispondente (Figura 3-4).

Infine, digitando la password sarà possibile lanciare lo script che estrarrà i dati (Figura 3-4).

La definizione delle variabili servirà allo *script* per eseguire specifiche istruzioni in linguaggio SQL che consentono di selezionare, all’interno delle tabelle della banca dati, i record che rispondono alla richiesta imposta dell’utente (Figura 3-5).

In particolare, le informazioni contenute all’interno dei record riguarderanno principalmente il valore del parametro e la profondità di acquisizione (Figura 3-5).

Successivamente, i dati così selezionati saranno estratti e salvati in una tabella temporanea per poter essere sottoposti ad una serie di operazioni di ripulitura (*data-cleaning*), come la rimozione dei dati mancanti e la correzione di quelli inesatti (Figura 3-5).

In base alla richiesta dell’utente, le informazioni relative al parametro saranno:

- espresse in funzione della sola profondità, attraverso la suddivisione metro per metro dei record relativi al parametro richiesto;
- associate alla descrizione delle unità geologico-tecniche, in funzione della profondità di acquisizione.

Figura 3-4 Interfaccia grafica: associazione del parametro alla successione litostratigrafica e inserimento della password.

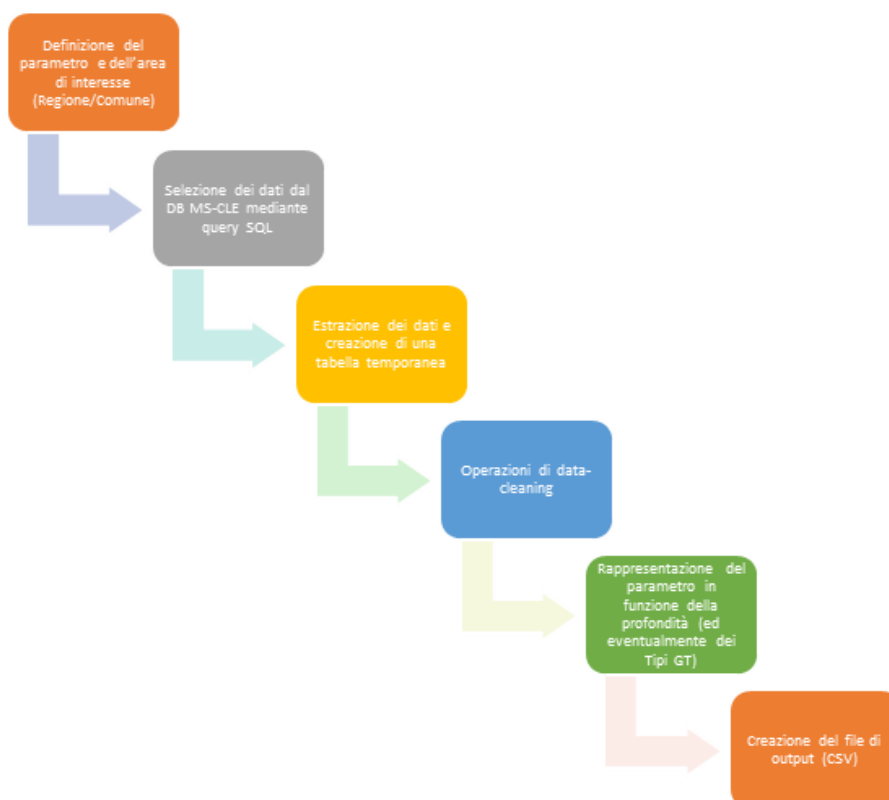


Figura 3-5 Descrizione schematica delle procedure eseguite dallo script nella produzione del file di output (.csv).

Infine, la tabella temporanea sarà convertita in un file in formato “CSV” e potrà essere scaricata dall’utente (Figura 3-6).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	id_indpu_ind	id_indpu_lito	tipo_ind	tipo_lito	valore_ind	valore_lito	prof_top	prof_bot	tipo_rel	check	x	y
2	051024P34DH52	051024P34SS39	DH	SS	305	RI		0	1 diretta	ok	264883.5	4819069
3	051024P34DH52	051024P34SS39	DH	SS	305	SM		1	2 diretta	ok	264883.5	4819069
4	051024P34DH52	051024P34SS39	DH	SS	228	SM		2	3 diretta	ok	264883.5	4819069
5	051024P34DH52	051024P34SS39	DH	SS	228	SM		3	4 diretta	ok	264883.5	4819069
6	051024P34DH52	051024P34SS39	DH	SS	228	SM		4	5 diretta	ok	264883.5	4819069
7	051024P34DH52	051024P34SS39	DH	SS	227	ML		5	6 diretta	ok	264883.5	4819069
8	051024P34DH52	051024P34SS39	DH	SS	227	ML		6	7 diretta	ok	264883.5	4819069
9	051024P34DH52	051024P34SS39	DH	SS	227	SM		7	8 diretta	ok	264883.5	4819069
10	051024P34DH52	051024P34SS39	DH	SS	227	SM		8	9 diretta	ok	264883.5	4819069
11	051024P34DH52	051024P34SS39	DH	SS	227	SM		9	10 diretta	ok	264883.5	4819069
12	051024P34DH52	051024P34SS39	DH	SS	227	SM		10	11 diretta	ok	264883.5	4819069
13	051024P34DH52	051024P34SS39	DH	SS	227	CL		11	12 diretta	ok	264883.5	4819069
14	051024P34DH52	051024P34SS39	DH	SS	227	CL		12	13 diretta	ok	264883.5	4819069
15	051024P34DH52	051024P34SS39	DH	SS	359	LPS		13	14 diretta	ok	264883.5	4819069
16	051024P34DH52	051024P34SS39	DH	SS	359	LPS		14	15 diretta	ok	264883.5	4819069
17	051024P34DH52	051024P34SS39	DH	SS	359	LPS		15	16 diretta	ok	264883.5	4819069
18	051024P34DH52	051024P34SS39	DH	SS	359	LPS		16	17 diretta	ok	264883.5	4819069

Figura 3-6 Esempio di tabella risultante (file .csv) relativa all'estrazione del parametro “VS” associato al parametro “L” (unità geologico-tecnica)

La tabella risultante sarà costituita dai seguenti campi (Figura 3-6):

- id_indpu_ind: identificativo dell'indagine da cui è stato estratto il parametro “VS”;
- id_indpu_lito: identificativo dell'indagine da cui è stato estratto il parametro “L”;
- tipo_ind: identificativo del tipo di indagine geofisica da cui è stato estratto il parametro “VS”;
- tipo_lito: identificativo del tipo di indagine da cui è stato estratto il parametro “L”;
- valore_ind: valore del parametro “VS”;

- **valore_lito**: valore del parametro "L";
- **prof_top**: profondità rispetto al piano campagna del top dell'indagine (m);
- **prof_bot**: profondità rispetto al piano campagna del bottom dell'indagine (m);
- **tipo_rel**: rappresenta il tipo di relazione eseguita per associare il parametro al tipo GT ad una data profondità. Può contenere i seguenti valori: 'Diretta', se il sito del parametro è lo stesso del sito del tipo GT; 'x' dove x rappresenta un numero da 0-5 (m) nel caso di indagini puntuali, se i siti del parametro e del tipo GT non sono gli stessi (e distano x metri l'uno dall'altro), o da 0-100 (m) nel caso di indagini lineari;
- **x**: longitudine in UTM WGS 84 zona 33 N (EPSG 32633);
- **y**: latitudine in UTM WGS 84 zona 33 N (EPSG 32633).

In base ai parametri selezionati, i file (.csv) di output prodotti possono essere di tre tipologie differenti:

- 1) tipo 1, nel caso dei parametri 'VS','CP','G','E','VP','SG','F0','F1','C','CU', i parametri possono essere suddivisi metro per metro (come l'esempio in Figura 3-6);
- 2) tipo 2, per i parametri 'PV', 'E1', 'DR', 'W', 'IP', che derivano da analisi di laboratorio su campioni, solitamente lo spessore è inferiore al metro;
- 3) tipo 3, per la sola tipologia di parametro 'L', dal quale si ottengono informazioni sulla variazione dell'unità gt con la profondità.

I parametri relativi all'analisi granulometrica 'GH', 'SA', 'LM', 'AR' espressi in % vengono aggiunti sotto forma di campi direttamente all'interno dei file di output del tipo 2, in modo da associarli agli altri parametri per il quale è stata eseguita l'indagine "SM", analisi su campione (Figura 3-7).

tipo di indagine		Parametro			unità misura
tipo	ID [304] [354]	descrizione	param	Codice [403] [453]	
analisi su campione	SM	peso dell'unità di volume	γ	PV	kN/m ³
		indice dei vuoti	E	E1	-----
		densità relativa	Dr	DR	perc.
		contenuto d'acqua	W	W	perc.
		indice di plasticità	Ip	IP	-----
		ghiaia	-----	GH	perc.
		sabbia	-----	SA	perc.
		limo	-----	LM	perc.
		argilla	-----	AR	perc.

Figura 3-7 Tipo di indagine analisi su campione "SM" e descrizione dei parametri relativi (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, 2018a).

Ovviamente per le prime due tipologie, i campi relativi alla litologia "L", quali "id_indpu_lito", "tipo_lito" e "valore_lito", sono disponibili solo nel caso in cui l'operatore risponda "Sì" alla domanda "Desideri associare il parametro alla colonnina stratigrafica?" (Figura 3-4), che consente di associare il parametro richiesto al parametro "L" relativo all'unità geologico-tecnica. In caso contrario, questi campi non appariranno all'interno del file 'csv'.

3.2 Raccolta e catalogazione delle curve di variazione di G/G_0 e di D (%) in funzione della deformazione

Come anticipato nel capitolo 1, non è stato possibile estrarre direttamente dalla banca dati degli studi MS i parametri γ , G/G_0 (RT), D (IS) da indagini geotecniche di laboratorio su campioni indisturbati del tipo colonna risonante RC, taglio semplice ciclico TSC, taglio torsionale ciclico TTC e triassiale ciclica TC, per cui è stato necessario svolgere un lavoro specifico di raccolta e catalogazione di tutte le curve di variazione di G/G_0 e di D (%) in funzione della deformazione, disponibili a livello nazionale considerando, oltre gli studi di MS, anche vari database regionali.

In particolare, sono state analizzate le indagini di laboratorio svolte nell'ambito degli Studi di MS di livello 3 realizzati dall'Ordinanza del Commissario Straordinario Ricostruzione sisma 2016 n° 24 (Comuni Centro Italia), quelle relative agli studi di MS dell'Aquila, di Ischia, del Palatino (Roma), di Santa Venerina (CT), della Regione Emilia Romagna e dalla banca dati del Progetto VEL della Regione Toscana che complessivamente hanno consentito di raccogliere e catalogare oltre 500 curve (Figura 3-8).

Dataset	n° di curve
Studi di MS 3 Comuni Centro Italia	128
Studi di MS Roma (I Municipio)	17
Studi di MS L'Aquila	27
Studi di MS Ischia	10
Studi di MS di Santa Venerina (CT)	3
Studi di MS Regione Emilia-Romagna	38
Progetto VEL (Regione Toscana)	293
Articoli pubblicati	2
Totale dati	518

Figura 3-8 Dataset utilizzati e numero di curve di decadimento raccolte e catalogate.

La catalogazione è avvenuta utilizzando una scheda metadato costituita dai seguenti campi (Figura 3-9):

- > Nome_file_raw: nome del file relativo alla tabella delle curve, costituita a sua volta dai tre campi Strain (%), G/G_{max} e Damping (%);
- > Macroarea: nome della macroarea (Regione o area) a cui si riferisce l'indagine da cui è stata estratta la curva;
- > Comune: il comune in cui è stato prelevato il campione;
- > UR: l'unità di ricerca che ha effettuato le indagini di laboratorio;
- > Nome Sondaggio: il nome del sondaggio in cui è stato prelevato il campione;
- > Camp: il nome del campione prelevato su cui sono state effettuate le indagini di laboratorio;
- > Tipo prova: il tipo di indagine di laboratorio da cui sono state ricavate le curve;
- > Prof_top e bot (m): profondità del top e del bottom rispettivamente di prelievo del campione;
- > gamma (kN/m^3): peso di volume osservato all'inizio della prova di laboratorio;
- > WL (%): Limite Liquido ottenuto del campione;
- > IP (%): Indice di Plasticità del campione;
- > codifica lab: sigla relativa all'unità geotecnica ottenuta tramite proiezione del Limite Liquido e Indice di Plasticità;

- > UGT_MS: sigla dell'unità geologico-tecnica associata da studi di MS all'indagine geognostica, alla profondità di campionamento;
- > Descrizione Campione: descrizione del campione nel report dell'indagine di laboratorio, spesso a seguito di analisi granulometrica;
- > X e Y (WGS84 – UTM 33N, m): coordinate UTM del sito in cui è stato prelevato il campione;
- > Note: eventuali note;
- > altro: link o bibliografia di riferimento per i vari dataset.

Tale tabella è allegata al presente documento (Allegato 1).

Considerando le curve del dataset del Progetto VEL della Regione Toscana, non essendo queste realizzate nell'ambito di studi di MS, è stato possibile correlare alle curve la rispettiva unità geologico-tecnica solo per quei comuni toscani coperti da studi di MS; per cui delle 293 curve iniziali, soltanto per 231 è stato possibile associare l'unità gt al campione, mentre, delle restanti 61 curve, 51 sono relative a campioni ricadenti in Comuni che non sono stati microzonati (18%), e per 10 casi (3%) non è stato possibile ubicarle a causa di informazioni mancanti nel dataset (Figura 3-10).

In diversi casi, l'indagine riporta, per ogni strato campionato, diversi test di laboratorio realizzati al fine di migliorare la banda di deformazione analizzata. In questi casi, i risultati vengono riportati nel set di dati come righe separate.

Nome_file_raw	MACROAREA	Comune	UR	Nome Sondaggio	Camp	Tipo prova	Prof_top [
036022P829CR862	Regione Emilia Roma	Mirandola		036022P829S847	CI3	RC	68,1
036022P829CR864	Regione Emilia Roma	Mirandola		036022P829S847	CI4	RC	69,6
038004P765CR916	Regione Emilia Roma	Cento		038004P765S781	C2S1	RC	8,2
038004P765TC917	Regione Emilia Roma	Cento		038004P765S781	C3S1	TC	13,5
038004P769CR920	Regione Emilia Roma	Cento		038004P769S787	C2S2	RC	8,5
038004P769TC919	Regione Emilia Roma	Cento		038004P769S786	C1S2	TC	2,5
038004P803CR922	Regione Emilia Roma	Cento		038004P803S830	C1Sh1	RC	3
038004P803CR923	Regione Emilia Roma	Cento		038004P803S830	C2Sh2	RC	9

IP (%)	codifica carta plasticità	codific	Tipo gt	UGT_MS	Descrizione Campione	X [WGS84	Y [WGS84
29,8	MH or OH			CL	Argilla limosa e limo argilloso	189026	4976883
24,2	CL			CL	Argilla limosa e limo argilloso	189026	4976883
59	MH or OH			OL	Limi argillosi e argille limose con so	208515	4963020
				SM	Sabbie limose	208515	4963020
				ML	Limi argillosi e argille limose con so	205999	4959095
				SM	Sabbie e limo	205999	4959095
				OL	Argille organiche	208265	4969157
				OH	Argille con livelli organici e torbosi	208265	4969157

Figura 3-9 Esempio di schede metadato compilate per ciascuna curva.

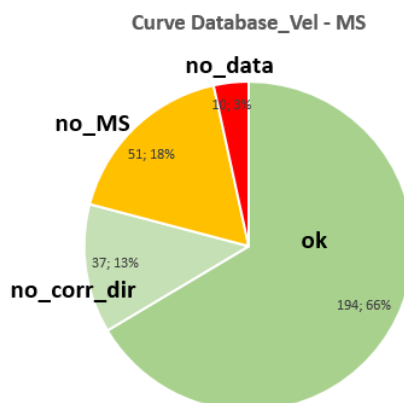


Figura 3-10 Diagramma a torta che mostra il numero di curve disponibili nel dataset VEL della Regione Toscana a cui è stato possibile correlare l'unità geologico-tecnica da studi di MS (colori verdi); queste sono distinte da quelle ubicate in Comuni senza studi di MS (colore arancione) e quelle senza riferimenti certi nell'ubicazione (colore rosso).

L'ubicazione dei siti campionati per le indagini di laboratorio da cui sono state ricavate tutte le curve catalogate è mostrata in Figura 3-11.

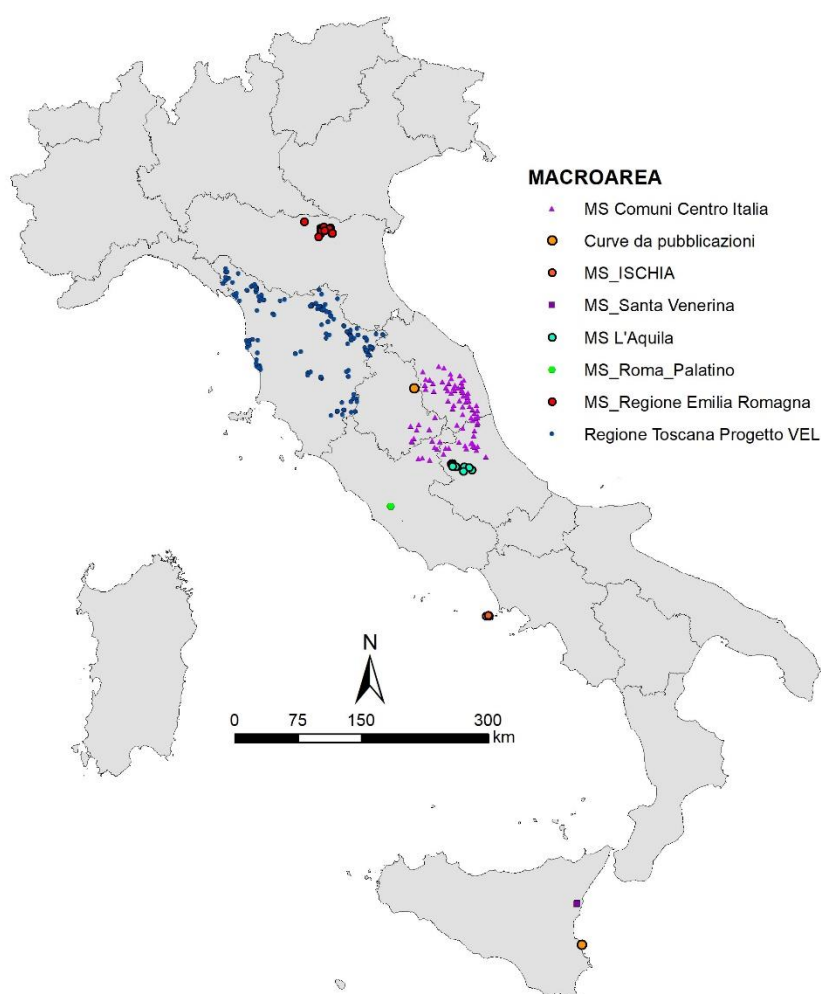


Figura 3-11 Ubicazione dei siti dove sono stati prelevati i campioni sottoposti alle prove di laboratorio per la determinazione delle curve, distinti per macroarea.

3.3 Analisi statistiche per le curve sperimentali di variazione di G/Go e di D (%) in funzione della deformazione, archiviate per unità gt

Associando le curve alle unità gt degli studi di MS, considerando la profondità di campionamento e quella corrispondente nel log geologico-tecnico del sondaggio, è possibile determinare la disponibilità del numero di curve per ciascuna unità gt. Tale numero è ovviamente influenzato dalle difficoltà di campionamento nei terreni a grana grossolana come le ghiaie e le sabbie e soprattutto nelle unità del substrato geologico cementate e lapidee.

Difatti le unità maggiormente campionate sono quelle limose e argillose relative ai terreni di copertura: ML e CL sono le due unità rappresentanti circa il 50% del set di dati, con rispettivamente 124 e 97 curve (Figura 3-12). Altro campione molto rappresentativo è quello costituito dall'unità delle sabbie fini limose SM con 87 curve (19%) e in minor misura l'unità GM delle ghiaie limose con 27 curve (6%; Figura 3-12).

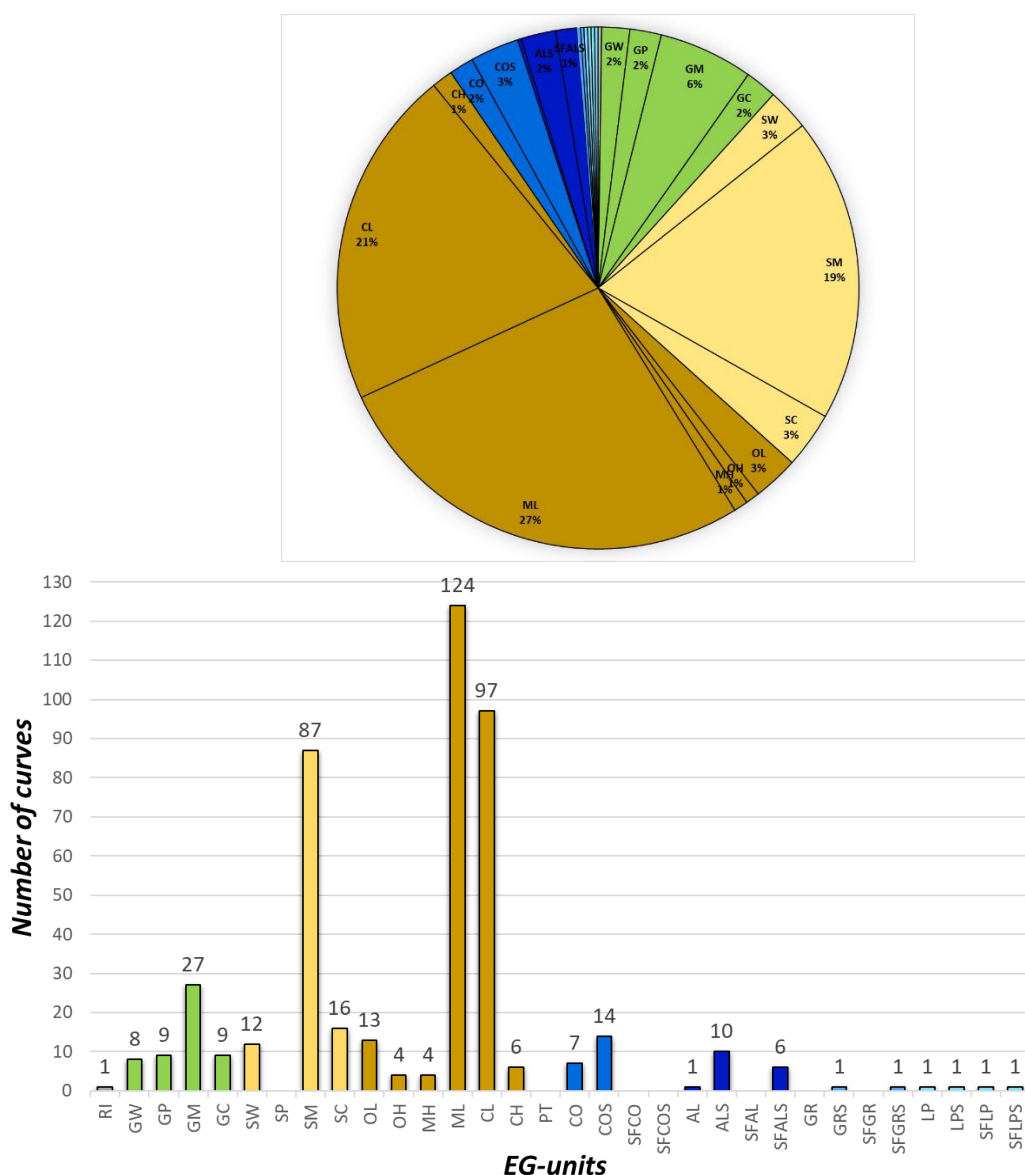


Figura 3-12 Diagramma a torta e istogramma di frequenza relativi al numero di curve archiviate nel dataset, raggruppati per unità geologico-tecnica.

Le unità meno rappresentate nel caso dei terreni a grana fine sono OL (13 curve), CH (6 curve), OH (4 curve) e MH (4 curve), mentre per quelli sabbiosi sono le unità SC e SW (16 e 12 curve; Figura 3-12). Le unità ghiaiose GW, GP e GC sono caratterizzate ciascuna da 8 o 9 curve (Figura 3-12). La possibilità di avere un certo numero di campioni rappresentativi delle unità gt più grossolane non è legata a particolari tecniche di campionamento effettuate, bensì all'individuazione nelle successioni ghiaiose e sabbiose di livelli più fini limosi e argillosi da campionare.

Nelle unità del substrato geologico i pochi dati disponibili si riferiscono a campioni prelevati principalmente nelle unità argillose e marnose coesive sovraconsolidate o comunque nei livelli argillosi e marnosi delle alternanze dei litotipi: per le unità COS, ALS, CO e SFALS sono disponibili rispettivamente 14, 10, 7 e 6 curve (Figura 3-12).

Il dataset delle curve di decadimento del modulo di rigidezza al taglio e di incremento del fattore di smorzamento con la deformazione derivano dalle seguenti tipologie di prove di laboratorio:

- DSDSS (Double Specimen Direct Simple Shear) ovvero prova di taglio ciclico con doppio provino;
- Colonna Risonante;
- Prova di taglio torsionale ciclico;
- Prova Triassiale Ciclica.

Nei diagrammi sottostanti sono rappresentate le unità gt più rappresentative dei terreni di copertura e del substrato geologico in funzione delle profondità di campionamento (Figura 3-13).

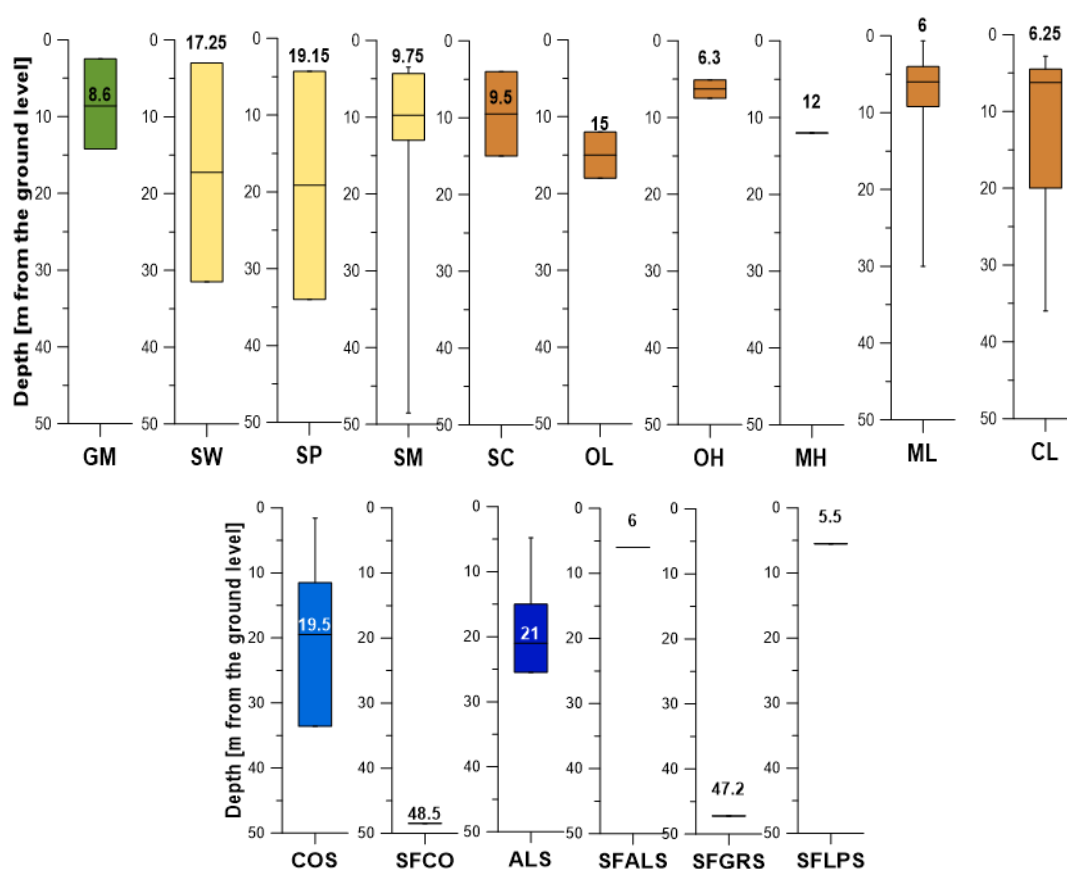


Figura 3-13 Box-plot della distribuzione con relativa dispersione della profondità dei campioni sottoposti alle prove di laboratorio in funzione della loro unità gt di appartenenza.

A valle della compilazione del metadato e all'archiviazione dei file relativi a ciascuna curva considerata, archiviati in cartelle per unità gt, si è passati alla regolarizzazione di ciascuna curva utilizzando il modello di Yokota et al. (1981) in modo da uniformare tutte le curve a uno stesso intervallo di deformazione compreso tra 10^{-5} e 1 (g%), per poi poterle confrontare.

Per le unità gt più rappresentative è stata effettuata anche un raggruppamento di tutte le curve sperimentali della stessa unità, regolarizzando poi la media (Figura 3-14).

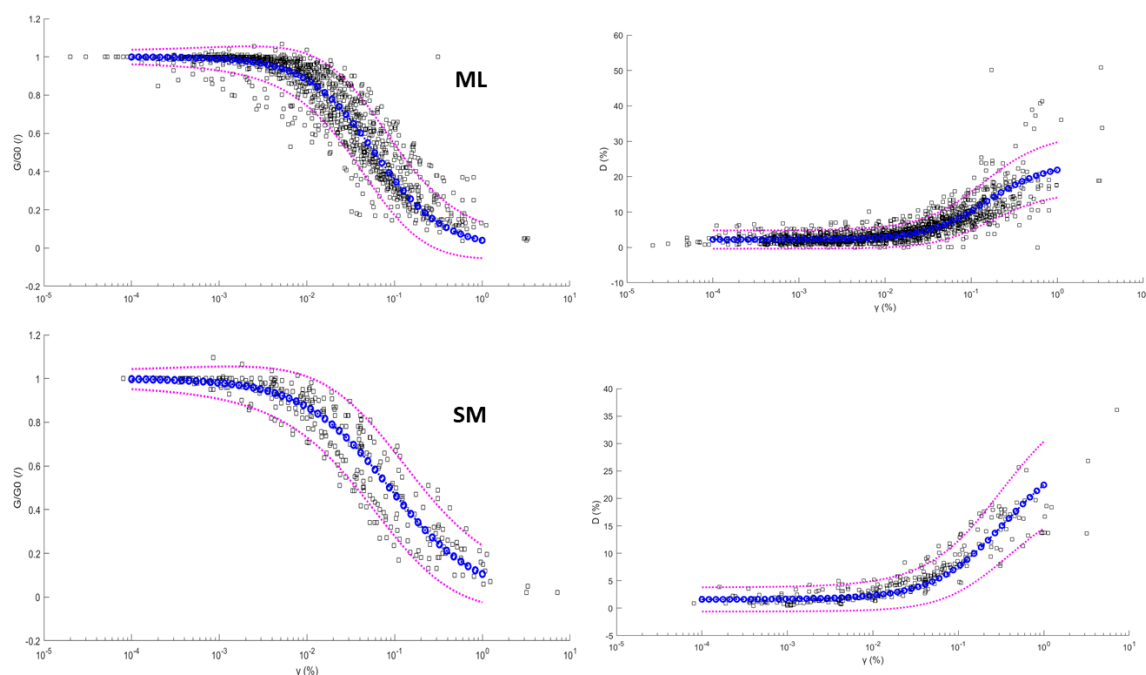


Figura 3-14 Curve sperimentali di decadimento del modulo di rigidezza al taglio (a sinistra) e di incremento del fattore di smorzamento con la deformazione (a destra) per le due unità gt ML e SM. In blu, sono riportate le curve relative all'andamento medio, regolarizzate utilizzando il modello di Yokota et al. (1981); in magenta i valori degli intervalli di confidenza al 95% (2s) utilizzando la formulazione di Darendeli (2001).

Vengono di seguito presentati i risultati dei primi confronti effettuati tra le curve sperimentali del dataset, con quelle proposte in letteratura. Il confronto con gli andamenti medi e i valori di σ_{\max} e σ_{\min} delle distribuzioni log-normali dei valori di $G(\gamma)/G_0$ e $D(\gamma)$, che è possibile utilizzare nel caso in cui si adotti la formulazione di Darendeli (2001) per descrivere la variabilità delle curve, sono riportati in Figura 3-15, Figura 3-16, Figura 3-17 e Figura 3-18. La variazione riportata per il modello di Darendeli (2001) è stata simulata per profondità di campionamento da 5 a 45 m dal p.c. (Figura 3-15, e Figura 3-17) e per profondità di campionamento da 5 a 100 m dal p.c. (Figura 3-16 e Figura 3-18). Il confronto con i fusi individuati da Darendeli (2001) al variare della profondità giustifica l'adozione di curve da studi di microzonazione sismica non dipendenti dalla profondità. In altre parole, la variabilità rappresentabile mettendo a sistema i dati degli studi di microzonazione sismica, comprende anche quella stimata da Darendeli (2001) per modellare il comportamento di argille, limi o sabbia con elevato contenuto di fini con la profondità.

In Figura 3-19 è riportato il confronto tra le leggi di variazione ricavate da Vucetic & Dobry (1991) per Indici di Plasticità compresi tra 0 e 30 % e le leggi di variazione che descrivono il campione di curve disponibili negli studi di microzonazione sismica relativamente al macrogruppo OL+OH.

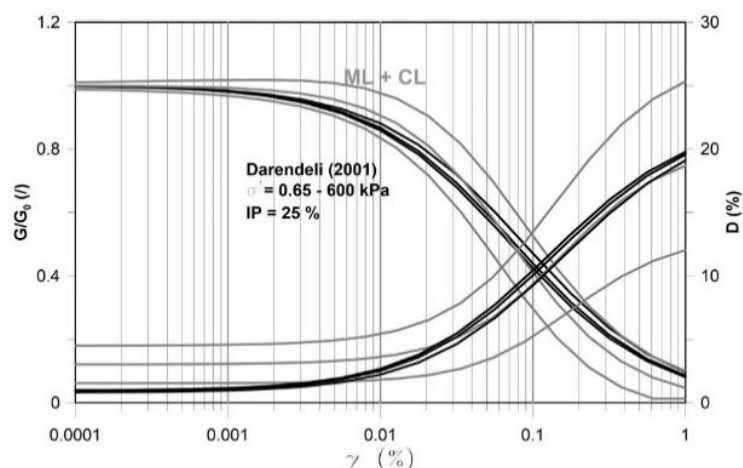


Figura 3-15 Curve $G(\gamma)/G_0$ e $D(\gamma)$ implementate nei modelli numerici per le simulazioni della risposta sismica locale relativamente alle aree urbanizzate ed urbanizzabili oggetto di questi studi per il macrogruppo "ML+CL". In grigio, è riportata la variazione ottenuta sulla base dell'analisi delle curve reperite negli studi di microzonazione sismica. In nero, è riportata la variazione ottenuta con il modello di Darendeli (2001), simulata per prof. di campionamento da 5 a 45m dal p.c.

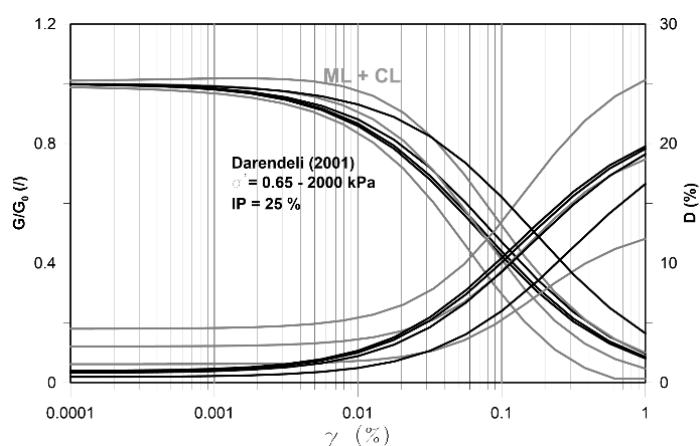


Figura 3-16 Curve $G(\gamma)/G_0$ e $D(\gamma)$ implementate nei modelli numerici per le simulazioni della risposta sismica locale relativamente alle aree urbanizzate ed urbanizzabili oggetto di questi studi per il macrogruppo "ML+CL". In grigio, è riportata la variazione ottenuta sulla base dell'analisi delle curve reperite negli studi di microzonazione sismica. In nero, è riportata la variazione ottenuta con il modello di Darendeli, simulata per prof. di campionamento da 5 a 100m dal p.c.

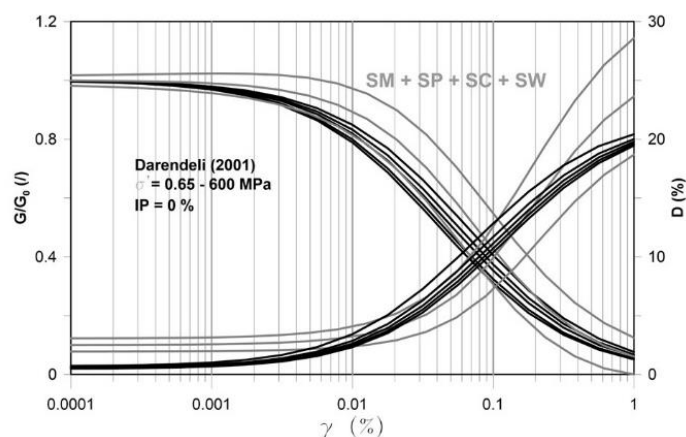


Figura 3-17 Curve $G(\gamma)/G_0$ e $D(\gamma)$ implementate nei modelli numerici per le simulazioni della risposta sismica locale relativamente alle aree urbanizzate ed urbanizzabili oggetto di questi studi per il macrogruppo "SM+SP+SC+SW". In grigio, è riportata la variazione ottenuta sulla base dell'analisi delle curve reperite negli studi di microzonazione sismica. In nero, è riportata la variazione ottenuta con il modello di Darendeli, simulata per prof. di campionamento da 5 a 45m dal p.c.

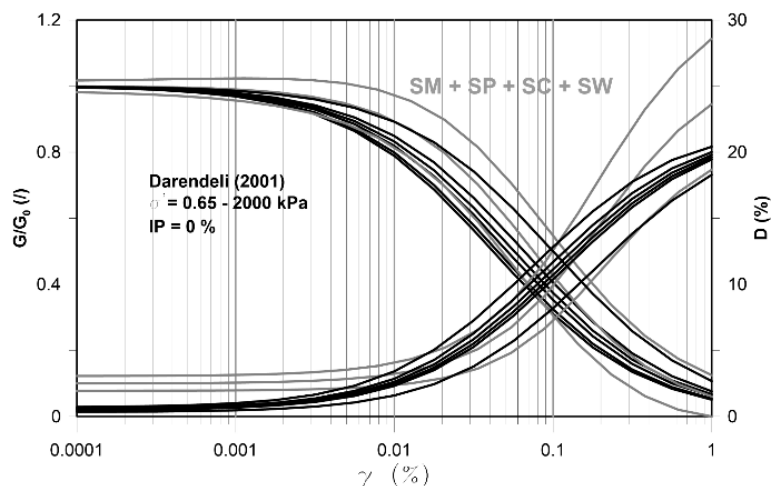


Figura 3-18 Curve $G(\gamma)/G_0$ e $D(\gamma)$ implementate nei modelli numerici per le simulazioni della risposta sismica locale relativamente alle aree urbanizzate ed urbanizzabili oggetto di questi studi per il macrogruppo "SM+SP+SC+SW". In grigio, è riportata la variazione ottenuta sulla base dell'analisi delle curve reperite negli studi di microzonazione sismica. In nero, è riportata la variazione ottenuta con il modello di Darendeli, simulata per prof. di campionamento da 5 a 100m dal p.c.

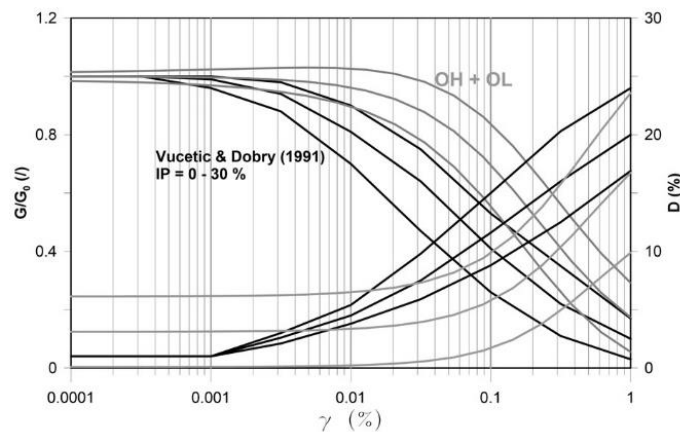


Figura 3-19 Curve $G(\gamma)/G_0$ e $D(\gamma)$ implementate nei modelli numerici per le simulazioni della risposta sismica locale relativamente alle aree urbanizzate ed urbanizzabili oggetto di questi studi per il macrogruppo "OH+OL".

4 Fase 3: elaborazione di statistiche tecniche aggiornate del parametro VS

4.1 Estrazione del parametro Vs

Una prima estrazione del parametro “Vs” dal DB-MS è stata effettuata considerando le due indagini geofisiche MASW e DH, le più diffuse in tutto il territorio nazionale, ottenendo un campione di circa 16'000 indagini, costituito per l'86% da MASW (13'645 indagini) e per il 14% da DH (2'150 indagini). È stato, quindi, estratto il parametro **Vs** al fine di calcolare il valore di Vs₃₀ per ogni punto di indagine (Figura 4-1).

I dati estratti sono stati convertiti in uno shapefile puntuale che consente di avere anche l'informazione sull'ubicazione spaziale dell'indagine. La parte sinistra della Figura 4-1 mostra la distribuzione delle due tipologie di indagini geofisiche estratte dal DB_MS. In particolare, risulta evidente come le regioni del nord-est, Lombardia, Veneto e Friuli-Venezia-Giulia siano coperte da un buon numero di indagini MASW, ma quasi sprovviste di indagini DH, così come anche la Calabria. Al contrario, il Molise e la Sicilia sono coperte quasi unicamente da indagini DH. Le Marche e l'Emilia-Romagna sono le regioni con il maggior numero di indagini MASW e DH.

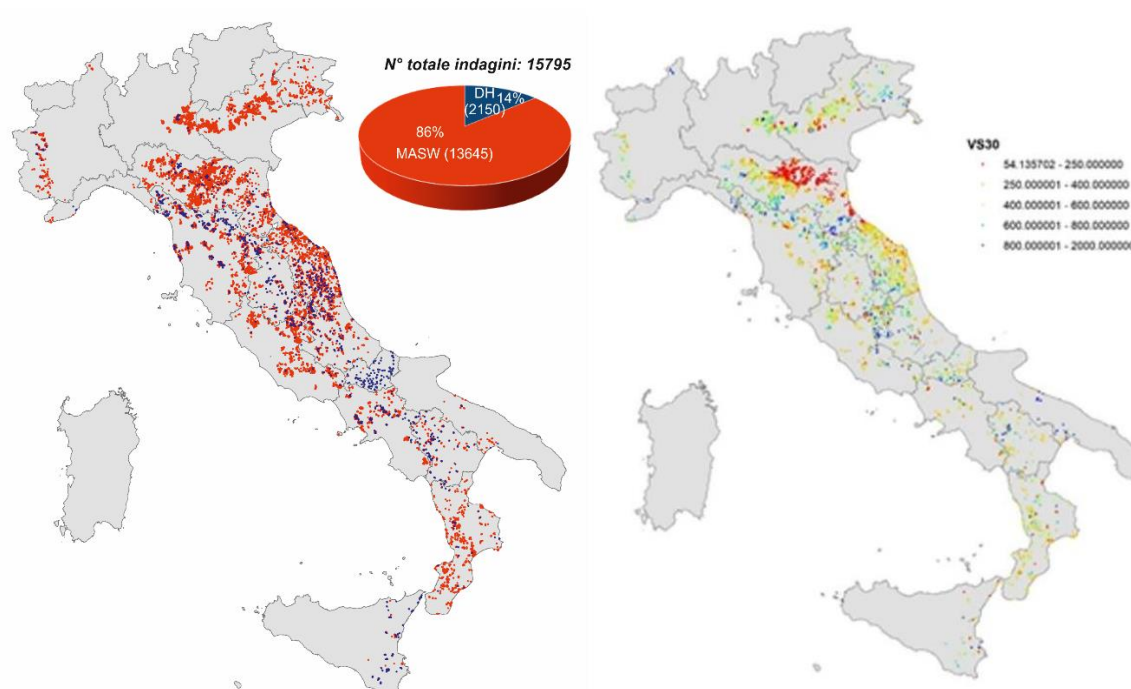


Figura 4-1 – a sinistra, ubicazione delle indagini geofisiche MASW e DH disponibili nel DB_MS; a destra, distribuzione in classi di variazione del parametro Vs₃₀ ricostruito per ogni indagine puntuale considerata.

4.2 Estrazione del parametro Vs in associazione al parametro L

Una seconda estrazione dal DB_MS è stata effettuata mediante l'associazione del parametro "Vs" al parametro descrittivo dell'unità geologico-tecnica "L" secondo i criteri descritti nel paragrafo 2.1, direttamente o indirettamente correlato alle indagini geofisiche puntuali e lineari. In questo caso sono state utilizzate tutte le indagini geofisiche disponibili ottenendo un campione di circa 3'500 indagini, di cui il 43% è costituito da DH (1'478 indagini), il 50% da MASW (1'741) e il restante 7% composto da indagini geofisiche lineari REMI e Sismica a rifrazione (Figura 4-2). Rispetto alla prima estrazione, risulta abbastanza evidente come diminuisca drasticamente il numero di indagini MASW, in quanto, in questo caso, vengono considerate solo quelle indagini per le quali, all'interno della stessa MOPS (Mappa delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica), è disponibile un'indagine geognostica alla distanza massima di 100 m dal baricentro dell'indagine geofisica.

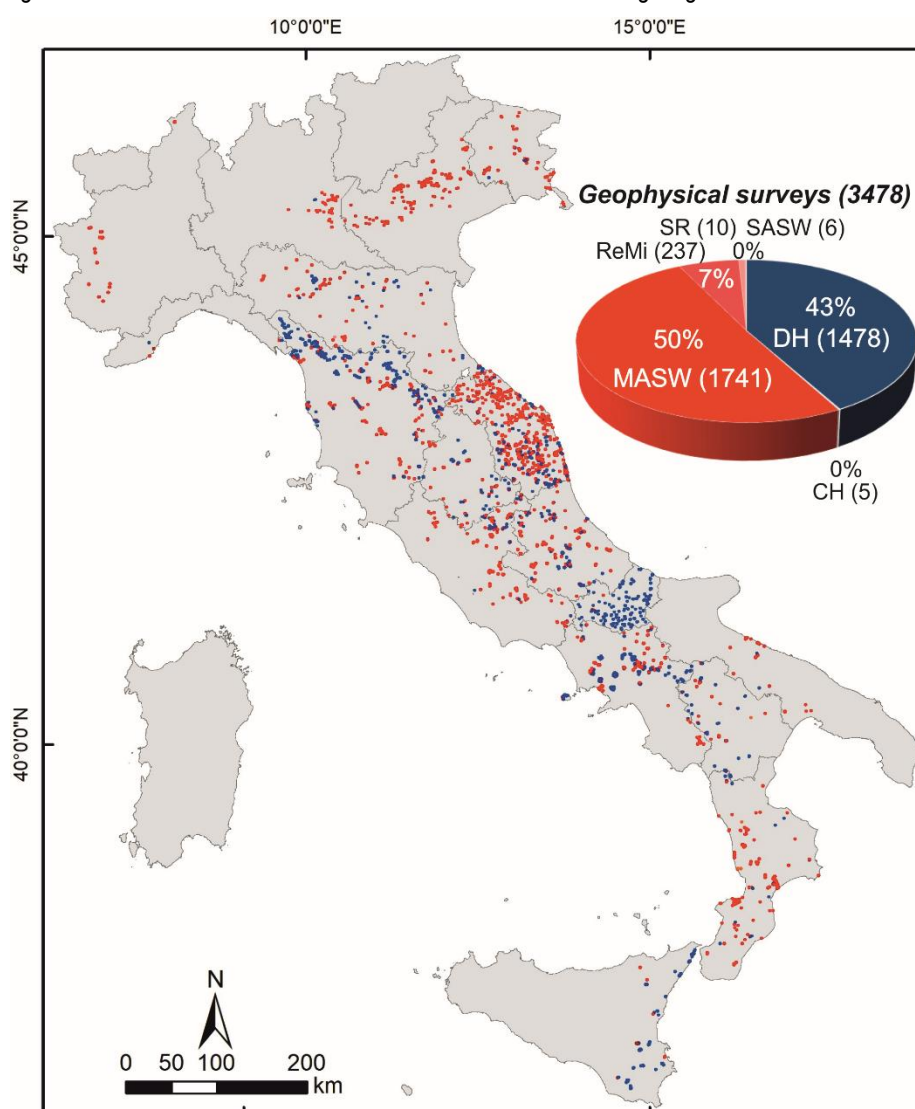


Figura 4-2 Ubicazione indagini geofisiche correlate al parametro "L" e diagramma a torta con le percentuali delle indagini geofisiche distinte per tipologia e correlate alle unità gt delle stratigrafie di sondaggio.

La distribuzione dei siti dove i profili verticali di Vs estratti da indagini geofisiche sono combinati con le unità geologico-tecniche dei sondaggi, copre in modo disomogeneo il territorio italiano (Figura 4-2). La densità dei dati è pressoché uniforme nell'Italia centrale, lungo la dorsale appenninica e lungo una fascia orientata E-O nell'Italia nord-orientale, mentre è distribuita in modo scarsamente irregolare altrove (Figura 4-2). Nelle regioni nord-orientali ci sono un buon numero di indagini MASW, ma le

indagini DH sono quasi assenti, così come nelle regioni a sud della penisola (Calabria). Al contrario, la Sicilia orientale e le aree dell'Appennino centrale sono principalmente coperte dalle indagini DH.

E' importante sottolineare che la densità dei dati campiona in modo soddisfacente le aree caratterizzate da tettonica attiva in diversi domini geologici dove la pericolosità sismica è maggiore. Infatti, il settore dell'Italia centrale è l'area con il maggior numero di indagini MASW e DH. Questa è una conseguenza dei numerosi studi di MS condotti a seguito della sequenza sismica 2016-2017 e del terremoto dell'Aquila del 2009.

I dati di Figura 4-2, relativi alla versione del DB_MS di ottobre 2020, sono in continuo aggiornamento con i risultati dei nuovi studi di MS validati, considerando che circa la metà di tali studi deve essere completato, si prevede che, alla conclusione degli studi pianificati, si avranno a disposizione almeno il doppio dei dati odierni con una distribuzione molto più omogenea su tutto il territorio nazionale.

La combinazione e associazione tra parametro "**Vs**" e parametro "**L**" è stata eseguita suddividendo le indagini geofisiche (puntuali e lineari) e geologiche (stratigrafie di sondaggi) per ogni metro di profondità. Per le indagini geofisiche lineari si considera il punto baricentro dell'indagine.

Partendo da un campione iniziale complessivo di circa 120'000 combinazioni "**Vs-L**" per ogni metro di profondità, sono stati scartati il 46% dei valori (circa 47'000) contenenti valori multipli (11%) e nulli (35%). Il restante 54% (70'589 combinazioni del parametro VS al parametro L) corrisponde al campione di partenza utilizzato per l'analisi statistica (Figura 4-3).

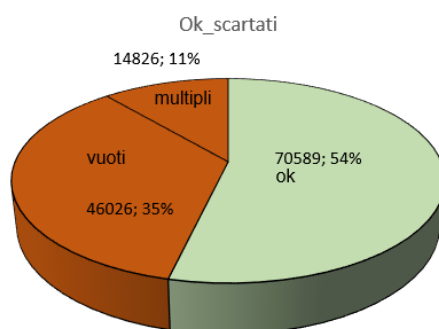


Figura 4-3 Diagramma a torta con riportate le percentuali ed i valori numerici relativi alle correlazioni VS_L per ogni metro di profondità: ok (in verde), indica una correlazione univoca Vs_L; multipli (in marrone), indica valori multipli per lo stesso metro di profondità di Vs e/o L, mentre vuoti (in marrone), indica che uno dei due valori Vs e/o L è vuoto.

4.2.1 Elaborazioni e analisi statistiche del parametro Vs associato al parametro L

I risultati delle analisi statistiche preliminari, descritte nelle precedenti versioni del documento, sono sintetizzati in una scheda riepilogativa per ciascuna unità geologico-tecnica (Figura 4-4) costituita in alto a sinistra da una tabella in cui, oltre al conteggio (numero di combinazioni "**Vs-L**" per ogni metro), sono riportati i valori di "**Vs**" (m/s) relativi ai parametri statistici: moda, media, deviazione standard, minimo, massimo, primo, secondo (mediana) e terzo quartile. Oltre all'ubicazione delle indagini che interessano l'unità gt nel territorio nazionale, rappresentata in basso a sinistra, i due diagrammi relativi al box plot e all'istogramma mostrano il primo la distribuzione e dispersione dei valori di "Vs", e il secondo la frequenza dei valori (Figura 4-4). Questi ultimi grafici documentano una chiara asimmetria: da una parte il box-plot con gli outliers tutti verso l'alto, dall'altra l'istogramma di frequenza asimmetrico con un fianco più ripido a sinistra e uno meno inclinato a destra. Tali configurazioni

asimmetriche derivano dal comportamento log-normale del parametro Vs. Difatti le stesse elaborazioni effettuate con il InVs mostrano una maggiore simmetria (Figura 4-4). Pertanto tutte le analisi statistiche sono state effettuate sul parametro InVs.

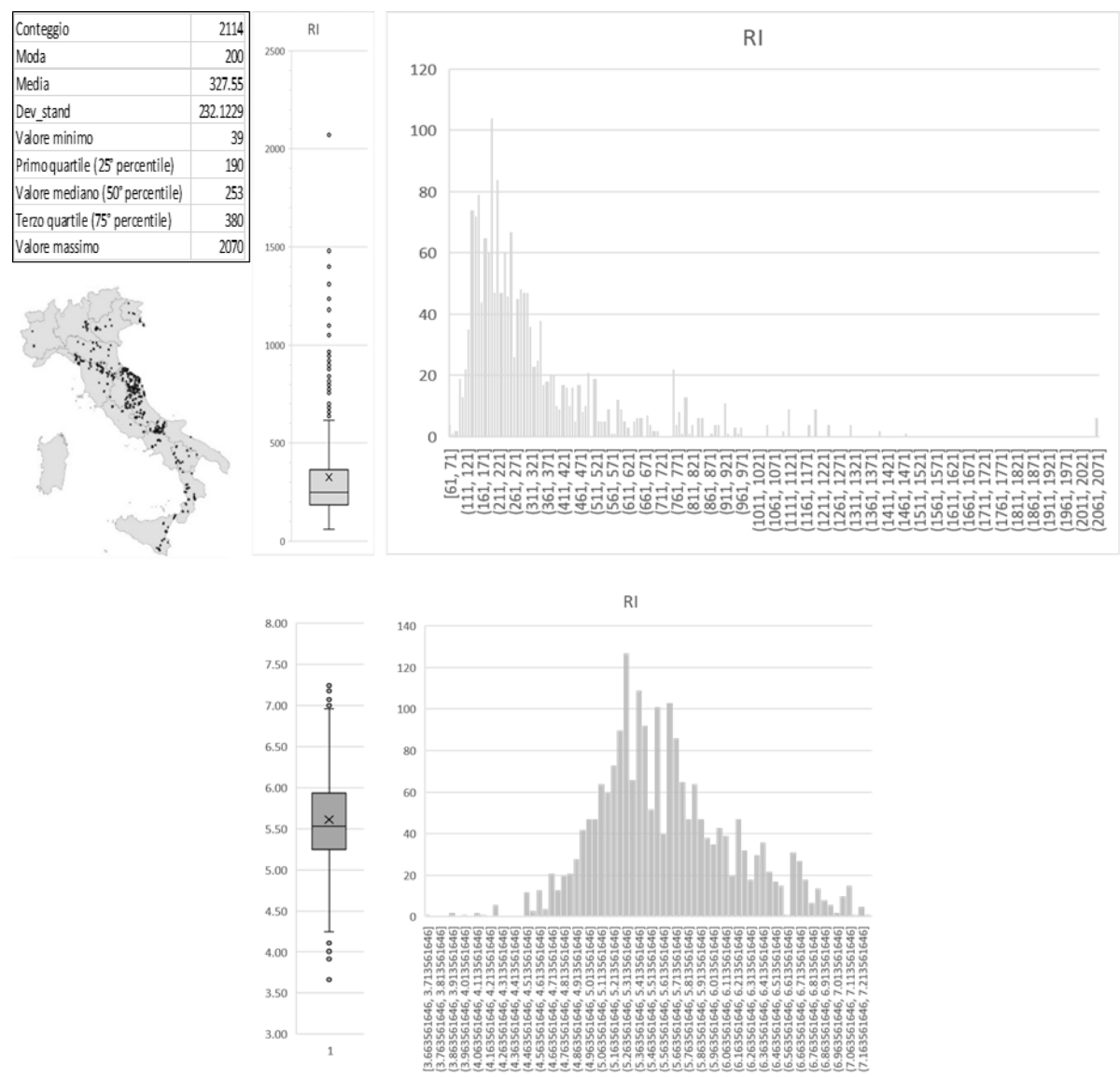


Figura 4-4 Scheda sintetica delle analisi statistiche relativa all'unità geologico-tecnica RI (terreni contenenti resti di attività antropica) relativi al parametro Vs in alto e InVs in basso.

A differenza delle analisi effettuate nelle precedenti versioni del documento, per ogni indagine geofisica tutti i record consecutivi di spessore di un metro aventi Vs costante e appartenenti alla stessa unità gt sono stati raggruppati in un unico record, considerando come riferimento la profondità media dell'intervallo. Questo perché, spesso, nelle indagini geofisiche si hanno valori costanti di Vs per pacchi di strati anche oltre i 10 appartenenti alla stessa unità gt. Tale scelta consente di evitare che il dato di Vs ripetuto n-volte per ogni metro lungo lo spessore dell'intervallo a velocità costante, influenzi la frequenza dei dati e quindi le relazioni statistiche della Vs con la profondità.

Di conseguenza i circa 70'000 record di combinazioni Vs-L, inizialmente estratti per ogni metro di profondità, si sono ridotti a circa 17'000 coppie Vs / L. Questo dataset è stato utilizzato per realizzare l'analisi statistica qui di seguito descritta, finalizzata a caratterizzare ciascuna unità gt in termini di valori di Vs rappresentativi in relazione alla profondità.

Considerando la suddivisione delle unità geologico-tecniche in terreni di copertura e substrato geologico (ICMS 2008), la cui classificazione è dettagliata negli Standard di rappresentazione e archiviazione informatica (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica 2020), vengono di seguito esposti i risultati delle analisi statistiche relative ad entrambe le categorie di unità gt.

Il campione rappresentativo dei terreni di copertura è costituito da circa 12'000 combinazioni (Figura 4-5) in cui i gruppi delle ghiaie (GX colore verde) delle sabbie (SX colore giallo) e dei limi-argille (CX colore marrone) rappresentano rispettivamente il 30%, il 24% e il 36,5% delle combinazioni "Vs-L". Combinazioni prossime al 9% interessano i terreni di riporto (RI), mentre all'1% le terre organiche (PT) e i litoidi di copertura (LC). L'unità geologico-tecnica prevalente è costituita dall'unità GM (17%) seguita da ML, CL e SM (16 e 14%).

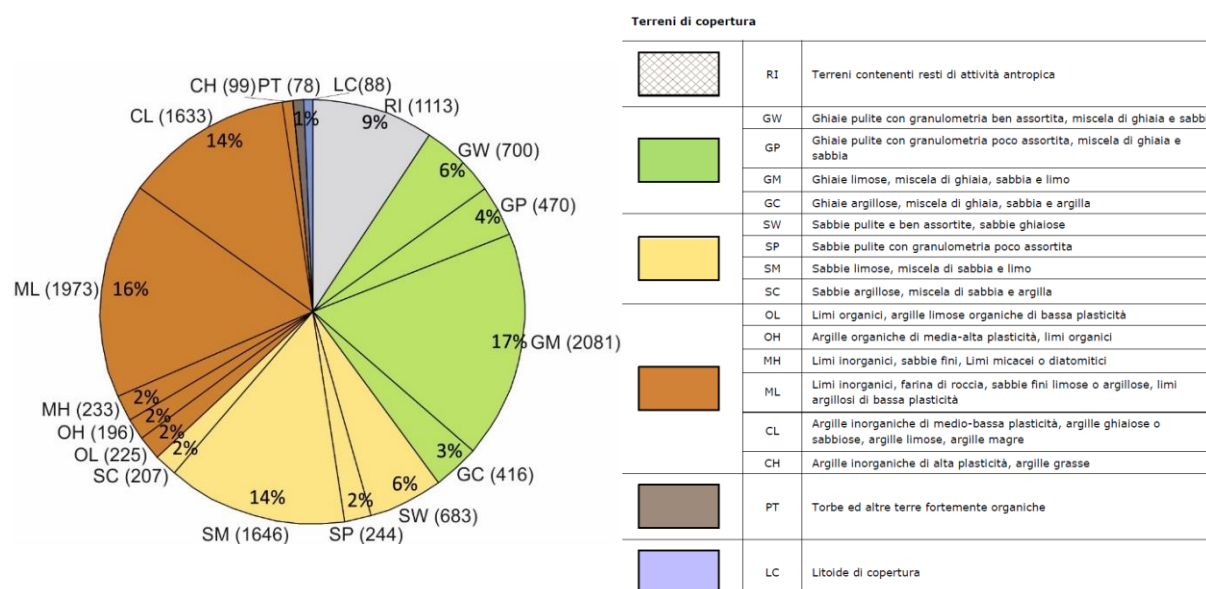


Figura 4-5 Classificazione delle unità geologico-tecniche (2020) e diagramma a torta mostrante le percentuali delle 12'000 combinazioni "Vs-L" per ciascuna unità geologico-tecnica dei terreni di copertura.

Il campione rappresentativo del substrato geologico consiste in circa 5'000 combinazioni (Figura 4-6). Il gruppo dominante è costituito dalle alternanze dei litotipi (AL colore blu scuro con il 48% delle combinazioni, seguito dal gruppo dei lapidei (LP colore celeste) con il 21% e con i gruppi dei coesivi sovraconsolidati (CO colore blu) e granulare cementato (GR colore azzurro), ciascuno con circa il 16% delle combinazioni. L'unità geologico-tecnica dominante è costituita dall'ALS (28%), seguita dall'unità AL (14%).

Considerando il comportamento log-normale del parametro Vs, al fine di poter confrontare la distribuzione e la dispersione dello stesso tra le varie classi di unità geologico-tecniche, sono stati utilizzati diagrammi box plot per "lnVs" confrontando i risultati con lo stesso diagramma relativo al parametro "Vs" elaborato metro per metro (Figura 4-7 per i terreni di copertura e Figura 4-8 per le unità del substrato geologico).

Substrato geologico		
LP	LP	Lapideo
GR	GR	Granulare cementato
CO	CO	Coesivo sovraconsolidato
AL	AL	Alternanza di litotipi
LPS	LPS	Lapideo, stratificato
GRS	GRS	Granulare cementato, stratificato
COS	COS	Coesivo sovraconsolidato, stratificato
ALS	ALS	Alternanza di litotipi, stratificato
SFLP	SFLP	Lapideo fratturato / alterato
SFGR	SFGR	Granulare cementato fratturato / alterato
SFCO	SFCO	Coesivo sovraconsolidato fratturato / alterato
SFAL	SFAL	Alternanza di litotipi fratturato / alterato
SFLPS	SFLPS	Lapideo, stratificato fratturato / alterato
SFGRS	SFGRS	Granulare cementato, stratificato fratturato / alterato
SFCOS	SFCOS	Coesivo sovraconsolidato, stratificato fratturato / alterato
SFALS	SFALS	Alternanza di litotipi, stratificato fratturato / alterato

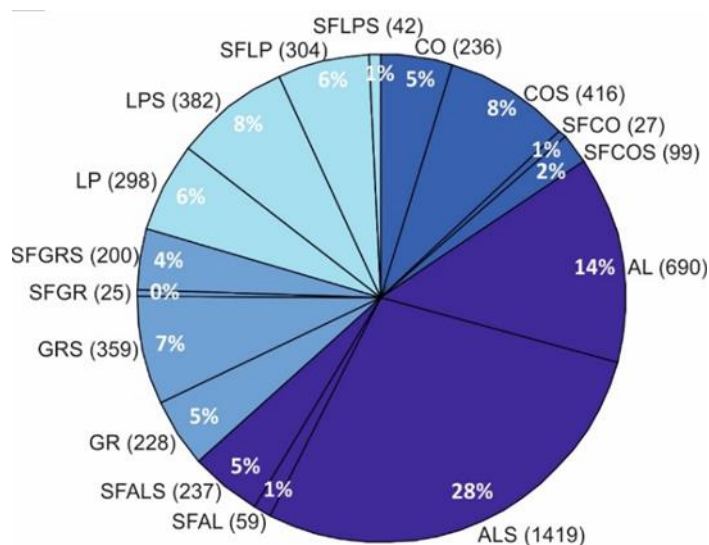


Figura 4-6 Classificazione delle unità geologico-tecniche (2020) e diagramma a torta mostrante le percentuali delle 5000 combinazioni "VS-L" per ciascuna unità geologico-tecnica del substrato geologico.

I due grafici di Figura 4-7 documentano le differenze tra le due tipologie di analisi statistiche effettuate per le stesse unità gt dei terreni di copertura: da una parte (box-plot a sinistra) i valori di "Vs" associati alle unità gt metro per metro; dall'altra i valori di "InVs" associati per profondità medie. Dalla loro analisi risulta abbastanza evidente la simmetria dei box-plot "InVs" dove i valori della mediana e della media sono quasi coincidenti a differenza di quelli del parametro "Vs", con la media sempre maggiore della mediana. Ovviamente in entrambi i casi gli andamenti della dispersione e distribuzione dei valori sono simili per le unità dei gruppi delle ghiaie (Gx), delle sabbie (Sx) e delle argille e limi (Cx) (Figura 4-7).

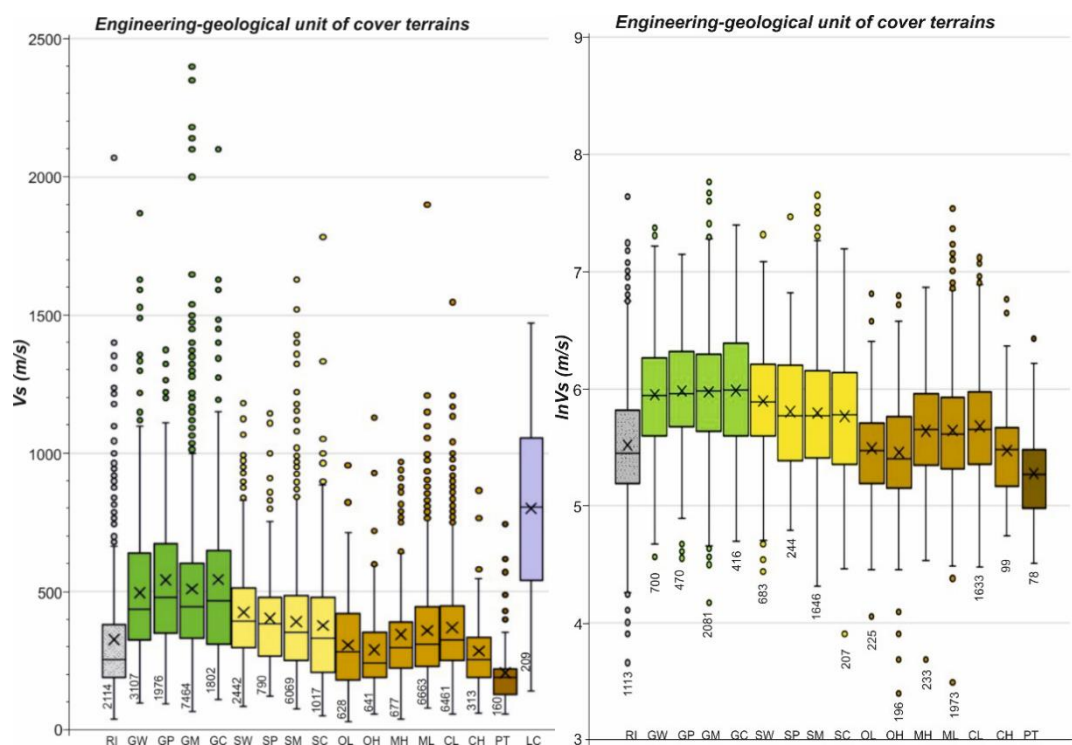


Figura 4-7 Diagrammi Box plot relativi ai valori di "Vs" metro per metro e "InVs" per unità geologico-tecnica dei terreni di copertura. Il numero si riferisce alle combinazioni "Vs-L" per ogni metro di profondità e "InVs-L" per profondità medie. Per ogni singolo box-plot la mediana è rappresentata dalla linea interna, la X rappresenta il valore medio e i pallini gli outliers.

Analogamente sono stati messi a confronto i due grafici box-plot relativi al parametro “Vs” e “lnVs” per le unità del substrato geologico (Figura 4-8). Anche in questo caso risultano evidenti le considerazioni sulla simmetria dei due parametri. In generale, i diagrammi box plot non mostrano particolari differenze tra le stesse unità stratificate e no, ad eccezione delle unità coesive sovraconsolidate, in cui l'unità stratificata (COS) ha valori più bassi rispetto a quella non stratificata (CO). Le unità fratturate e/o alterate mostrano invece sempre distribuzioni e dispersioni inferiori rispetto alle rispettive unità non fratturate e/o alterate, ad eccezione di SFCO, SFALS e SFLPS che hanno valori simili (Figura 4-8).

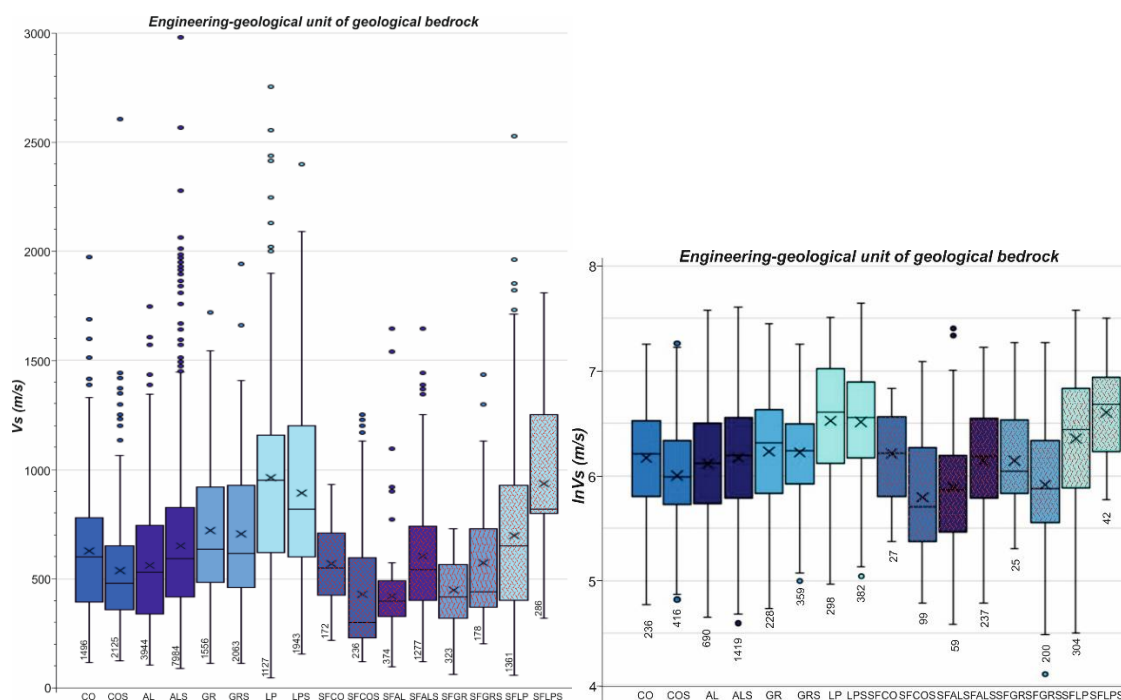


Figura 4-8 Diagrammi Box plot per unità geologico-tecnica del substrato geologico dei valori di “Vs” metro per metro e “lnVs”. Il numero si riferisce alle combinazioni “Vs-L” per ogni metro di profondità e “lnVs-L” per profondità medie. La mediana è rappresentata dalla linea interna, la X rappresenta il valore medio e i pallini gli outliers.

4.2.2 Variazione con la profondità del parametro Vs associato al parametro L

Al fine di evidenziare le variazioni dei valori di “lnVs” con la profondità, per ogni unità geologico-tecnica sono stati realizzati i diagrammi box plot suddivisi in tre intervalli di profondità (a, <10 m; b, 10 m ≤ profondità < 20 m; c, ≥ 20 m) sia per i terreni di copertura (Figura 4-9) che per il substrato geologico (Figura 4-10). In generale i box-plot relativi alla distribuzione e dispersione del “lnVs” evidenziano una tendenza all'aumento delle velocità (media, primo, secondo e terzo quartile) con la profondità per ciascuna unità geologico-tecnica.

Analizzando le dispersioni di **lnVs** nei terreni di copertura per ciascun intervallo di profondità, si può osservare una graduale diminuzione dei valori passando dalla ghiaia alle argille, suggerendo una dipendenza di Vs dalla granulometria delle unità geologico tecniche. I valori più alti di lnVs interessano le ghiaie (unità GW, GP, GM e GC) mentre i valori più bassi i suoli organici a grana fine (unità OL, OH e PT) (Figura 4-9). I depositi antropici (RI) sono caratterizzati da valori bassi a bassa

profondità, simili a quelli delle argille, e dai più alti Vs fino a profondità > 10 m dove, solitamente, prevalgono i materiali murari. La copertura litoide, come previsto, mostra i più alti valori di InVs dei terreni di copertura, simili a quelli del substrato geologico litoide. A differenza dei diagrammi dei terreni di copertura precedenti, l'andamento dei box-plot nei tre intervalli di profondità mostra andamenti simili per le unità granulari ghiaiose (G), e sabbiose (S), mentre le unità limose ML e MH si distinguono dal resto delle argille (C), mostrando nei tre intervalli box plot più simili al gruppo delle sabbie.

Nelle unità geologiche del substrato i valori più elevati di InVs caratterizzano rispettivamente le rocce cementate lapidee e granulari. Valori più bassi riguardano le alternanze di litotipi e le unità coesive sovraconsolidate. Per le diverse profondità, differenze trascurabili, nelle variazioni di range di InVs, riguardano le unità stratificate e non stratificate, ad eccezione delle unità coesive sovraconsolidate (CO e COS) dove le differenze sono marcate in quanto quelle stratificate mostrano velocità minori. Le unità fratturate e/o alterate hanno generalmente valori di inferiori rispetto agli stessi litotipi non alterati ad eccezione di SFALS e di SFLPS che soprattutto a profondità >10 m mostrano valori addirittura più elevati (Figura 4-10).

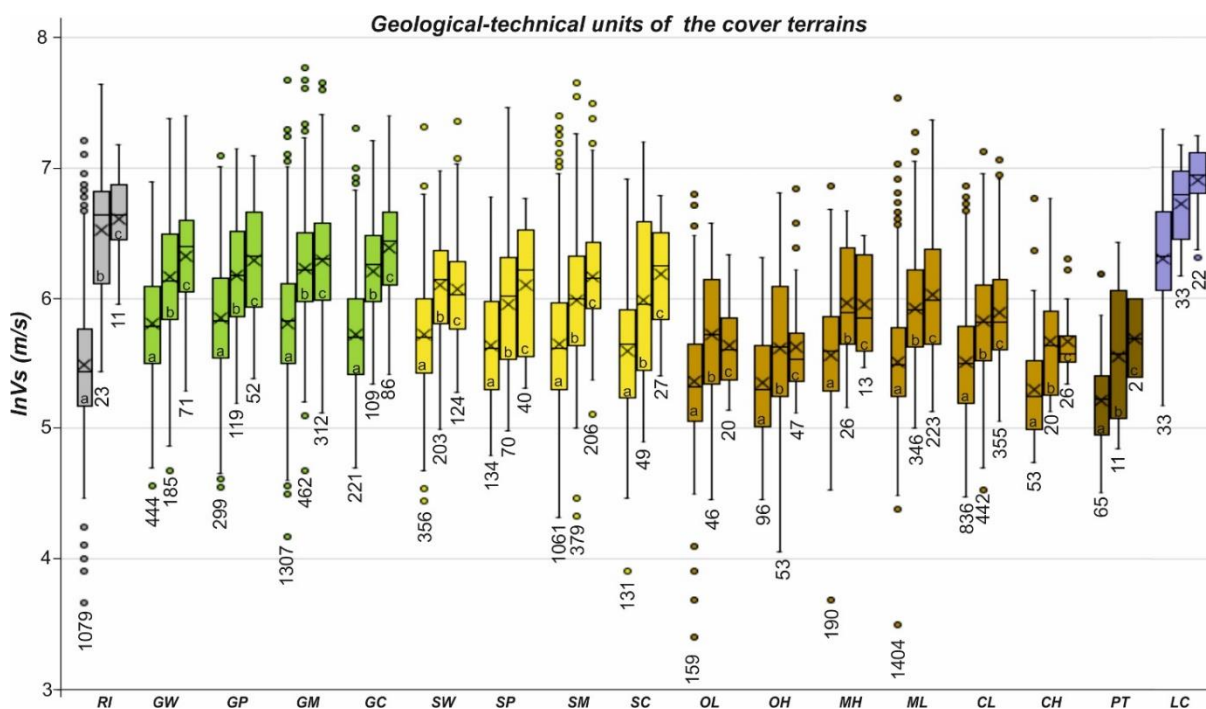


Figura 4-9 Diagrammi Box plot dei valori di "InVs" per unità geologico-tecnica relativa ai terreni di copertura, che sono stati suddivisi in tre intervalli di profondità: a) profondità < 10 m; b) 10 m ≤ profondità < 20 m; c) profondità ≥ 20 m. Per ogni box plot, il numero si riferisce alle combinazioni "InVs-L" per profondità media, la mediana è rappresentata dalla linea interna, la X rappresenta il valore medio e i pallini gli outliers.

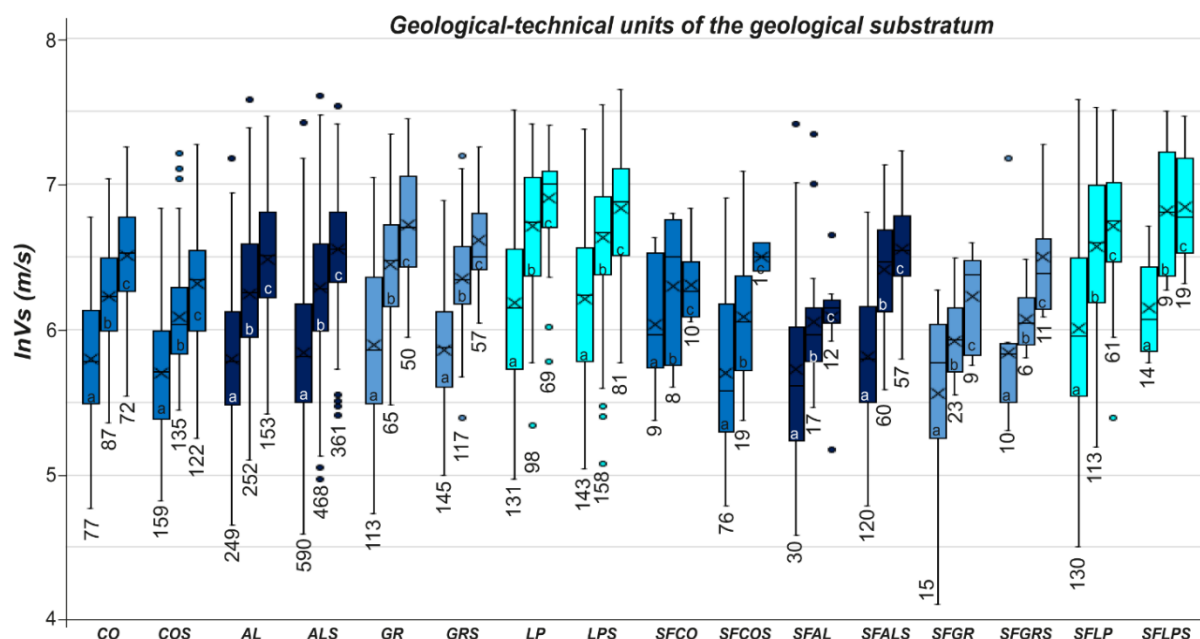


Figura 4-10 Diagrammi Box plot dei valori di "lnVs" per unità geologico-tecnica del substrato geologico, che sono stati suddivisi in tre intervalli di profondità: a) profondità < 10 m; b) $10 \text{ m} \leq \text{profondità} < 20 \text{ m}$; c) profondità $\geq 20 \text{ m}$. Per ogni box plot, il numero si riferisce alle combinazioni "lnVs-L" per profondità media, la mediana è rappresentata dalla linea interna, la X rappresenta il valore medio e i pallini gli outliers.

Per valutare la variazione del parametro lnVs con la profondità per ciascuna unità geologico-tecnica è stato realizzato un diagramma lnVs - ln profondità (es delle unità CL in Figura 4-11). Per ogni diagramma è possibile osservare la dispersione dei valori e valutare tramite la linea di tendenza (regressione) l'andamento medio della Vs con la profondità.

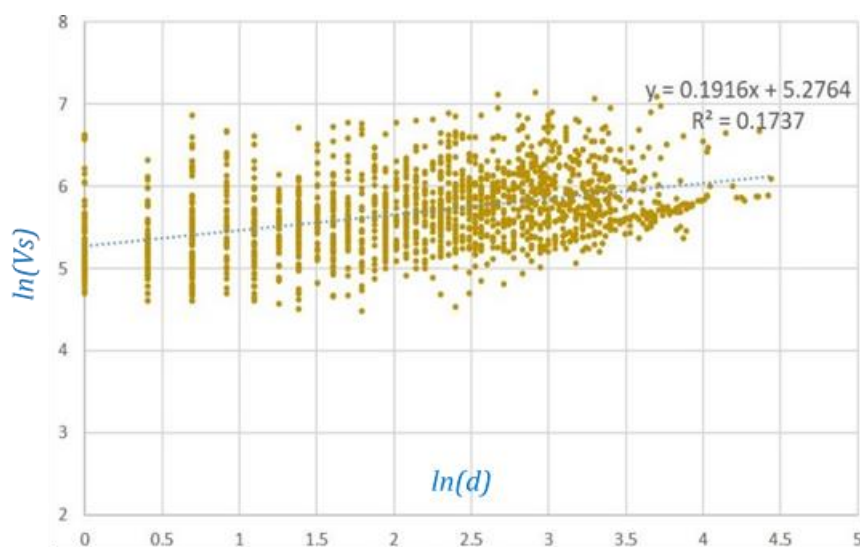


Figura 4-11 Diagramma lnVs-ln della profondità per l'unità geologico-tecnica CL e rispettiva linea di tendenza (analisi di regressione).

L'equazione della regressione lineare ricostruita rappresenta una modalità per descrivere la dipendenza del parametro Vs con la profondità. Considerando nuovamente il lnVs e il ln della profondità si ha:

$$\ln(Vs) = b + a \ln(d) \quad [1]$$

dove V_s è la velocità delle onde s in m/sec, d è la profondità data da $d=h+1$ in m, a e b sono parametri empirici dedotti dalla regressione per ogni unità gt (Figura 4-11 e Tab. 4.1). In particolare b rappresenta l'intercetta, ovvero il $\ln V_s$ a un metro di profondità, mentre a (coefficiente angolare) rappresenta il gradiente of $V_s(h)$.

L'analisi della regressione è stata effettuata per ciascuna unità geologico-tecnica.

I risultati sono schematizzati nella Tabella 4-1, dove, per ciascuna unità dei terreni di copertura e del substrato geologico, sono riportati i valori del coefficiente b ($\ln V_s$ a 1 m di profondità), a (gradiente $V_s(h)$), Δb e Δa rispettivamente rappresentano l'intervallo di confidenza al 95%, σ è la deviazione standard dei residui (in unità di $\ln V_s$) e R^2 è il coefficiente di determinazione e $Max\ depth$ è la massima profondità per il quale si hanno dati di V_s per ciascuna unità.

Cover terrains unit	b	a	Δb	Δa	σ	R^2	Max Depth (m)	Geological bedrock unit	b	a	Δb	Δa	σ	R^2	Max Depth (m)
RI	5.365	0.300	0.036	0.041	0.486	0.154	43.5	LP	5.607	0.408	0.139	0.057	0.465	0.400	65
GW	5.395	0.292	0.074	0.036	0.418	0.271	61.5	LPS	5.624	0.377	0.142	0.057	0.445	0.306	53.5
GP	5.412	0.296	0.088	0.042	0.399	0.292	55.5	SFLP	5.410	0.412	0.168	0.069	0.520	0.315	47.5
GM	5.413	0.290	0.042	0.019	0.419	0.291	56.5	SFLPS	5.528	0.402	0.425	0.153	0.381	0.414	38
GC	5.373	0.304	0.085	0.037	0.408	0.384	72.5	GR	5.265	0.433	0.133	0.055	0.395	0.516	81
SW	5.325	0.261	0.086	0.037	0.416	0.223	53.5	GRS	5.200	0.430	0.100	0.040	0.311	0.558	54
SP	5.288	0.253	0.137	0.061	0.454	0.217	33.5	AL	5.203	0.392	0.098	0.040	0.437	0.353	59
SM	5.287	0.267	0.049	0.023	0.465	0.239	124	ALS	5.195	0.411	0.070	0.028	0.431	0.368	106
SC	5.229	0.278	0.155	0.072	0.514	0.222	58	CO	5.170	0.399	0.174	0.067	0.388	0.372	47
MH	5.279	0.248	0.106	0.061	0.434	0.215	45	SFALS	5.241	0.413	0.114	0.048	0.341	0.547	52.5
ML	5.220	0.254	0.035	0.018	0.401	0.278	54.5	COS	5.079	0.376	0.126	0.049	0.385	0.355	58
OL	5.206	0.166	0.115	0.061	0.512	0.113	42.5	SFAL	5.212	0.310	0.368	0.155	0.524	0.218	29.5
OH	5.235	0.121	0.139	0.058	0.437	0.080	50	SFGR	5.388	0.326	0.481	0.193	0.426	0.348	33
CL	5.276	0.192	0.048	0.020	0.426	0.174	85	SFGRS	5.171	0.360	0.154	0.069	0.424	0.348	48.5
CH	5.069	0.193	0.160	0.068	0.372	0.249	43.5	SFCO	5.626	0.226	0.644	0.241	0.387	0.129	48.5
PT	5.212	0.067	0.119	0.080	0.396	0.035	22	SFCOS	5.160	0.374	0.219	0.118	0.453	0.290	32
LC	5.684	0.382	0.295	0.117	0.391	0.329	43.5								

Tabella 4-1 Coefficienti di regressione per ogni unità gt dei terreni di copertura e del substrato geologico relativi all'equazione [1]: a (coefficiente angolare), b (intercetta), Δb e Δa rappresentano l'intervallo di confidenza al 95% di b e a ; σ è la deviazione standard dei residui (in unità di $\ln V_s$), R^2 il coefficiente di determinazione e $Max\ depth$ è la massima profondità per il quale si hanno dati di V_s per ciascuna unità gt.

Considerando l'equazione [1], per ottenere la velocità media a una determinata profondità per ogni unità gt, argomento del \ln , basta elevare il numero costante "e" alla potenza del secondo membro dell'equazione [1] sostituendo i coefficienti a e b riportati nella Tabella 4-1 per ciascuna unità gt:

$$y = e^{(m \ln x + q)}$$

$$(V_s) = e^{(b + a \ln(d))}$$

[2]

Proiettando per le profondità comprese tra 1 e 60 m i valori di V_s ottenuti dall'equazione [2] è possibile ottenere le varie curve di tendenza espresse per ciascuna unità gt dei terreni di copertura (Figura 4-12) e del substrato geologico (Figura 4-13).

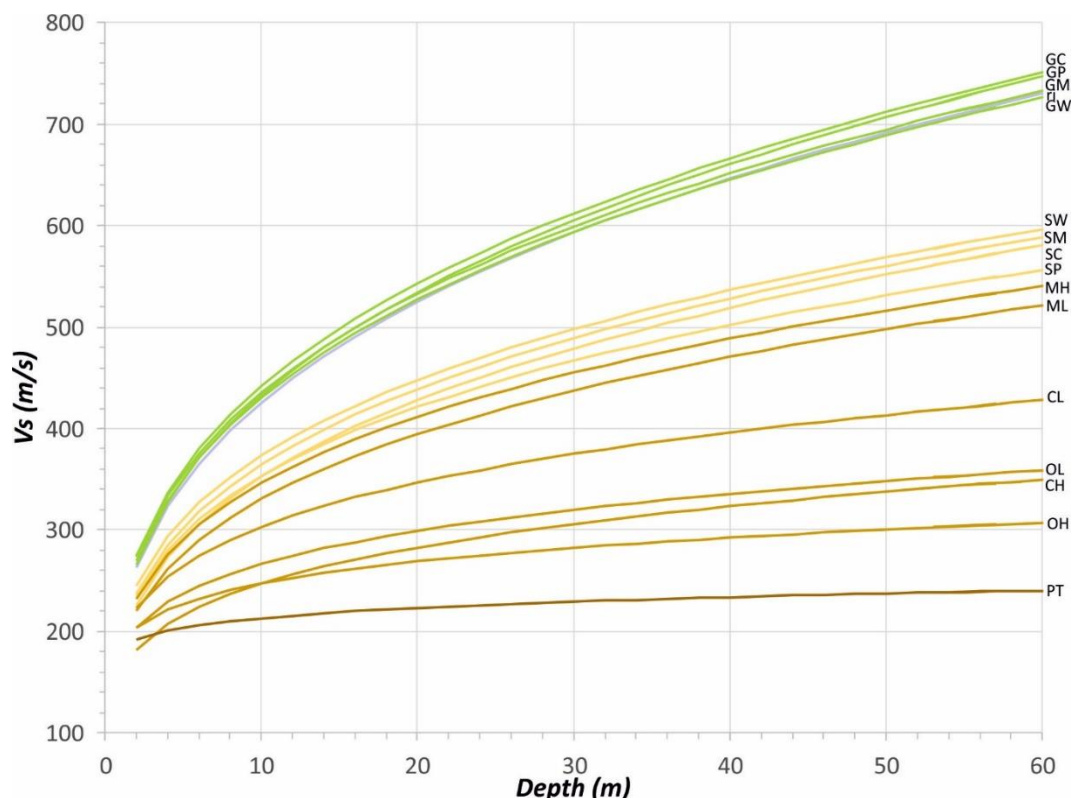


Figura 4-12 Curve di tendenza (legge a potenza) per ciascuna unità geologico-tecnica dei terreni di copertura ottenute dall'equazione [2] applicando i coefficienti di regressione a e b di Tab 4-1.

Analogamente, le curve di tendenza ricostruite per le unità gt dei terreni di copertura forniscono importanti indicazioni sull'andamento medio della Vs con la profondità:

- per nessuna delle unità gt dei terreni di copertura viene raggiunta la velocità del bedrock ingegneristico (800 m/s) nei primi 60 m di profondità;
- le curve delle unità gt delle ghiaie (GW, GP, GM e GC) mostrano le velocità maggiori, con un andamento molto simile. Anche l'unità gt del riporto antropico (Ri) ha un andamento simile alle ghiaie;
- le curve delle unità sabbiose (SW, SP, SM e SC) hanno velocità più basse rispetto a quelle ghiaiose, ma con un andamento simile;
- le curve delle unità limose MH e ML hanno velocità poco inferiori, con andamento molto simile a quelle sabbiose;
- la curva dell'unità argillosa CL a basse profondità (< 5 m) mostra un andamento simile alle curve dei limi, mentre, per profondità maggiori, il suo andamento si discosta notevolmente verso valori di velocità più bassi con la profondità;
- le unità argillose organiche OL e OH e l'unità argillosa di alta plasticità CH mostrano curve similari, ma con valori di velocità più bassi rispetto alle precedenti;
- infine la curva delle terre fortemente organiche PT mostra un andamento quasi piatto indicando velocità più o meno costanti con la profondità.

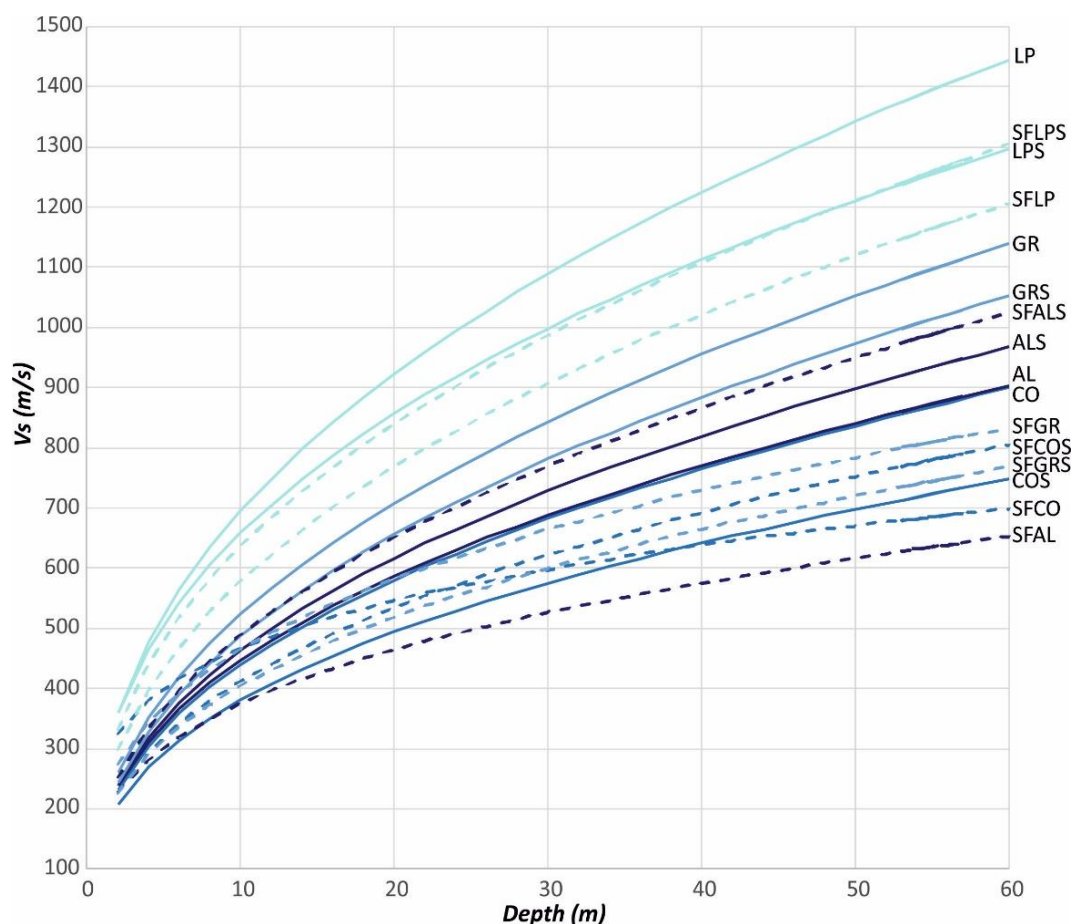


Figura 4-13 Curve di tendenza (legge a potenza) per ciascuna unità geologico-tecnica del substrato geologico ottenute dall'equazione [2] applicando i coefficienti di regressione a e b di Tab 4-1.

Per le unità gt del substrato geologico, le curve di tendenza ricostruite forniscono le seguenti indicazioni sull'andamento medio della Vs con la profondità:

- per nessuna delle unità gt del substrato geologico le velocità medie raggiungono quella del bedrock ingegneristico (800 m/s) nei primi 10 m di profondità;
- le curve delle unità gt dei lapidei (LP, LPS, SFLP e SFLPS) sono quelle che mostrano le velocità maggiori, raggiungendo gli 800 m/s tra 15 e 22 m di profondità. LP è l'unità caratterizzata da velocità maggiori con un aumento da 350 m/s, in superficie a 700 m/s a 10 m di profondità;
- le curve dei granulari cementati e dell'alternanza dei litotipi, con o senza stratificazione (GR, GRS, AL e ALS) assieme all'unità alterata dell'alternanza dei litotipi stratificata (SFALS) e a quella dei coesivi sovraconsolidati (CO) hanno velocità più basse rispetto ai lapidei, ma elevate rispetto alle altre unità alterate e ai coesivi sovraconsolidati stratificati (SFGR, SFCOS, SFGRS, SFCO, SFAL, COS);
- quest'ultimo gruppo di unità raggiunge il bedrock sismico oltre i 50 m di profondità.

Al fine di confrontare i profili di Vs relativi alle unità gt considerate, è stato costruito un grafico proiettando i coefficienti di regressione dell'eq.[1] sia per i terreni di copertura (Figura 4-14a) che per il substrato roccioso geologico (Figura 4-14b).

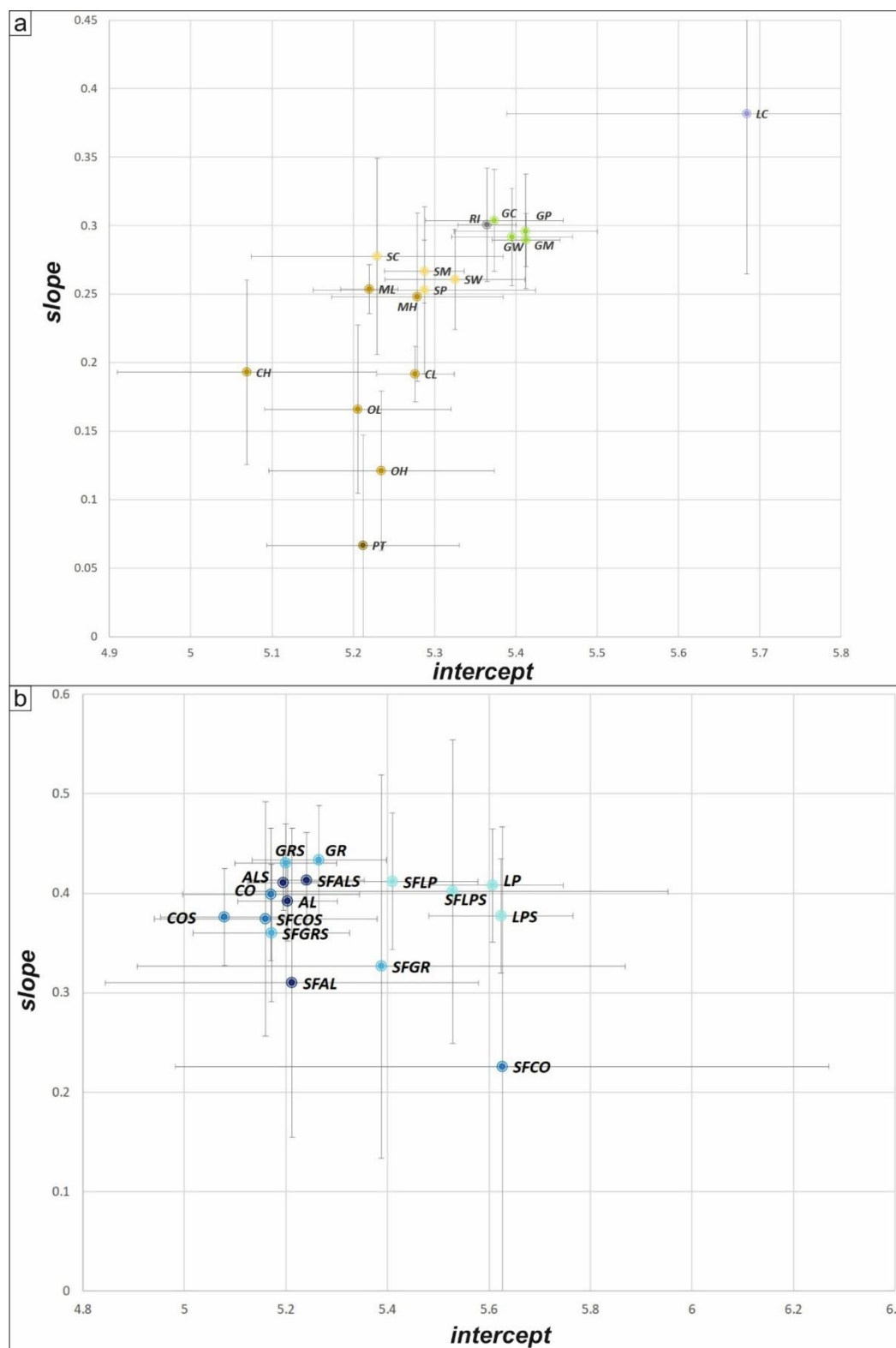


Figura 4-14 Proiezione dei coefficienti di regressione (**a**: coefficiente angolare – slope; **b**: intercetta – intercept) dell'eq.[1] per ogni unità gt di Tabella 4-1, per i terreni di copertura a), e per il substrato geologico b). Le barre di errore verticale e orizzontale rappresentano gli intervalli di confidenza al 95% dei coefficienti empirici.

Nelle unità dei terreni di copertura, i valori dell'intercetta permettono di ricavare le Vs in superficie ($h = 1\text{m}$): queste sono comprese tra 210 e 220 m/s per i depositi antropici e le unità delle ghiaie (RI, GW, GP, GM e GC, Tabella 4-1; Figura 4-14a), tra 185 e 205 m/s per le unità sabbiose e limose (unità SW, SP, SM e SC, ML e MH, Tabella 4-1; Figura 4-14a), tra 185 e 200 m/s per le argille (unità CL, OH, OL, PT, Tabella 4-1; Figura 4-14a) ad eccezione dell'argilla ad elevata plasticità (unità CH) con il valore più basso di 160 m/s (Tabella 4-1; Figura 4-14a). Ciò implica che in prossimità della superficie le unità ghiaiose siano caratterizzate da valori di Vs più elevati rispetto a quelle sabbiose e argillose. La copertura litoide (LC) mostra Vs di 280 m/s, in superficie.

Nelle unità del substrato geologico, i valori più alti del coefficiente di regressione b sono compresi tra 220 e 280 m/s riguardanti le unità lapidee (LP, LPS, SFLPS, SFLP; Tabella 4-1; Figura 4-14b) e le due unità SFCO e SFGR (Tabella 4-1; Figura 4-14b). Tutte le restanti unità mostrano valori tra 175 e 190 m/s, ad eccezione dell'unità COS caratterizzata da valori molto bassi (160 m/s), analogamente a quella dell'unità CH del terreno di copertura (Tabella 4-1; Figura 4-14b).

Nei terreni di copertura, i valori del coefficiente angolare a sono compresi in un ampio intervallo tra 0,3 e 0,07. I valori di pendenza risultano simili per le ghiaie (unità GW, GP, GM e GC, Tabella 4-1; Figura 4-14a) e per i depositi antropici (unità RI, Tabella 4-1; Figura 4-14a) nell'intervallo compreso tra 0,29 e 0,30; per le sabbie (SW, SP, SM e SC, Tabella 4-1; Figura 4-14a) e per i limi (unità ML e MH, Tabella 4-1; Figura 4-14a) nell'intervallo compreso tra 0,25 e 0,28; per le argille inorganiche con valore di 0,19 (unità CL e CH, Tabella 4-1; Figura 4-14a) e per le argille organiche nell'intervallo compreso tra 0,12 e 0,17 (unità OH e OL, Tabella 4-1; Figura 4-14a). Le argille altamente organiche (PT) sono caratterizzate da un valore di pendenza quasi nullo, mentre quello della copertura litoide è 0,38 (Tabella 4-1; Figura 4-14a). Rappresentando una misura di quanto il parametro Vs aumenta con la profondità, il coefficiente di pendenza descrive il gradiente di velocità dell'onda di taglio con la profondità di ciascuna unità gt, a partire dalla superficie del suolo fino a circa una profondità massima di circa 60 m, oltre la quale sono disponibili solo pochi dati (Tabella 4-1; Figura 4-12). I risultati statistici documentano chiaramente un gradiente Vs più elevato nelle ghiaie rispetto a quelli relativi a sabbie, argille inorganiche e organiche, rispettivamente (Tabella 4-1; Figura 4-14a). I valori Vs sono quasi costanti con la profondità per l'unità PT (Tabella 4-1; Figura 4-14a). In generale, la pendenza più alta interessa il gruppo delle ghiaie, mentre quelle inferiori riguardano i gruppi delle argille. Ciò implica una dipendenza dei due parametri dalle dimensioni granulometriche delle unità dei terreni di copertura.

Nelle unità del substrato geologico, i gradienti sono compresi tra 0,31 e 0,43 (Tabella 4-1; Figura 4-14b), in un intervallo molto breve, tranne l'unità SFCO che è caratterizzata dal valore più basso (0,23; Tabella 4-1; Figura 4-14b), simile ai valori delle unità gt-argillose delle coperture. Questa unità è affetta da un'ampia barra di errore, probabilmente correlata alla piccola dimensione del campione preso in esame, come documentato di seguito. I valori di pendenza inferiori ($<0,38$) includono quasi tutte le unità alterate e/o fratturate (SFAL, SFGR, SFGRS, SFCOS e SFCO; Tabella 4-1; Figura 4-14b).

In generale, un aumento della disgregazione (weathering) e/o della fratturazione di un'unità geologica di substrato produce una diminuzione dei valori di Vs, mentre la stratificazione non mostra una chiara influenza sulla variazione di Vs con la profondità.

4.2.3 Analisi dei cluster finalizzata al raggruppamento di unità gt

Nonostante la sovrapposizione dei rispettivi intervalli di confidenza, sia per i terreni di copertura che per le unità del substrato geologico, possono essere individuati dei cluster tra i profili di Vs (Figura 4-14). Per esplorare questa possibilità, tra i vari punti proiettati sulla base dei valori a e b , è stata definita una distanza standardizzata R , nella forma:

$$R_{ij} = \sqrt{\left(\frac{a_i - a_j}{\Delta a_{ij}}\right)^2 + \left(\frac{b_i - b_j}{\Delta b_{ij}}\right)^2} \quad [3]$$

Dove

$$\Delta a_{ij} = \sqrt{(\Delta a_i)^2 + (\Delta a_j)^2} \quad \Delta b_{ij} = \sqrt{(\Delta b_i)^2 + (\Delta b_j)^2}$$

e a , b , Δa e Δb sono i coefficienti di regressione riportati in Tabella 4-1 per ogni unità gt.

L'analisi dei cluster è stata effettuata partendo dal raggruppamento delle coppie di punti aventi distanza minima. Ripetendo questa procedura, i cluster sono definiti in modo tale che la distanza degli elementi inclusi nello stesso cluster sia inferiore a quella tra il baricentro relativo al cluster con quello del cluster più vicino.

Per quanto riguarda i terreni di copertura, si possono identificare tre gruppi di unità gt principali: il gruppo ghiaia "G", che comprende le seguenti unità: GW, GM, GP, GC e RI; quello delle sabbie e limi gruppo "S" che raggruppa le unità SW, SC, SM, SP, MH e ML; e il gruppo delle argille "C", che raggruppa le unità CH, CL, OL OH e PT.

Per il substrato geologico sono stati identificati tre gruppi di unità gt principali: il gruppo "L" che include le unità lapidee LP, LPS, SFLP e SFLPS; il gruppo "V", comprendente varie unità gt GR, GRS, ALS, AL, SFALS, CO; e il gruppo "W" che include COS e le restanti unità alterate e/o fratturate SFGR, SFGRS, SFAL, SFCO.

Le principali caratteristiche statistiche relative a ciascun gruppo di unità gt dei terreni di copertura e del substrato geologico sono rappresentate nella Tabella 4-2 e nella Figura 4-15.

Cover terrains unit	b	a	Δb	Δa	σ	R^2	Max Depth (m)	Geological bedrock unit	b	a	Δb	Δa	σ	R^2	Max Depth (m)
G	5.382	0.301	0.022	0.012	0.433	0.354	72.5	L	5.549	0.398	0.085	0.034	0.477	0.336	65
S	5.249	0.267	0.026	0.012	0.436	0.264	124	V	5.209	0.407	0.043	0.017	0.411	0.401	86
C	5.242	0.187	0.039	0.017	0.441	0.168	54.5	W	5.138	0.358	0.093	0.038	0.410	0.338	48.5

Tabella 4-2 Coefficienti di regressione per i tre gruppi di unità gt definiti nell'analisi cluster e relativi all'equazione [1]: a (coefficiente angolare), b (intercetta), Δb e Δa , intervallo di confidenza al 95% di b e a , rispettivamente; σ , deviazione standard dei residui (in unità di $\ln V_s$), R^2 , coefficiente di determinazione, Max depth, è la massima profondità.

I valori di V_s in superficie espressi dall'intercetta sono molto simili tra i tre gruppi di terreni di copertura (Tabella 4-2 e Figura 4-15) considerando che la V_s è di circa 220 m/s per il gruppo G e di circa 190 m/s per i gruppi S e C. Nel substrato geologico i valori di V_s in superficie sono di circa 250 m/s per il gruppo L, mentre per il gruppo V e per il gruppo W sono molto simili (rispettivamente circa 180 m/s e 170 m/s). Il coefficiente di pendenza varia da 0,3 nel gruppo G, a 0,27 nel gruppo S e 0,19 nel gruppo C dei terreni di copertura (Tabella 4-2 e Figura 4-15). Nel substrato geologico il coefficiente di pendenza è simile tra il gruppo L e V (0,4) e leggermente inferiore per il gruppo W (0,36; Tabella 4-2 e nella Figura 4-15).

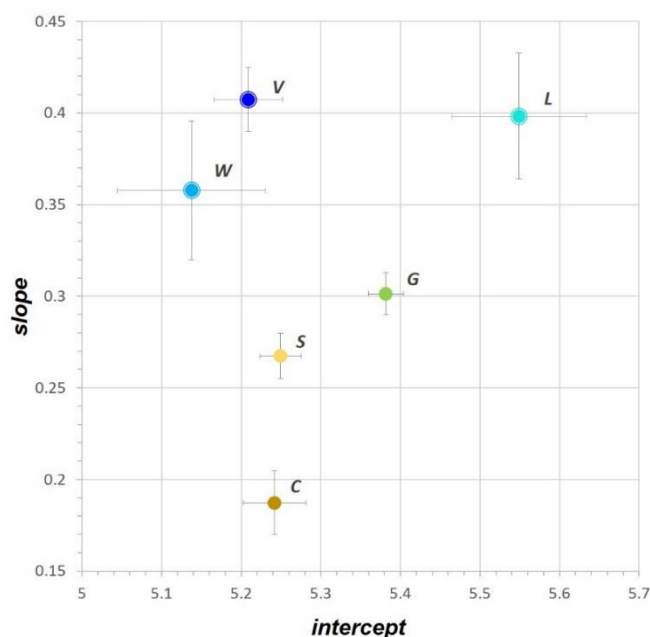


Figura 4-15 Proiezione dei valori del coefficiente di regressione, slope (a) e intercept ($\ln(b)$), per ogni gruppo gt della Tabella 4-2, ottenute dall'analisi di regressione. Le barre di errore verticale e orizzontale sono riferite ai valori del 95° percentile del $\ln(b)$ e a rispettivamente.

Il gradiente di Vs con la profondità può essere ottenuto per ogni gruppo gt dall'Eq. [1], applicando i coefficienti di regressione della Tabella 4-2, rispettivamente per i gruppi dei terreni di copertura e del substrato geologico. Anche in questo caso viene considerato un intervallo di profondità che va dalla superficie a circa 60 m (Figura 4-16). A partire dai valori dell'intercetta in superficie, ogni gruppo gt mostra un graduale aumento delle Vs con la profondità. Questo aumento dipende dal coefficiente di pendenza. I valori medi di Vs dei gruppi gt dei terreni di copertura sono inferiori a 800 m/s (Vs del substrato roccioso sismico), fino a 60 m di profondità ad eccezione dell'unità LC che supera questi valori a profondità > 12 m. Alla profondità di 60 m, il valore medio di Vs del gruppo G è di circa 750 m/s, quello del gruppo S è di circa 570 m/s e quello del gruppo C di circa 400 m/s (Figura 4-16).

I valori medi di Vs dei gruppi gt del substrato geologico raggiungono la Vs del substrato sismico ad una profondità di 18 m sotto la superficie per il gruppo L, e 38 m per il gruppo V, mentre per il gruppo W la velocità del bedrock sismico non viene raggiunta nei primi 60 m di profondità Figura 4-17.

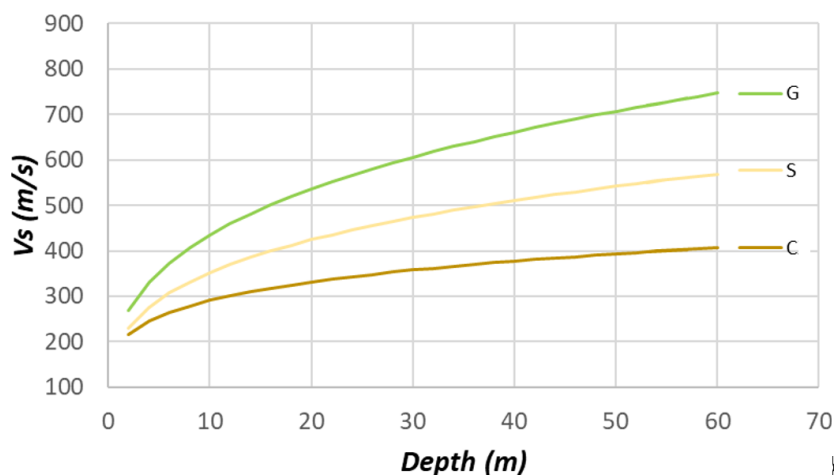


Figura 4-16 Curve di tendenza (legge a potenza) per i tre gruppi G, S e C di unità geologico-tecniche dei terreni di copertura.

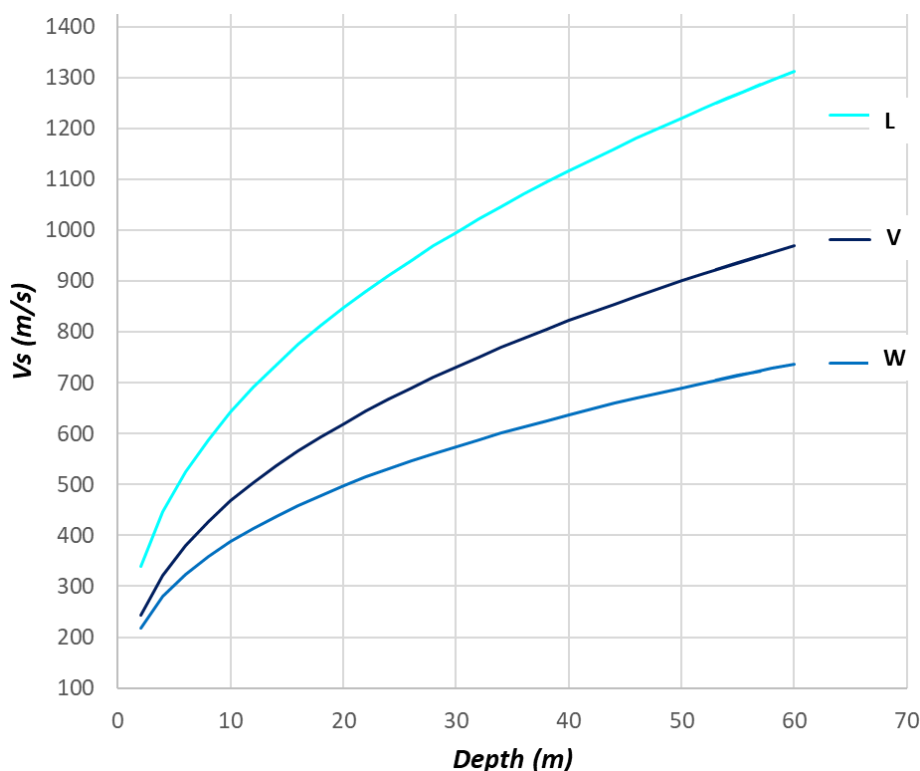


Figura 4-17 Curve di tendenza (legge a potenza) per tre gruppi L, V, W di unità geologico-tecniche del substrato.

I risultati dell'analisi statistica effettuata sul parametro V_s associato alle unità gt in relazione alla profondità suggeriscono di considerare tre gruppi principali di unità dei terreni di copertura: il gruppo delle ghiaie (**G**), compreso i riporti, quello delle sabbie e limi (**S**) e quello delle argille (**C**) oltre all'unità dei litoidi di copertura; anche per le unità del substrato geologico possono essere identificati tre gruppi principali: quello dei lapidei (**L**), quello variegato (**V**) e quello degli alterati-fratturati (**W**).

Per valutare l'attendibilità dei risultati ottenuti sono stati confrontati i profili verticali delle velocità delle onde di taglio misurate tramite indagini down-hole in corrispondenza di alcuni sondaggi selezionati con le stime delle V_s per profondità ottenute considerando i dati dei raggruppamenti rappresentati nella Tabella 4-2. Il confronto tra i profili verticali di velocità V_s misurate e la simulazione dei profili stocastici è stato effettuato selezionando sei logs rappresentativi di differenti contesti geologici, caratterizzati da una pericolosità sismica elevata. I primi tre esempi selezionati riguardano solo successioni caratterizzate da terreni di copertura, mentre gli altri tre esempi includono anche il substrato geologico nelle porzioni inferiori (Figura 4-16). La successione di Borgo S. Lorenzo (Figura 4-16 a) affiora nel bacino intermontano del Mugello in Appennino settentrionale originatosi come thrust top basin pleistocenico, successivamente rimodellato da faglie normali (Balestrieri et al., 2018). La successione è stata perforata per circa 30 m ed è costituita da un terrazzo fluviale spesso circa 3 m costituito da limi e sabbie (**S** in Figura 4-16a), che ricopre i depositi lacustri di delta fluviale del bacino del Pleistocene inferiore, costituiti da circa 9 m di ghiaie (**G** in Figura 4-16 a) che passa verso il basso a sabbie e limi (**S** in Figura 4-16 a Figura 4-18). La successione di Sulmona selezionata (Figura 4-16 b) è relativa alla parte orientale di un bacino intramontano dell'Appennino abruzzese, in corrispondenza del tetto di una faglia normale bordiera. La successione, perforata per circa 40 m, è costituita da ghiaie di un conoide alluvionale spesse circa di 8 m (**G** in Figura 4-16 b), che ricoprono e si interdigitano con sedimenti lacustri a grana fine del bacino (**C** in Figura 4-16 b) (Di Giulio et al., 2016).

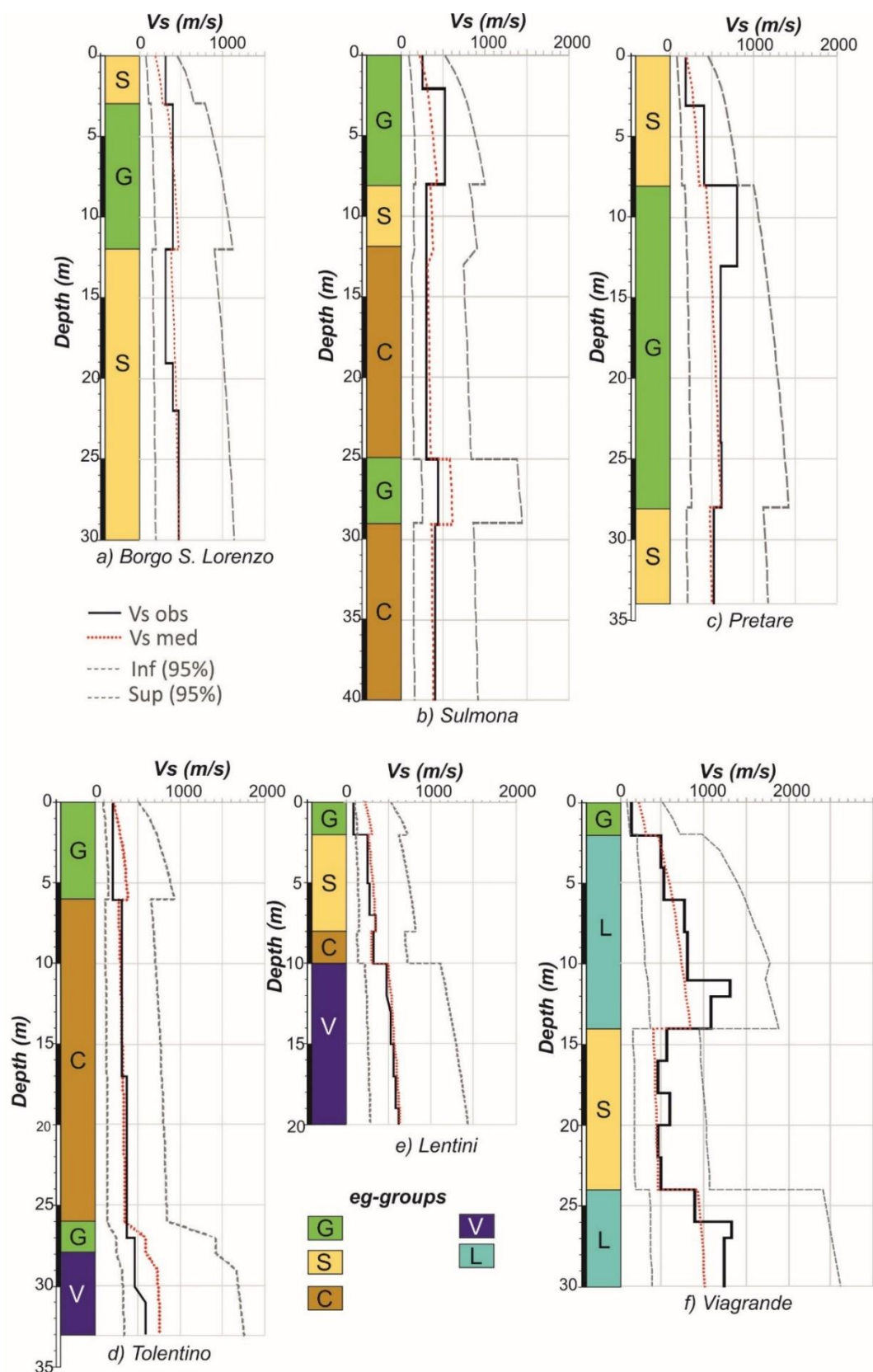


Figura 4-18 Profili verticali di velocità delle onde di taglio (V_s obs) in sei siti rappresentativi di differenti contesti geologici, confrontati con le velocità medie (V_s med) e gli intervalli di confidenza (inf and sup 95%) calcolati attraverso i coefficienti di regressione di ciascun gruppo geologico-tecnico G, S, C, V, and L (Tabella 4-2).

La successione di Pretare (Figura 4-18 c; Tortorici et al., 2019) è stata perforata in una valle fluviale successivamente riempita da depositi di una paleofrana, nel footwall del fronte del thrust dei Sibillini orientato NNE-SSW in Appennino Centrale. I depositi alluvionali costituiti da limi e sabbie (S in Figura 4-18 c) giacciono sui depositi della paleofrana spessi circa 20 m e caratterizzati da grossi blocchi calcarei, immersi in una matrice sabbioso-limosa (G in Figura 4-18 c). La successione di Tolentino inizia con depositi antropici (G in Figura 4-18 d) che ricoprono depositi alluvionali terrazzati fini (C in Figura 4-18 d) con un orizzonte ghiaioso alla base (G in Figura 4-18 d). I terreni di copertura poggiano su un substrato arenaceo-pelitico che caratterizza le colline dell'Appennino centro-settentrionale dove affiorano depositi terrigeni (Amanti et al., 2020; V in Figura 4-18 d). La successione di Lentini (Figura 4-18 e) si è depositata lungo il margine meridionale del Graben di Scordia-Lentini del Pleistocene Inferiore che si è sviluppato nel settore settentrionale dell'Avampaese Ibleo in Sicilia sud-orientale (Bonforte et al., 2015; Panzera et al., 2018). Qui, depositi alluvionali costituiti da sabbie e argille (S e C in Figura 4-18 e) ricoperti da un sottile orizzonte di depositi antropici (G in Figura 4-18 e), poggiano sulle calcareniti del Pleistocene inferiore-medio che rappresentano il substrato geologico (V in Figura 4-18 e). Infine la successione di Viagrande (Figura 4-18 f) nel fianco orientale del Monte Etna, in Sicilia orientale, è rappresentativa della complessità dei profili Vs in contesti vulcanici, dovuta alla presenza di un'alternanza di banchi lavici, caratterizzati da alte velocità di propagazione delle onde S, e livelli scoriacei e/o depositi vulcanoclastici a più bassa velocità (Catalano et al., 2017; Panzera et al., 2019; 2020; Fabozzi et al., 2021). Il log stratigrafico della successione di Viagrande attraversa circa 2 m di depositi antropici (G in Figura 4-18 e) che ricoprono un'alternanza di orizzonti rigidi e soffici, costituiti da due orizzonti lavici (L in Figura 4-18 e), separati da un deposito vulcanoclastico di 10 m di spessore (S in Figura 4-18 e).

Questi sei casi selezionati documentano una buona corrispondenza dei valori medi di Vs stimati per ciascun gruppo geologico-tecnico (Vs med) con i profili verticali delle Vs misurate sperimentalmente (Vs obs) in ciascun sito, considerando che il Vs obs è comunque compreso nell'intervallo di confidenza del 95% del Vs med (inf e sup 95%; Figura 4-18).

In conclusione, le analisi statistiche sui parametri che caratterizzano le unità geologico-tecniche, abbinate a un modello geologico di sottosuolo ricostruito attraverso la carta geologico-tecnica multiscala (vedi SEZIONE 2), rappresentano uno strumento essenziale per il calcolo dell'amplificazione a scala regionale o sub-regionale, in aree ampie non coperte da studi di MS.

5 Bibliografia

Amanti M., Battaglini L. et al., 2007. La Carta Litologica d'Italia alla scala 1:100.000. Atti 11ª Conferenza Nazionale ASITA, Centro Congressi Lingotto, Torino 6 – 9 novembre 2007, <http://atti.asita.it/Asita2007/Pdf/119.pdf>.

Amanti M., Chiessi V., Muraro C., Puzzilli L., Roma M., Catalano S., Romagnoli G., Tortorici G., Cavuoto G., Albarello D., Fantozzi P.L., Paolucci E., Pieruccini P., Caprari P., Mirabella F., Della Seta M., Esposito C., Di Curzio D., Francescone M., Pizzi A., Macerola L., Nocentini M., Tallini M., 2020. Geological and geotechnical models definition for 3rd level SM studies in Central Italy. *Bull. Earthq. Eng.*, 18:5441–5473, <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00843-x>

Balestrieri M. L., Benvenuti M., Catanzariti R., 2018. Unravelling basin shoulder dynamics through detrital apatite fission-track signature: the case of the Quaternary Mugello Basin, Italy. *Geological Magazine* 155(7) pp. 1413 – 1426. <https://doi.org/10.1017/S0016756817000073>.

Bonforte, A., Catalano, S., Maniscalco, R., Romagnoli, G., Sturiale, G., Tortorici, G., 2015. Geological and geodetic constraints on the active deformation along the northern margin of the Hyblean Plateau (SE Sicily). *Tectonophysics* 640-641, 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.11.024>.

Catalano, S., Pavano, F., Romagnoli, G., & Tortorici, G. 2017. Late Quaternary tectonics and active ground deformation in the Catania urban area (eastern Sicily): New constraints from a geological investigation. *Tectonophysics*, 712–713, 200–207. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2017.05.033>.

Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica 2018a. (s.d.). Standard di rappresentazione e archiviazione informatica degli studi di MS vers.4.1, disponibili per il download qui https://www.webms.it/sites/default/files/2018-06/StandardMS_4_1.pdf.

Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica 2018b. (s.d.). Portale per la consultazione degli studi di MS e CLE disponibile su www.webms.it, realizzato e gestito dall'Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria per il Dipartimento della Protezione Civile.

Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica 2020. (s.d.). Standard di rappresentazione e archiviazione informatica degli studi di MS vers.4.2, disponibili per il download qui: <http://www.protezionecivile.gov.it/attivita-rischi/rischio-sismico/attivita/commissione-supperto-monitoraggio-studi-microzonazione/standard-rappresentazione-archiviazione-informatica>

Di Giulio G., de Nardis R., Boncio P., Milana G., Rosatelli G., Stoppa F and Lavecchia G. 2016. Seismic response of a deep continental basin including velocity inversion: the Sulmona intramontane basin (Central Apennines, Italy). *Geophysical Journal International*, Volume 204, Issue 1, Pages 418–439, <https://doi.org/10.1093/gji/ggv444>.

Darendeli, M. B. 2001. “Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves.” Ph.D. thesis, Univ. of Texas at Austin, Austin, TX.

Fabozzi S., Catalano S., Falcone G., Naso G., Pagliaroli A., Peronace E., Porchia A., Romagnoli G., Moscatelli M. 2021. Stochastic approach to study the site response in presence of shear wave velocity inversion: Application to SM studies in Italy. *Engineering Geology* 280 (2021) 105914. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105914>.

Gruppo di lavoro PON 2020. Report Attività A2.4 versione 3: Definizione di metodi avanzati di valutazione della qualità delle indagini e dei risultati degli studi di MS.

Mori F., Mendicelli A., Moscatelli M., Romagnoli G., Peronace E., Naso G. 2020. A new Vs30 map for Italy based on the seismic microzonation dataset. Engineering Geology 275 (2020) 105745, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105745>.

Panzerà F., Lombardo G., Imposa S., Grassi S., Gresta S., Catalano S., Romagnoli G., Tortorici G., Patti F., Di Maio E. 2018. Correlation between earthquake damage and seismic site effects: The study case of Lentini and Carlentini, Italy. Engineering Geology 240 (2018), 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.04.014>.

Panzerà F., Romagnoli G., Tortorici G., D'Amico S., Rizza M., Catalano S., 2019. Integrated use of ambient vibrations and geological methods for seismic microzonation. Journal of Applied Geophysics vol 170, 103820. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103820>.

Panzerà F., Tortorici G., Romagnoli G., Marletta G., Catalano S., 2020. Empirical evidence of orthogonal relationship between directional site effects and fracture azimuths in an active fault zone: the case of the Mt. Etna lower eastern flank. Engineering Geology 279, 105900. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105900>.

Tortorici G., Romagnoli G., Grassi S., Imposa S., Lombardo G., Panzerà F., Catalano S. 2019. Quaternary negative tectonic inversion along the Sibillini Mts. thrust zone: the Arquata del Tronto case history (central Italy). Environmental Earth Sciences 78 (1) (2019). <https://doi.org/10.1007/s12665-018-8021-2>.

Vucetic M., Dobry R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. Journal of Geotech. Eng., ASCE, Vol.117.

Yokota, K., Imai, T. and Konno, M., 1981. Dynamic Deformation Characteristics of Soils Determined by Laboratory Tests. OYO Tec. Rep. 3, pp. 13 - 37.

SEZIONE 2 - Omogeneizzazione degli studi di MS a scala regionale: L'esempio della Calabria per la realizzazione di una carta geologico-tecnica regionale e di Contesto Territoriale

1 Premessa

La realizzazione della Carta Geologico-Tecnica (CGT) a scala regionale ha come principale finalità quella di analizzare criticamente i dati provenienti dagli studi di Microzonazione Sismica (MS) nel tentativo di omogenizzarli ed integrare il dato cartografico laddove mancante utilizzando cartografie esistenti. Ciò ha portato inevitabilmente a dover ragionare ad una scala che non è più quella del singolo Comune, ma quella di un Contesto Territoriale (CT) o di una intera Regione, dimensione rispetto alla quale le unità geologico-tecniche individuate devono essere omogeneizzate ed univocamente distinte.

Per tale applicazione è stata selezionata la Regione Calabria, che dispone di una cartografia geologica di base alla scala di 1:25.000, rilevata tra il 1958 e il 1962 per la Cassa per il Mezzogiorno (CASMEZ, 1967) e nel 2000 vettorializzata e resa disponibile in formato *shapefile*.

Il flusso di lavoro per la realizzazione delle cartografie (nazionale, regionale e di CT) rappresenta un progressivo aumento nel dettaglio cartografico che inizia con la messa a punto di una legenda standard di riferimento a scala nazionale applicata poi a cartografie di base a scale maggiori secondo lo schema mostrato nel diagramma di Figura 1-1.

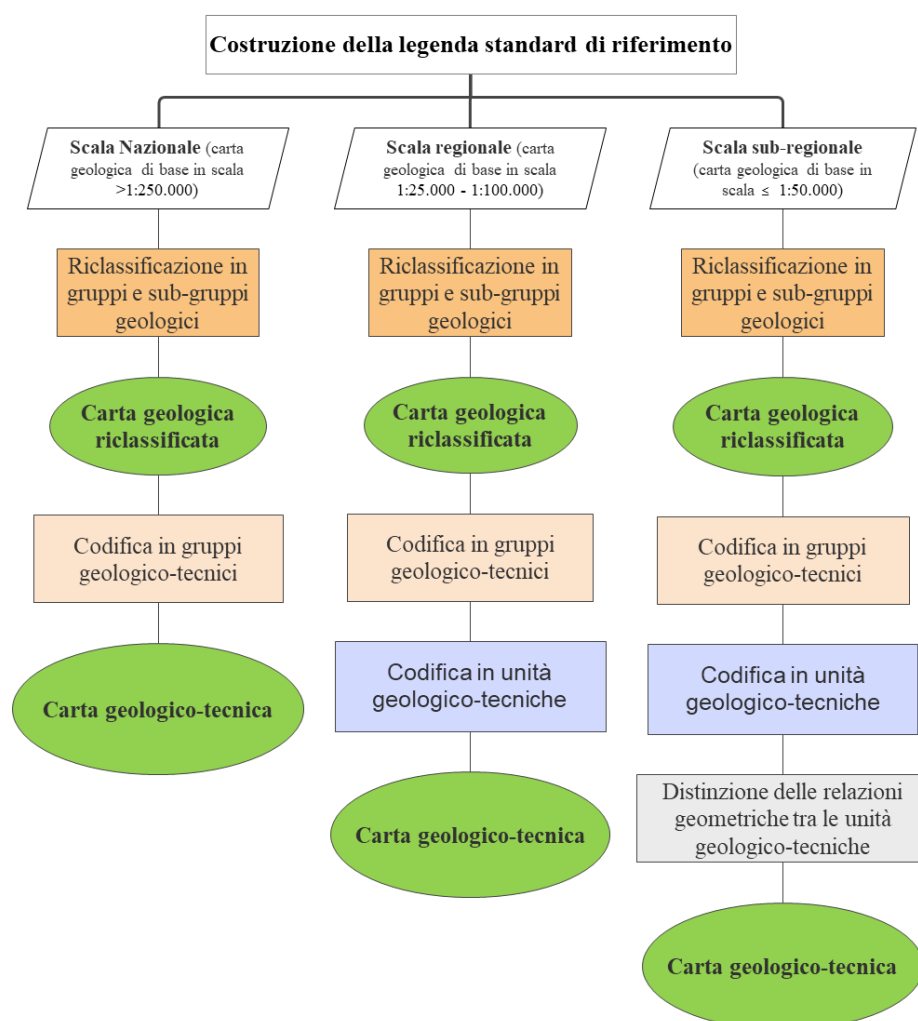


Figura 1-1 Diagramma di flusso generale delle fasi di realizzazione delle cartografie tematiche.

In questo modo, utilizzando la medesima legenda standard di riferimento è possibile ottenere cartografie omogenee a differenti scale.

I criteri adottati hanno permesso di riclassificare le “formazioni” geologiche presenti in tutto il territorio nazionale in Gruppi Geologici (GG) a loro volta suddivisi in sub-Gruppi (sub-GG). Il passaggio successivo per la realizzazione della CGT è stato quello di associare ai GG ed ai sub-GG le sigle delle unità geologico-tecniche raggruppate in 4 classi principali di terreni di copertura e 4 di substrato geologico (Gruppi Geologico-Tecnici - GGT)

Per la realizzazione della Carta geologico-tecnica regionale, compatibilmente con l'aumento del dettaglio cartografico, i Gruppi Geologico-Tecnici (GGT) sono stati differenziati e codificati in unità geologico-tecniche (UGT) permettendo di dettagliare meglio i terreni di copertura.

La legenda guida sarà organizzata in:



Il passaggio di scala alla dimensione del CT avviene attraverso l'introduzione di ulteriori distinzioni nelle unità *gt* relativamente ai reciproci rapporti geometrici esistenti e rilevabili alla scala di CT.

L'insieme dei dati collezionati ed elaborati consente di ottenere diversi prodotti:

- > legenda standard di riferimento;
- > matrice degli ambienti deposizionali;
- > carta geologica nazionale e regionale riclassificate in Gruppi Geologici (GG) e sub-Gruppi Geologici (sub-GG);
- > carta geologico-tecnica nazionale classificata in GGT (GGT come raggruppamento delle Unità *gt* degli Standard MS v.4.2 - *Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica*, 2020; LG-CGT, 2019) per la classificazione dei terreni di copertura e dei substrati;
- > carta geologico-tecnica regionale classificata in UGT (Standard MS v.4.2 - *Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica*, 2020; LG-CGT) per la classificazione dei terreni di copertura e dei substrati;
- > carta geologico-tecnica di Contesto Territoriale con distinzione dei rapporti geometrici tra le UGT;
- > matrice dei rapporti geometrici a scala di Contesto territoriale.

2 Costruzione della legenda standard di riferimento

Con lo scopo di identificare i criteri essenziali in base ai quali costruire una legenda di riferimento che fosse esaustiva della variabilità geologica a scala nazionale, sono state consultate diverse cartografie a differente scala e in differenti settori del territorio nazionale (Bonardi G., D'Argenio B. & Perrone V., 1988; Bigi et al. 1990; Vezzani & Ghisetti, 1998; Vezzani et al., 2004; ISPRA, 2005; Patacca, & Scandone, 2007; Compagnoni et al. 2011; Lentini & Carbone, 2014; Conti et al. 2020).

A seguito di questa fase di studio, sulla base dell'età e del macroambiente geologico di formazione, sono stati identificati 10 Gruppi Geologici (GG) di cui 8 relativi al substrato e 2 ai terreni di copertura. Come limite temporale per la distinzione tra le unità di substrato e le coperture è stato scelto il limite Pliocene-Pleistocene che marca un importante cambiamento dei processi morfogenetici di modellazione del territorio (Patacca & Scandone, 2001).

In relazione alla litologia o all'associazione litologica prevalente i GG relativi al substrato sono stati suddivisi in 14 sub-Gruppi Geologici (sub-GG), mentre, i GG relativi ai terreni di copertura, in relazione all'ambiente di formazione ed alla granulometria prevalente sono stati suddivisi in 13 sub-GG. Di seguito, dal più antico al più recente, vengono brevemente illustrati i principali caratteri geologici che contraddistinguono i diversi GG e sub-GG individuati.

Nel GG-10 (Figura 2-1a) (*Unità cristalline e vulcaniche pre-triassiche*) sono state inserite le unità plutoniche e vulcaniche pre-triassiche. I terreni riferibili a questo gruppo (e.g. gabbri, graniti, lave, ignimbriti, etc.) affiorano nel settore Alpino, in Calabria e in Sardegna.

Nel GG-9 (Figura 2-1b) (*Unità metamorfiche*) sono raggruppate tutte le formazioni affette da vario grado di metamorfismo. Tali rocce (e.g. scisti, gneiss, marmi etc.) affiorano diffusamente nel settore alpino, in Calabria, Sardegna, Toscana ed in misura minore in Sicilia nordorientale.

Nel GG-8 (Figura 2-1c) (*Unità sedimentarie pre-triassiche*) sono state comprese le unità di ambiente continentale e marino legate alle fasi di *rifting* continentale avvenute nell'intervallo permo-Triassico ed affioranti esclusivamente nell'Italia settentrionale (Alpi e Toscana). Si tratta di unità costituite da vari litotipi, tra i quali calcari, marne, argille, evaporiti, arenarie e prodotti vulcanici. Tali litotipi presentano una organizzazione stratigrafica alquanto complessa e risultano interessate, in alcuni settori, da bassi e medi gradi di metamorfismo, come accade nella zona toscana (settore delle Alpi Apuane). In relazione alle associazioni litologiche sono stati distinti 2 sub-GG: 8a) Calcari, marne, arenarie ed evaporiti; 8b) Arenarie e conglomerati.

Nel GG-7 (Figura 2-1d) (*Unità vulcaniche e sub-vulcaniche Mesozoico-Terziarie*) rientrano i prodotti pre-quadernari di origine vulcanica che risultano inclusi all'interno delle successioni sedimentarie Mesozoico-terziarie. Le rocce appartenenti a questo gruppo (e.g. lave, ignimbriti, rocce ipoabissali) affiorano sulle Alpi orientali, in Sardegna e nel settore meridionale della Sicilia.

Nel GG-6 (Figura 2-1e) (*Unità di piattaforma carbonatica*) sono state invece inserite tutte le unità calcareo-dolomitiche di piattaforma carbonatica mesozoico-terziaria che attualmente formano l'ossatura della catena appenninica centro-meridionale. In tale gruppo, per omogeneità litologica sono state inserite sia le unità riferibili ai settori interni che ai settori marginali (scarpata) di piattaforma.

Il GG-5 (Figura 2-1f) (*Unità di bacino oceanico*) comprende invece tutte le unità bacinali di età mesozoico-terziaria costituite da alternanze di litotipi argillosi, calcareo-marnosi ed arenacei affioranti diffusamente lungo tutto l'Appennino, in Sicilia e in alcuni settori delle Alpi orientali. In relazione alle associazioni litologiche, tale gruppo è stato suddiviso in 4 sub-GG: 5a) Argille e marne; 5b) Arenarie e conglomerati; 5c) Calcari, marne, argille e arenarie; 5d) Calcari e marne.

Nel GG-4 (Figura 2-1g) (*Unità sin-orogene-Flysch*) ricadono tutte le unità mesozoico-terziarie torbiditiche sin-orogene che affiorano con grandi spessori in estesi settori del territorio italiano. In relazione alle associazioni litologiche sono stati distinti ulteriori 4 sub-GG: 4a) Argille e arenarie; 4b) Arenarie, conglomerati, argille e gessi; 4c) Arenarie, argille e marne; 4d) Calcari ed altri depositi litoidi.

Nel GG-3 (Figura 2-1h) (*Unità marine e continentali di riempimento di bacino*) sono comprese le unità argillose, arenacee e conglomeratiche riferibili alla deposizione in bacini sedimentari alloggiati sulle falde in compressione (*thrust-top basin*) o in settori di avanfossa durante l'intervallo Pliocene-Pleistocene inferiore. In relazione alle associazioni litologiche distinguiamo 4 sub-GG: 3a) Argille, marne e arenarie; 3b) Arenarie e conglomerati; 3c) Arenarie e argille; 3d) Calcari ed altri depositi litoidi.

Come già anticipato, i GG riferiti ai terreni di copertura sono stati distinti in relazione alla granulometria prevalente a loro volta differenziati per ambiente di formazione. In particolare nel GG2 ricadono i depositi sedimentari quaternari e nel GG1 i depositi derivanti dall'attività vulcanica. Nello specifico:

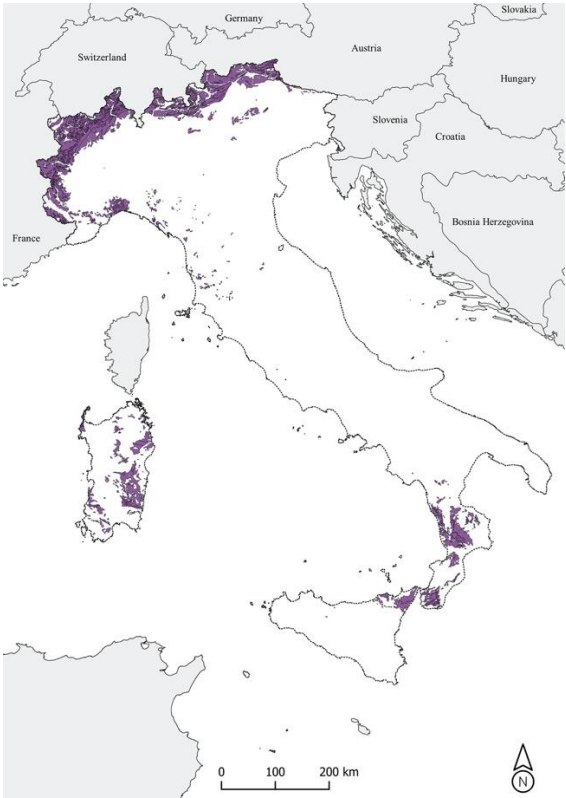
Nel GG-2 (Figura 2-1i) sono raggruppati i depositi quaternari di ambiente alluvionale, lacustre, glaciale e costiero che ricoprono con spessori variabili tutte le unità del bedrock geologico. In particolare vengono distinti in:

- Depositi di ambiente glaciale: 2a) Ghiaie e sabbie;
- Depositi di ambiente fluviale, di versante, lacustre/palustre e carsico: 2b) Ghiaie e sabbie; 2c) Sabbie, argille e ghiaie; 2d) Argille e limi;
- Depositi di ambiente costiero, marino ed eolico: 2e) Ghiaie e sabbie; 2f) Sabbie; 2g) Argille e limi.

Nel GG-1 (Figura 2-1j), i depositi di origine vulcanica sono distinti in 4 sub-GG in relazione al carattere granulometrico prevalente: 1a) Lave, tufi e ignimbriti litoidi; 1b) Tufi e ignimbriti pedogenizzate; 1c) Scorie, lapilli e ceneri (ignimbriti incoerenti); 1d) Depositi da Lahar.



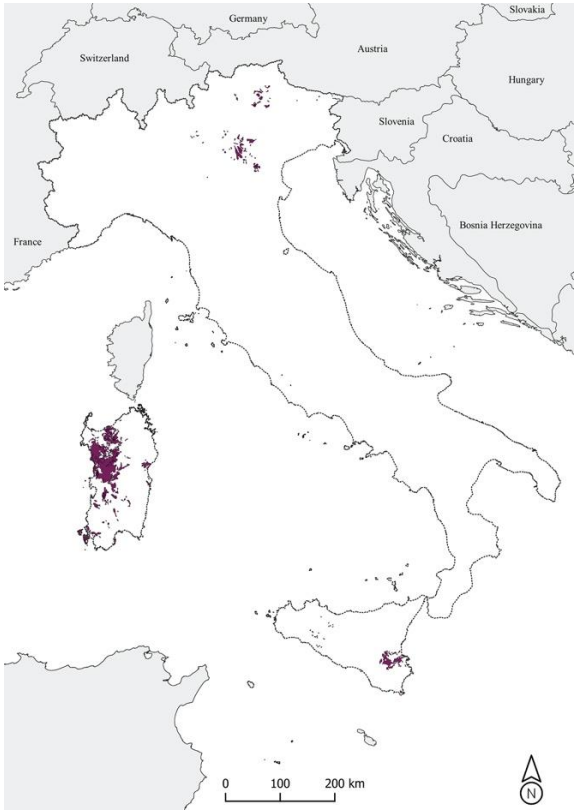
a – GG10



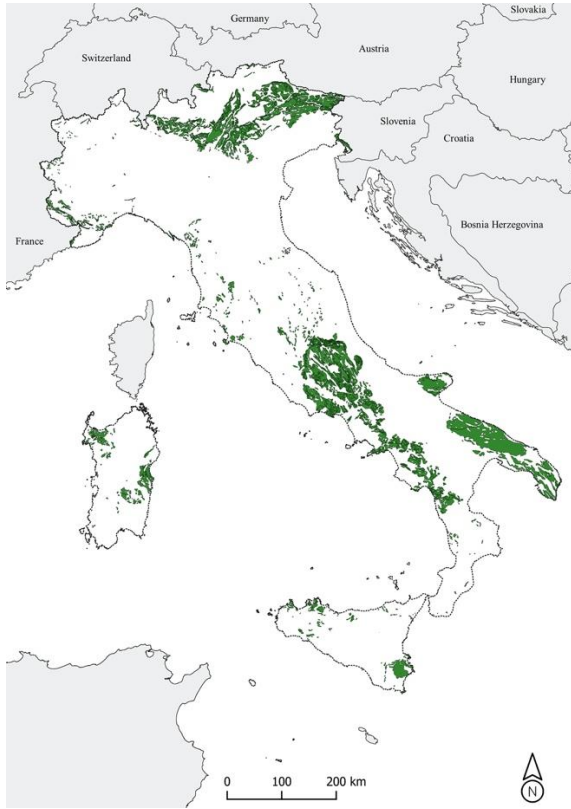
b – GG9



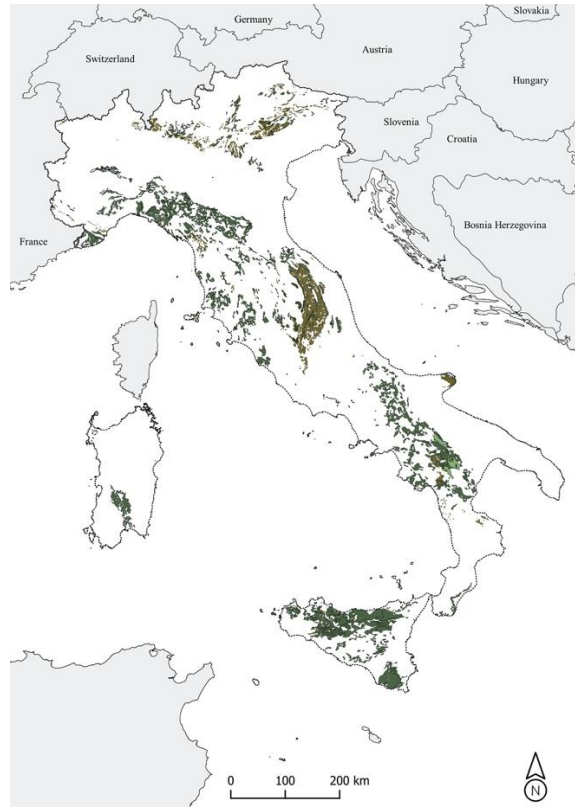
c – GG8



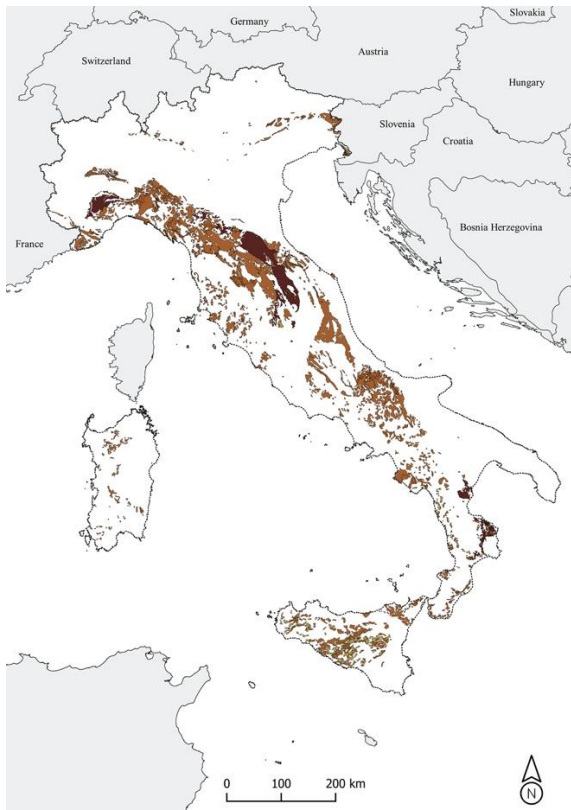
d – GG7



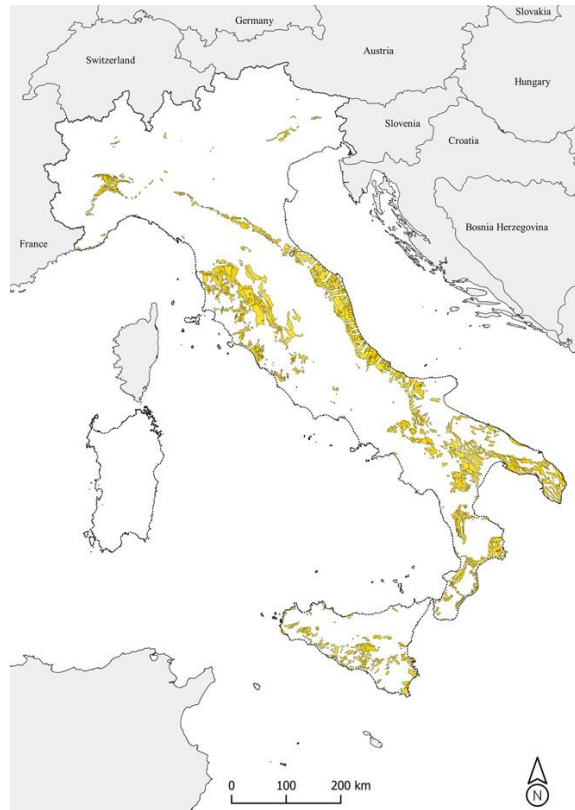
e – GG6



f – GG5



g – GG4



h – GG3

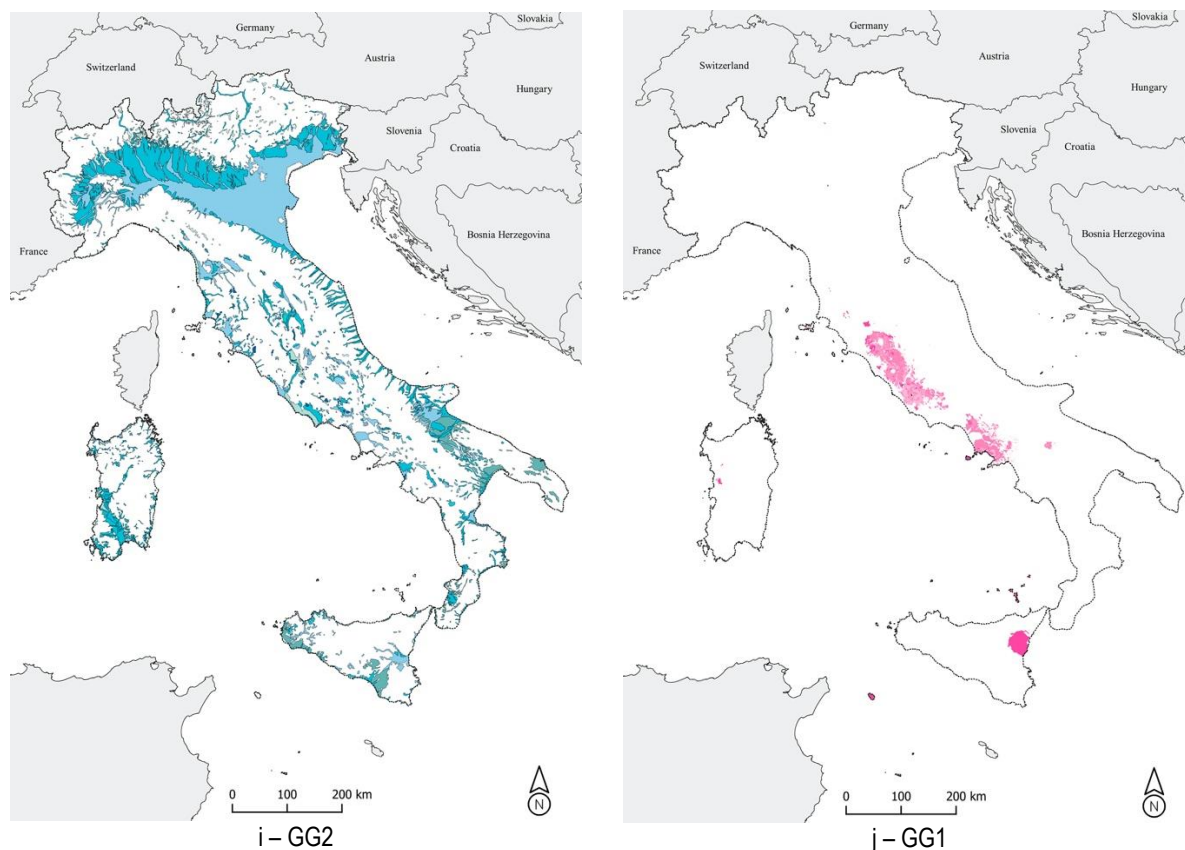


Figura 2-1 Distribuzione dei GG e sub-GG sul territorio nazionale

La codifica dei GG e sub-GG in gruppi geologico-tecnici (GGT) è stata eseguita utilizzando la stessa litologia o l'associazione litologica prevalente per i terreni di substrato, e la granulometria prevalente per i terreni di copertura. Considerando gli standard di rappresentazione ed archiviazione informatica della MS (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, 2020), compatibilmente al livello di dettaglio riportato nella legenda di riferimento, le unità geologico-tecniche sono state raggruppate in 4 gruppi di terreni di copertura e 4 classi di substrato geologico (Figura 2-2).







Terreni di copertura		Substrato geologico	
	Gx Depositi prevalentemente ghiaiosi		LP Lapideo
	Sx Depositi prevalentemente sabbiosi		GR/IS Granulare cementato/incoerente
	Cx depositi prevalentemente argillosi		CO/IS Coesivo sovraconsolidato/poco consolidato
	LC Depositi cementati		AL Alternanza di litotipi

Figura 2-2 Aggregazione delle unità geologico-tecniche (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, 2020) in Gruppi Geologico-Tecnici (GGT) di copertura e di substrato geologico.

In Figura 2-3 è mostrata la legenda standard di riferimento.

		Età	GG	Sub-GG	Litologia		Litologia e carattere granulometrico prevalente		GGT		
Terreni di copertura	Pleistocene medio p.p. - Olocene - Recente	00		Laghi e ghiacciai							
		0		Depositi antropici					RI		
		1	Unità vulcaniche quaternarie								
			1a	Lave, tufi e ignimbriti litoidi			Depositi di ambiente vulcanico	Lave		LC	
			1b	Tufi e ignimbriti pedogenizzate				Sabbie		SX	
			1c	Scorie, lapilli e ceneri (ignimbriti incoerenti)				Ghiaie		GX	
			1d	Depositi di Lahar				Argille		CX	
		2	Unità sedimentarie quaternarie								
			2a	Ghiaie e sabbie		Depositi di ambiente glaciale		Ghiaie		GX	
			2b	Ghiaie e sabbie		Depositi di ambiente di versante, fluviale, lacustre, palustre e carsico	Ghiaie		GX		
			2c	Sabbie, argille e ghiaie			Sabbie		SX		
			2d	Argille e limi			Argille		CX		
			2e	Ghiaie e sabbie		Depositi di ambiente eolico, costiero, di delta e marino	Ghiaie		GX		
			2f	Sabbie			Sabbie		SX		
	2g		Argille e limi		Argille		CX				
	2h	Depositi molto cementati					e.g. Travertini		LC		
	Substrato Geologico	Pliocene - Pleistocene medio p.p.	3	Unità marine e continentali di riempimento di bacino							
				3a	Argille, marne e arenarie				Argille		CO/IS
				3b	Arenarie e conglomerati				Arenarie		GR/IS
				3c	Arenarie e argille				Alternanza di litotipi		AL
				3d	Calcari ed altri depositi litoidi				Calcari		LP
Mesozoico - Terziario		4	Unità torbiditiche sinorogene (Flysch)								
			4a	Argille e arenarie				Argille		CO	
			4b	Arenarie, conglomerati, argille e gessi				Arenarie		GR	
			4c	Arenarie, argille e marne				Alternanza di litotipi		AL	
			4d	Calcari ed altri depositi litoidi				Calcari		LP	
		5	Unità bacinali Mesozoico-Terziario								
			5a	Argille e marne				Argille		CO	
			5b	Arenarie e conglomerati				Arenarie		GR	
			5c	Calcari, marne, argille e arenarie				Alternanza di litotipi		AL	
			5d	Calcari e marne				Calcari		LP	
		6	Unità di piattaforma carbonatica Mesozoico-Terziario								
			6	Calcari, dolomie, marne e argille				Calcari		LP	
		7	Unità vulcaniche e sub-vulcaniche Mesozoico-Terziario								
			7	Lave e ignimbriti e rocce ipoabissali				Lave		LP	
		Paleozoico - Terziario	8	Unità sedimentarie pre-triassiche							
				8a	Calcari, marne, arenarie e evaporiti				Alternanza di litotipi		AL
8b	Arenarie e conglomerati				Arenarie		GR				
9	Unità metamorfiche										
	9		Scisti, filladi, gneiss, marmi, etc.				Rocce metamorfiche		LP		
10	Unità cristalline e vulcaniche pre-Triassiche										
10	Graniti, gabbri, lave, ignimbriti, etc.				Rocce plutoniche e vulcaniche				LP		

Figura 2-3 Legenda standard di riferimento. La legenda riporta i GG e i sub-GG ai quali corrisponde il GGT in relazione alla litologia o al carattere granulometrico prevalente.

3 Applicazioni

3.1 Dalla carta geologica alla carta geologico-tecnica a scala nazionale

Il primo livello di analisi per la realizzazione di carte multiscala è stato quello nazionale. L'applicazione della legenda standard di riferimento per la riclassificazione delle formazioni geologiche presenti su una cartografia a scala nazionale ha permesso di costruire un riferimento cartografico da utilizzare, unitamente alla legenda standard, nei successivi passaggi di scala e di incremento del dettaglio cartografico.

Seguendo lo schema di Figura 1-1, riproposto sinteticamente in Figura 3-1 per quanto riguarda la scala nazionale, al fine di avere un dato geologico quanto più omogeneo possibile, si è scelto di utilizzare la carta geologica in scala 1:500.000 realizzata dall'ISPRA (Pantaloni et al., 2006), che comprende 128 unità geolitologiche. Solo per le aree vulcaniche, dato il basso dettaglio, la carta a 1:500.000 (Figura 3-2a) è stata integrata con la carta geologica alla scala 1:100.000 (Amanti *et al.*, 2007) (Figura 3-2b).

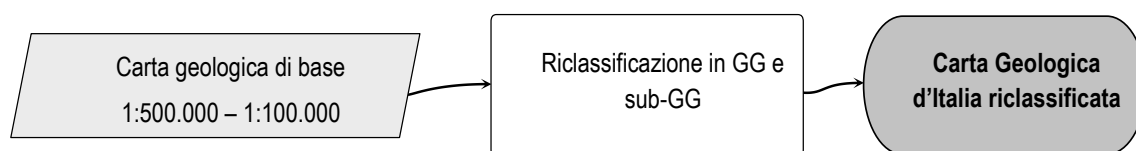


Figura 3-1 Diagramma di flusso delle fasi di realizzazione della carta geologica nazionale.

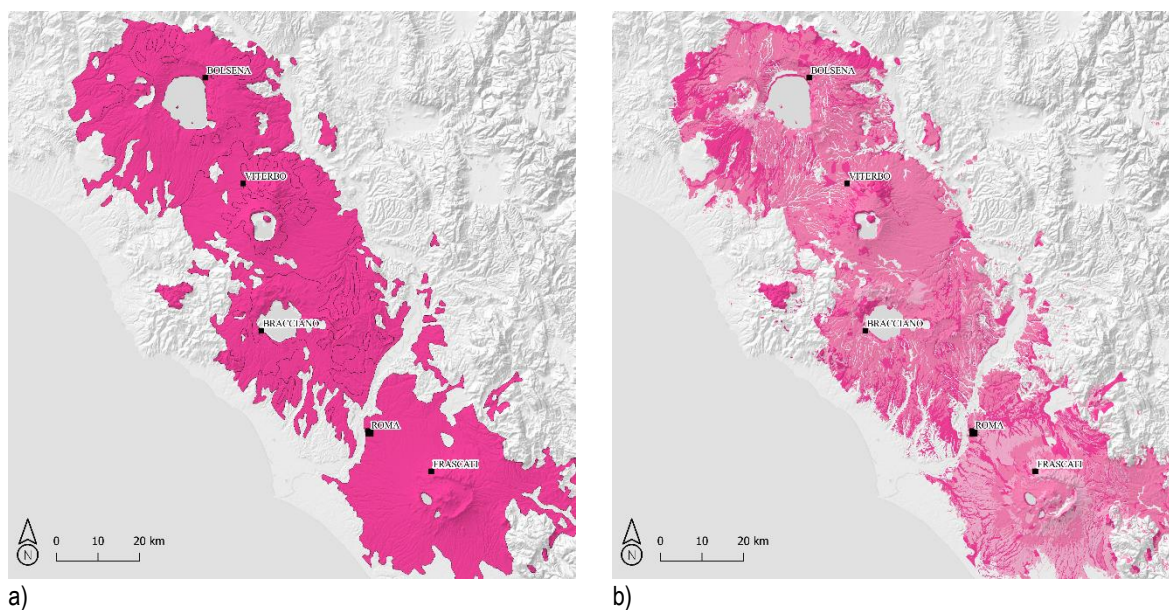


Figura 3-2 Esempio di differente dettaglio cartografico per l'area del vulcano laziale. a) carta 1:500.000; b) carta 1:100.000

L'applicazione della legenda standard di riferimento ha così permesso di riclassificare con giudizio esperto le 128 Unità Geologiche ISPRA, in modo da individuare i 10 Gruppi Geologici (GG) principali previsti nella legenda standard di riferimento, 8 per il *bedrock*, 1 per i depositi sedimentari quaternari ed 1 per i depositi vulcanici quaternari. In Figura 3-3 è riportata la tabella di conversione in Gruppi e sub-Gruppi Geologici dei codici riferiti alle carte 1:500.000 e 1:100.000 dell'ISPRA utilizzate. La distribuzione in pianta di tutti i GG e *sub-GG* individuati è osservabile nella Carta Geologica Nazionale mostrata in Figura 3-4.

Codice GG e sub-GG	Codice di riferimento sulla carta 1:500.000	Codice di riferimento sulla carta 1:100000
00	1	
1a	15; 12; 11; 14; 13; 16	D1; D4; D3; D2; D5; D6; D8
1b		B4; D5; D6; D8; D7; C2
1c		B4; D4; D5; D6; D8
2a	123	
2b	128; 125; 119	
2c	128; 119; 126; 125	
2d	125; 119	
2e	122	
2f	127; 122	
2h	124	
3a	114; 121; 117; 119; 125	
3b	122; 115; 112; 120; 113; 116; 118	
4a	107; 102	
4b	108; 111; 103; 81; 95; 100; 93; 99; 110; 86; 109; 87; 89; 42; 101; 98	
4c	103; 95; 111; 108; 110	
5a	75	
5b	103; 80; 94	
5c	94; 66; 91; 105; 106; 97; 80; 43; 65; 79; 88; 77; 71; 101; 75; 103; 95; 107	
5d	61; 71; 77; 105; 97; 91; 94; 66	
6	67; 106; 73; 62; 85; 63; 72; 68; 98; 59; 83; 78; 84; 92; 104; 96; 82; 90; 70; 76	
7	4; 5; 34; 33; 6; 7; 9; 10; 12; 8; 35	D1; D2; D5
8a	49; 58; 57; 52; 53; 54; 45	
8b	60; 64; 55; 74; 48; 44	
9	25; 28; 23; 19; 27; 69; 47; 20; 51; 18; 22; 17; 24; 26; 21; 56; 58; 50; 46	
10	32; 40; 31; 30; 3; 2; 41; 37; 36; 29; 38; 39	

Figura 3-3 Tabella di conversione in GG e Sub-GG dei codici sulle cartografie di riferimento per l'applicazione a scala nazionale.

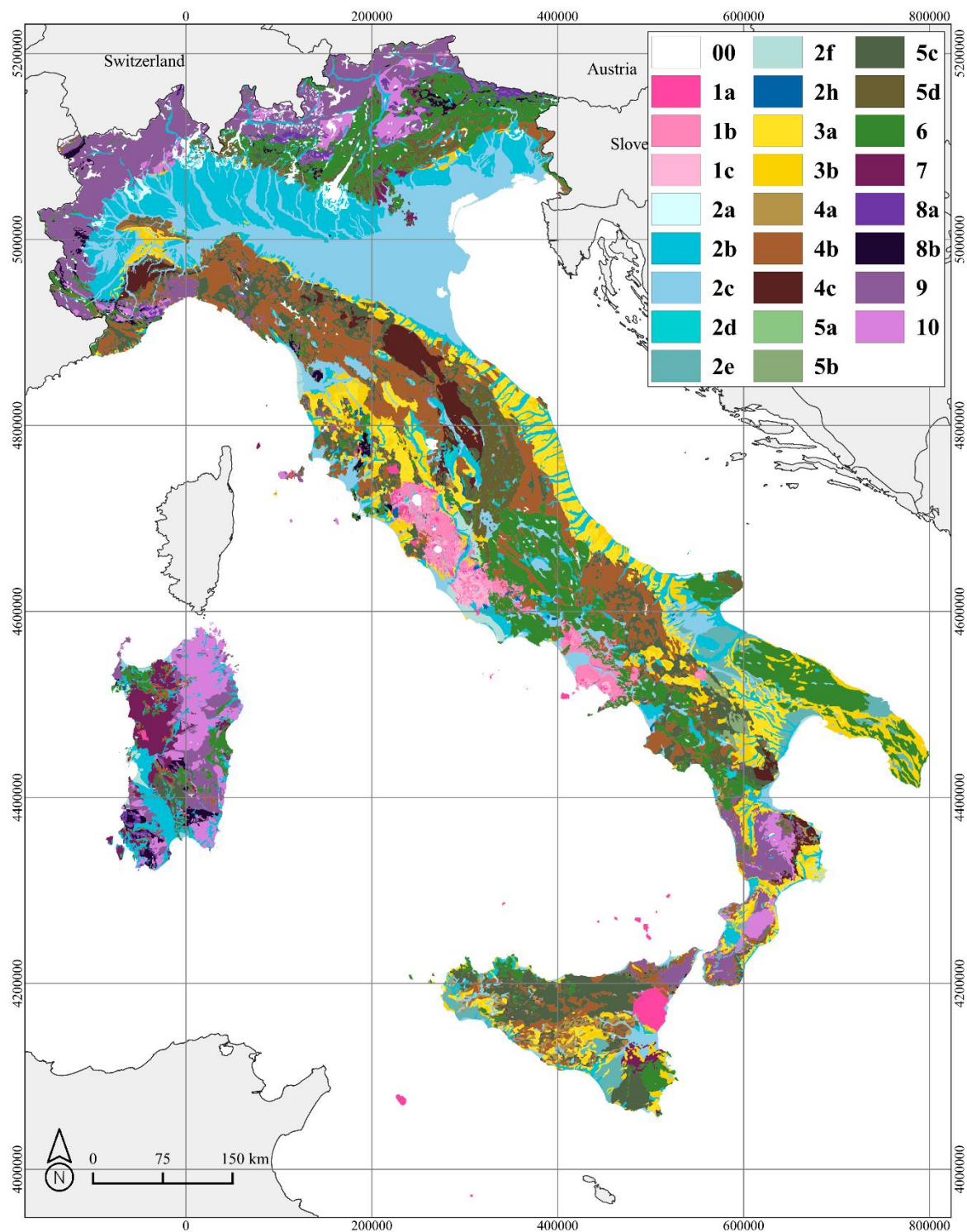


Figura 3-4 Carta Geologica del territorio italiano derivante dalla riorganizzazione della carta geologica ISPRA 1:500.000 in gruppi geologici (GG) e sub-gruppi (sub-GG). 00) Specchi d'acqua e ghiacciai. Unità vulcaniche quaternarie - 1a) Lave, tufi e ignimbriti litoidi; 1b) Tufi e ignimbriti pedogenizzati; 1c) Scorie, lapilli e ceneri (ignimbriti incoerenti). Unità sedimentarie quaternarie - 2a) Ghiaie e sabbie (ambienti glaciali); 2b) Ghiaia e sabbia; 2c) Sabbie, argille e ghiaie; 2d) Argille e limi; 2e) Ghiaie e sabbie (depositi eolici, costieri e marini); 2f) Sabbie; 2h) Depositi fortemente cementati. Unità marine e continentali di riempimento di bacino - 3a) Argille, marne e arenarie; 3b) Arenarie e conglomerati. Unità torbiditiche sinorogene (Flysch) - 4a) Argille e arenarie; 4b) arenarie, conglomerati, argille e gessi; 4c) Arenarie, argille e marne. Unità bacinali mesozoico-terziarie - 5a) Argille e marne; 5b) arenarie e conglomerati; 5c) Calcare, marne, argille e arenarie; 5d) Calcari e marne. Unità di piattaforma carbonatica mesozoico-terziaria - 6) Calcari, dolomie, marne e argille. Unità vulcaniche e sub-vulcaniche mesozoico-terziarie - 7) Lave, ignimbriti e rocce ipoabissali. Unità sedimentarie pre-triassiche - 8a) Calcari, marne, arenarie ed evaporiti; 8b) Arenarie e conglomerati. Unità metamorfiche - 9) Scisto, fillite, gneiss, marmo, ecc. Unità cristalline e vulcaniche pre-triassiche - 10) Graniti, gabbri, lave, ignimbriti, ecc.

Il passaggio alla carta geologico-tecnica nazionale è stato realizzato associando la sigla del GGT corrispondente ad ogni GG e sub-GG, sigla che è rappresentativa della variabilità interna della classe geologico-tecnica individuata e non discriminabile alla scala di rappresentazione nazionale (Figura 3-5).

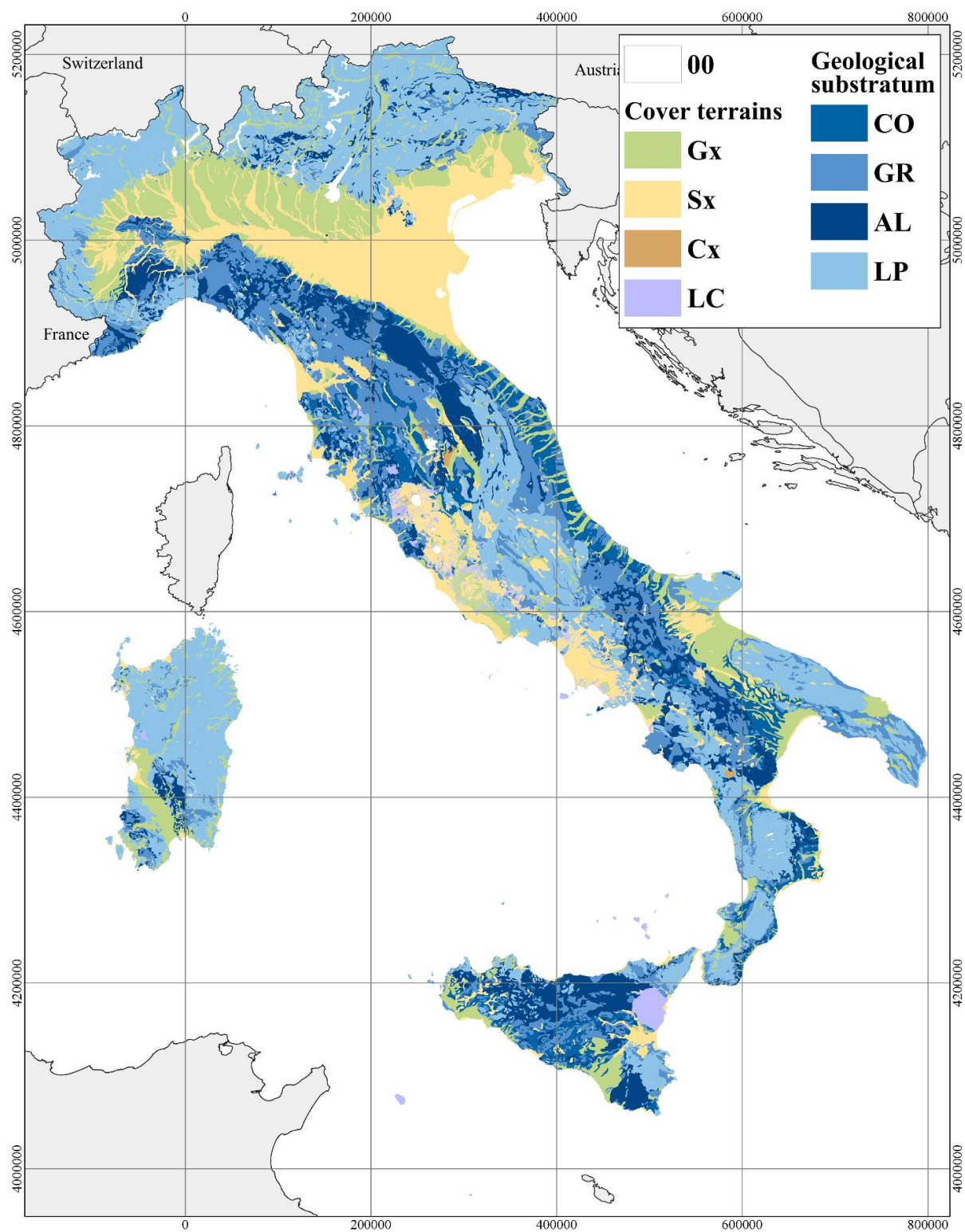


Figura 3-5 Carta geologica-tecnica nazionale. 00) Laghi e ghiacciai. Terreni di copertura - Gx) Depositi prevalentemente ghiaiosi; Sx) Depositi prevalentemente sabbiosi; Cx) Depositi prevalentemente argillosi; LC) Depositi litoidi. Substrato geologico - CO) Coesivo sovraconsolidato; GR) Granulare cementato; AL) Alternanza di litotipi; LP) Lapideo.

3.2 Scala Regionale

Fase 1: La carta geologica regionale

La realizzazione della carta geologico-tecnica regionale è preceduta, secondo il flusso di lavoro definito in precedenza (Figura 1-1), dalla realizzazione di una carta geologica regionale attraverso l'organizzazione delle unità geologiche di base in Gruppi Geologici e sub-Gruppi Geologici (Figura 3-6). La carta geologica di base utilizzata nella sperimentazione è rappresentata dalla carta alla scala 1:25.000, realizzata dalla Cassa per il Mezzogiorno (CASMEZ, 1967) e disponibile per tutta la Calabria in formato shapefile (Figura 3-7).

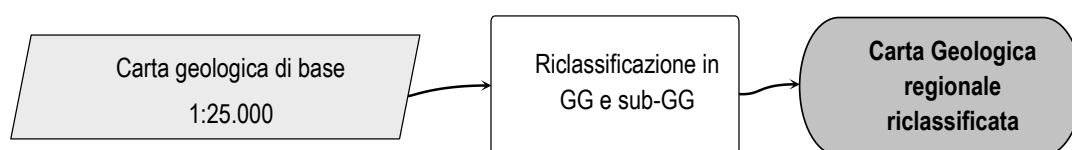


Figura 3-6 Diagramma di flusso delle fasi di realizzazione della carta geologica regionale.

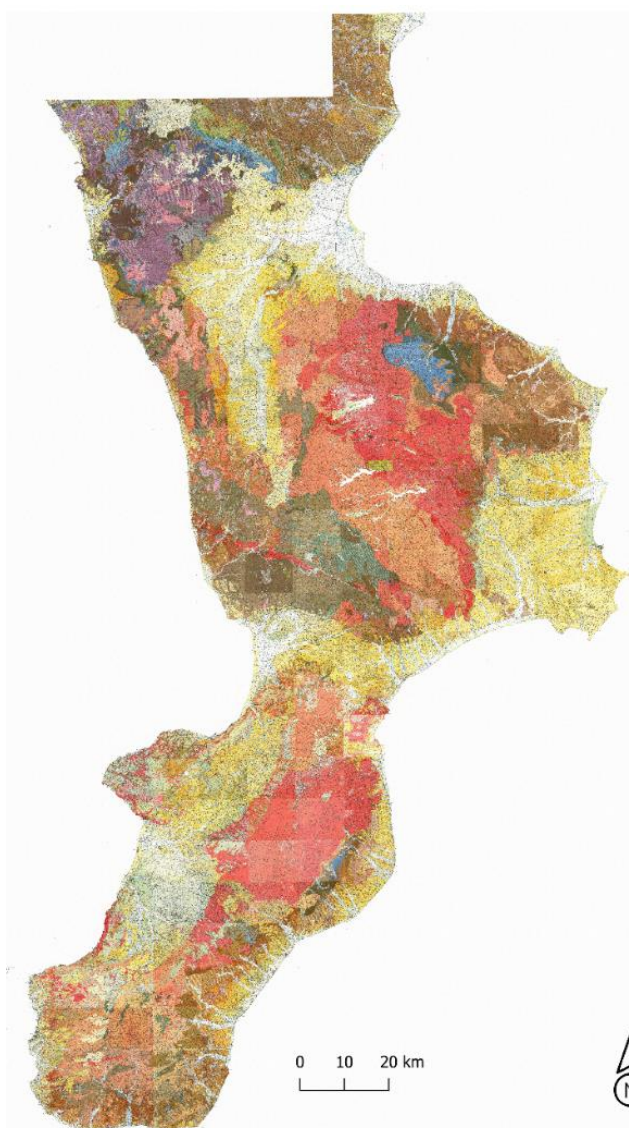


Figura 3-7 Carta geologica della Calabria 1:25.000 realizzata dalla Cassa per il Mezzogiorno (CASMEZ, 1967)

La carta CASMEZ, consistente in oltre 300 unità geologiche, è stata riclassificata seguendo lo schema della legenda standard di riferimento (Figura 2-3), ovvero raggruppando le unità geologiche nei 10 Gruppi Geologici (GG) in relazione all'età ed al dominio geologico di formazione e, all'interno di ogni gruppo, individuando dei sub-Gruppi Geologici (*sub-GG*) in relazione alla litologia o associazione geologica prevalente per i substrati, e in relazione alla granulometria ed all'ambiente deposizionale per i terreni di copertura. In Figura 3-8 è riportata la tabella di conversione in Gruppi e sub-Gruppi Geologici dei codici riferiti alle carte 1:25.000 CASMEZ.

Codice GG e sub-GG	Codici di riferimento sulla carta CASMEZ 1:25.000
0	dm
2a	q _{cl} -gl
2b	ac; af; q _{cl} ; dt; Q _{cl} s; q _{br} ; q _{cl} -c; P _s cl(q)-3; P _{cl} s(q)-3; sf _l (q); q _{cl} s; cdt; γ _l (q); sbg _l (q); q _d ; sb _l (q); sm _l (q); sf _l (q); γ _l (q); q _s cl-c
2c	q _s cl; q _s a
2d	a; q _{ss} ; Q _{as} ; q _s ; sb _l (M); sf _l (M); γ _l (M); q _a ; q _{tr} ; sbg _l (M); G _c (M); sbm _l (M); M _{ac} (M)-1.2; M _{ss} (M)-1.2
2e	Q _{cl} s; q _{cl} s; T _{dl} (q); M _{ar} (q)-2.3; P _a (q)-3; sbm _l (q); sf _l (q); sbg _l (q); γ _l (q); M _{cl} ar(q)-2.3; Q _{cl} ; sm _l (q); P _a (q)-1.2; P _{cl} (q)-1-2; k _l (q); sbg _l (P); P _s (q)-2.3; k _l (P); P _{cl} (P)-1.2; γ _l (q); M _s (P)-2.3; M _s (q)-2.3; M _l s(q)-3; P _s a(q)-1.2; M _l t(q)-3; P _{cl} (P)-1; P _{cl} s(q)-2.3; M _l t(P)-3; P _s (q)-1; γ _l m(q); P _a (q)-1.3; P _{cl} s(q)-1; M _a s(q)-2.3; P _a (q)-2.3; M _{cl} s(P)-2.3; P _s (q)-2.3; P _s (q)-2.3; P _{cl} s(q)-1.2; sb _l (q); P _s (q)-1.2; go _l (q); M _c ar(q)-2; M _{cl} (q)-1.2; M _s a(q)-2.3
2f	d-1; d-2; Q _s cl
2h	dtc; q _l ; q _{dt} ; Q _t
2x	df
3a	P _a -3; P _a cl-1; P _a -1.2; P _a s-3; P _{ss} -3; P _{ol} -3; P _a -2.3; P _{ss} -2.3; P _a -1.3; P _a s-2.3; P _{ms} -2.3; P _{ms} -2.3; P _m s-1.2
3b	P _s -3; P _s -1.2; P _{cl} ar-3; P _{cl} s-3; P _s cl-3; P _{cl} -3; P _s -2.3; P _{cl} s-1.2; P _s cl-1.2; P _s cl-2.3; P _c -3; P _s a-3; P _{ar} cl-2.3; P _{ar} s-2.3; P _{cl} -1.2; P _{cl} -1; P _s ar-1.2; P _s -1; P _s ar-2.3; P _{ar} -2.3; P _s a-2.3; P _c -2.3; P _{cl} s-2.3; P _s a-1.2; P _c -1.2; P _s cl-1; P _{cl} s-1; P _c ar-2.3; P _s -2.3; P _s -2.3; P _{cl} -2
4a	M _a ar-3; M _{af} -z; M _{ag} -z; M _a s-2.3; M _a -3; M _a ss-3; M _a s-3; M _{mf} -3; M _{mf} -2.3; M _{ar} a-2.3; M _{ss} ar-2.3; M _{ac} -3; M _{mf} g-3; m _a -3; M _{ss} -3; M _a s-g-2.3; M _a ss-2.3; M _a s-1.2; M _{ss} a-2.3
4b	M _{ar} cl-1.2; M _{ar} c-1.2; M _{cl} ar-2; M _{cl} ar-1.2; M _l t-3; M _{ar} cl-3; sg; M _g -3; M _{cl} -2.3; M _{cl} -3; M _c -3; M _{ar} -2.3; M _{ar} s-3; M _{ar} ss-3; m _{cl} -2.3; M _{ar} -3; M _c -2.3; P _{ar} s-3; M _s -3; M _s -2.3; E _{ar} m; E _{cl} ; M _c ; m _{cl} -3; M _c cl; E _m ; Ot _{ar} ; M _s cl-3; m _{arc} -2.3; M _{cl} ar-2.3; M _{ar} cl-2.3; M _{cl} s-2.3; M _c ar-2.3; M _{ar} s-2.3; M _{ss} -2.3; m _c -2.3; m _{cl} ; m _{cl} s-2.3; M _{ar} a-3; m _s ; M _{ar} s-1; M _{cl} s-1; M _{cl} s-3; O _{cl} ; M _a ss-g-3; M _l t-s-3; M _{cl} s-1.2; M _c ar-1; M _a ar-1.2; M _s -1.2; M _s cl-1.2; M _{ss} -1.2; M _{ar} -1.2; O _{ar} ; O _{ss} ; M _{cl} s-1A; M _c -1A; M _{cl} -2; M _s cl-2; M _{cl} -1.2; M _{ar} ss-1.2; M _c ar-2; M _{se} -1.2; M _s a-2.3
4c	M _a c-1; M _{ar} a-1.2; M _c -1.2; Q _{ol} -3; M _{ar} a-2.3; M _{ar} -2.3; M _a -2.3; M _t -2.3; M _g -2.3; M _l g-2.3; m _{cl} -2.3; M _{cl} -2.3; M _a ar-2.3; M _{cl} ar-2.3; M _{ac} -2.3; M _{ar} cl-2.3
5a	M _{ac} -2.3; G _{am} ; M _{ac} -1.2
5c	M _{af} -1
5d	O _{tc} -2; O _{tc} -1; O _{tcc} ; O _{tc} -4; O _{tc} -3
6	M _c -1; M _c a-1; C _c -2.3; M _{dl} -z; M _c -z; C-3E _{cl} ; T _{dl} ; EPC _{br} ; C _{dl} -2.3; G _c ; C _c -1.2; C _{dl} -1.2; G _c -1; G _{dl} ; T _c ; C _{af} -2.3; G _{af} ; T _{af} ; T _{ss} ; C _c -1; T _{br} ; G _c -2; G _{cm} ar-1; G _c ar-1; g _{cl} s-1; G _c cl-1; t _{ar} s-3; O _c ; G _c -3; O _s
9	p; sTF; scf; sFL; sf; Ss; cc; sfe; sbm; sbg; ggr; sf; v _β ; sf _l (qz); μ _β ; sb; sfcl; sm; g; sfys; Qt; go; sFS; sfv; st; gm
10	β; γ; k; π; γ _c ; A; γ _{fg} ; φ; q _z ; γ _l ; f; λ; δ; s; i; γ _m

Figura 3-8 Tabella di conversione in GG e Sub-GG dei codici relativi alla carta di base CASMEZ 1:25.000.

La Figura 3-9 mostra il risultato di questo processo rispetto al quale è interessante fare alcune considerazioni. La legenda è quella standard di riferimento utilizzata anche per la carta geologica nazionale (Figura 2-3, Figura 3-4) con qualche eccezione. Nella fattispecie, in Calabria non affiorano terreni di copertura vulcanica recente (Gruppo Geologico 1) e unità appartenenti ai gruppi 7 (*Vulcaniti antiche*) ed 8 (*Unità sedimentarie pre-triassiche*).

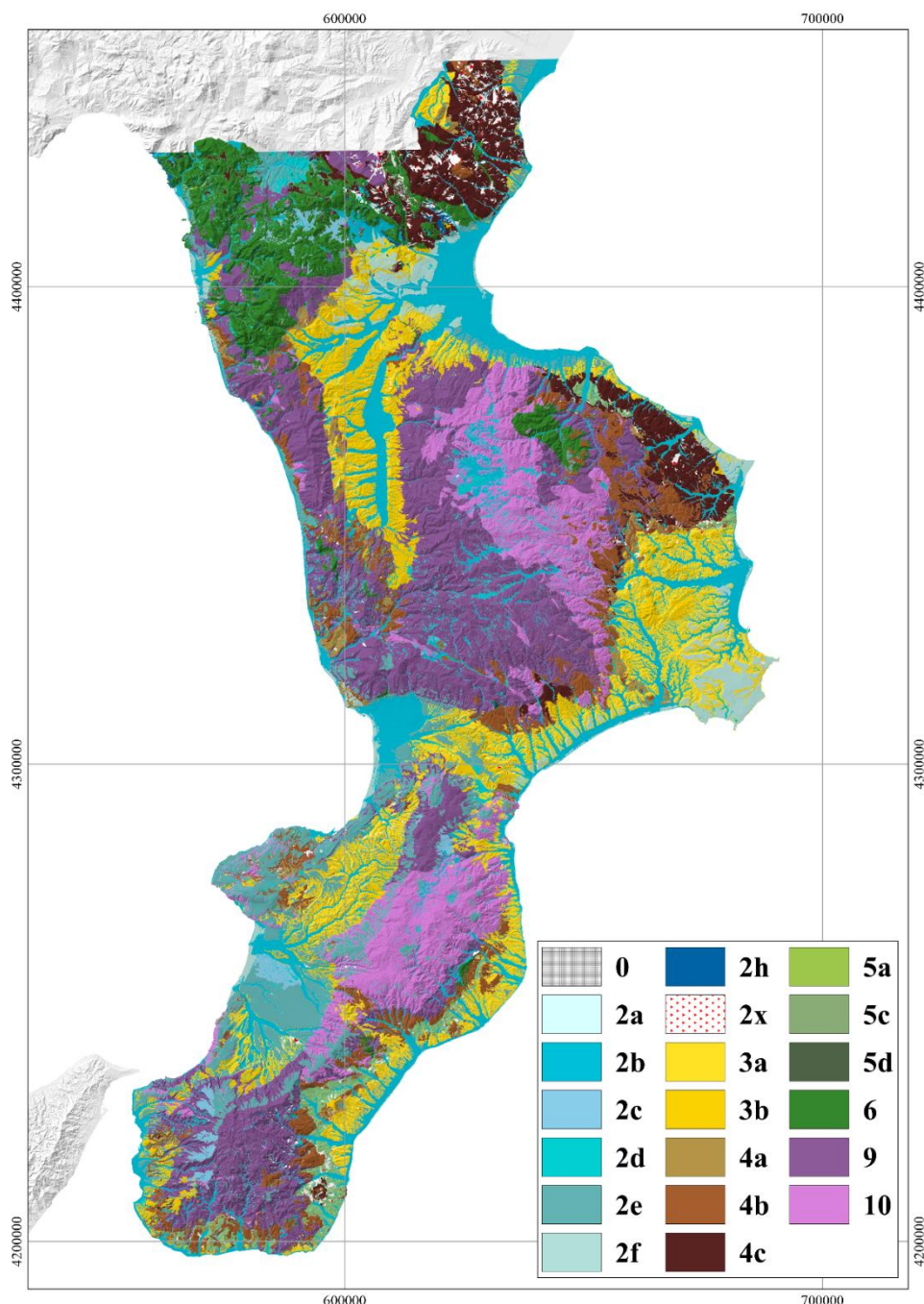


Figura 3-9 Carta geologica della Calabria derivante dalla riorganizzazione della carta CASMEZ 1:25.000 in gruppi (GG) e sub-gruppi (sub-GG) geologici utilizzando la legenda standard di riferimento (Figura 2-3). Unità sedimentarie quaternarie - 2a) Ghiaie e sabbie (ambienti glaciali); 2b) Ghiaia e sabbia; 2c) Sabbie, argille e ghiaie; 2d) Argille e limi; 2e) Ghiaie e sabbie (depositi eolici, costieri e marini); 2f) Sabbie; 2h) Depositi fortemente cementati; 2x) Depositi franosi indifferenziati. Unità marine e continentali di riempimento di bacino - 3a) Argille, marne e arenarie; 3b) Arenarie e conglomerati. Unità torbiditiche sinorogene (Flysch) - 4a) Argille e arenarie; 4b) arenarie, conglomerati, argille e gessi; 4c) Arenarie, argille e marne. Unità bacinali mesozoico-terziarie - 5a) Argille e marne; 5c) Calcare, marne, argille e arenarie; 5d) Calcare e marne. Unità di piattaforma carbonatica mesozoico-terziaria - 6) Calcare, dolomie, marne e argille. Unità metamorfiche - 9) Scisto, fillite, gneiss, marmo, ecc. Unità cristalline e vulcaniche pre-triassiche -10) Graniti, gabbri, lave, ignimbriti, ecc.

Fase 2: Codifica dei Gruppi Geologico-Tecnici (GGT)

La seconda fase di realizzazione della carta geologico-tecnica regionale, analogamente a quanto fatto per la geologico-tecnica nazionale (§2), consiste nell'associare ad ogni Gruppo Geologico e sub-Gruppo Geologico individuato, la sigla del Gruppo Geologico-Tecnico (GGT) di appartenenza, sia per i terreni di copertura (Gx, Sx, Cx, LC) che per i substrati geologici (LP, CO, AL, GR). Le sigle dei GGT di substrato e di copertura sono state assegnate tenendo presente quanto stabilito nella legenda standard di riferimento (Figura 2-3) secondo lo schema riportato in Figura 3-10.

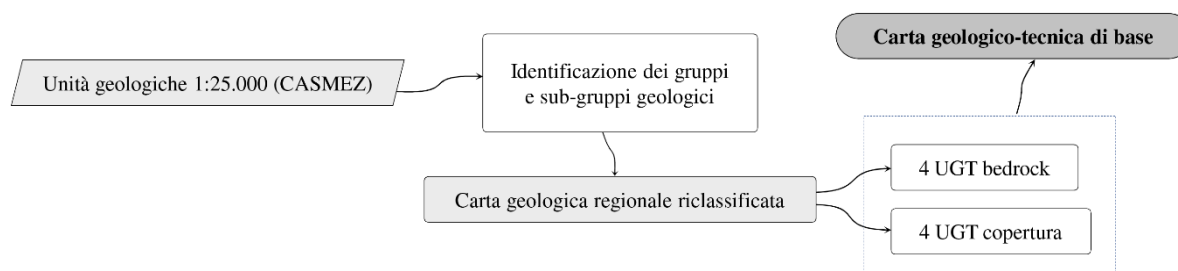
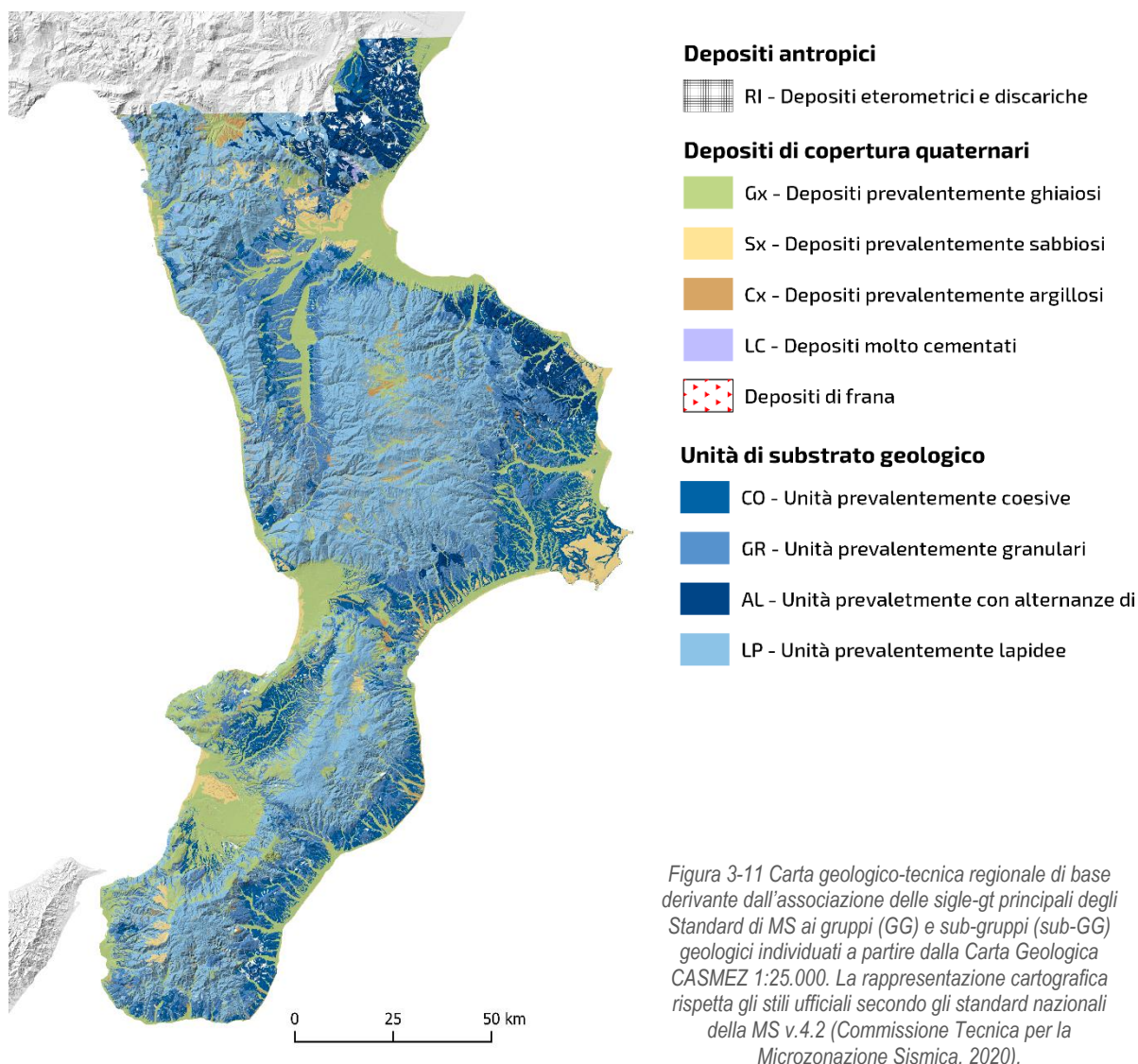


Figura 3-10 Diagramma di flusso delle fasi di realizzazione della carta geologico-tecnica regionale utilizzando i GGT.

La Figura 3-11 mostra il risultato dell'elaborazione.









Fase 3 Codifica delle Unità Geologico-Tecniche (UGT)

Con lo scopo di incrementare il dettaglio litologico-informativo ed arrivare ad una carta gt di dettaglio, i GGT finora utilizzati sono stati suddivisi considerando le singole Unità Geologico-Tecniche (UGT) che li componevano, così come riportate negli standard della MS (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, 2020) (Figura 3-12). Allo stesso tempo, al fine di ottenere un risultato cartografico omogeneo a scala regionale e rendere l'assegnazione delle UGT per i terreni di copertura (GG1 – GG2) univoca e riproducibile, si è scelto di realizzare una matrice che mette in relazione le UGT, l'ambiente di formazione ed il sub-Gruppo Geologico di appartenenza (Figura 3-13).

La matrice riporta lungo l'asse orizzontale i principali ambienti deposizionali e lungo l'asse verticale i sub-GG. In relazione all'ambiente deposizionale ed alla granulometria prevalente, è possibile assegnare una univoca UGT al deposito. Le UGT inserite nella matrice sono il risultato di analisi statistiche condotte sul DB-MS (www.webms.it) sul parametro riguardante

l'ambiente genetico deposizionale, ed in particolare sulle sigle gt assegnate in prevalenza ai depositi ascrivibili ai diversi ambienti.

Terreni di copertura		
	RI	Terreni contenenti resti di attività antropica
	GW	Ghiaie pulite con granulometria ben assortita, miscela di ghiaia e sabbie
	GP	Ghiaie pulite con granulometria poco assortita, miscela di ghiaia e sabbia
	GM	Ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo
	GC	Ghiaie argillose, miscela di ghiaia, sabbia e argilla
	SW	Sabbie pulite e ben assortite, sabbie ghiaiose
	SP	Sabbie pulite con granulometria poco assortita
	SM	Sabbie limose, miscela di sabbia e limo
	SC	Sabbie argillose, miscela di sabbia e argilla
	OL	Limi organici, argille limose organiche di bassa plasticità
	OH	Argille organiche di media-alta plasticità, limi organici
	MH	Limi inorganici, sabbie fini, limi micacei o diatomitici
	ML	Limi inorganici, farina di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità
	CL	Argille inorganiche di medio-bassa plasticità, argille ghiaiose o sabbiose, argille limose, argille magre
	CH	Argille inorganiche di alta plasticità, argille grasse
	PT	Torbe ed altre terre fortemente organiche
	LC	Litoide di copertura





















Substrato geologico		
	IS	Incoerente o poco consolidato
	LP	Lapideo
	GR	Granulare cementato
	CO	Coesivo sovraconsolidato
	AL	Alternanza di litotipi
	ISS	Incoerente o poco consolidato, stratificato
	LPS	Lapideo, stratificato
	GRS	Granulare cementato, stratificato
	COS	Coesivo sovraconsolidato, stratificato
	ALS	Alternanza di litotipi, stratificato
	SFIS	Incoerente o poco consolidato fratturato / alterato
	SFLP	Lapideo fratturato / alterato
	SFGR	Granulare cementato fratturato / alterato
	SFCO	Coesivo sovraconsolidato fratturato / alterato
	SFAL	Alternanza di litotipi fratturato / alterato
	SFIS	Incoerente o poco consolidato, stratificato fratturato / alterato
	SFLPS	Lapideo, stratificato fratturato / alterato
	SFGRS	Granulare cementato, stratificato fratturato / alterato
	SFCOS	Coesivo sovraconsolidato, stratificato fratturato / alterato
	SFALS	Alternanza di litotipi, stratificato fratturato / alterato

Figura 3-12 Tipologie di substrato geologico e di terreni di copertura secondo gli standard della MS v4.2 (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, 2020).

	Ambiente vulcanico		Ambiente Glaciale	Ambiente di versante, fluviale, lacustre, palustre e carsico										Ambiente eolico, costiero, di delta e marino				
	Sub_G	Granulometria prevalente		Depositi alluvionali (torrentizi)	Depositi fluviali dei corsi d'acqua attuali	Depositi di piana alluvionale		Terrazzi alluvionali		Depositi eluvio/colluviali e residuali	Conoidi	Detrito di falda	Depositi lacustri	Depositi palustri	Depositi marino / costieri	Terrazzi marini	Dune costiere	Depositi di piana deltizia
						antichi	recenti	antichi	recenti (1° ordine)									
Ambiente vulcanico	1a	Litoidi	LC															
	1b	Sabbiosi	Sx															
	1c	Ghiaiosi	Gx															
	1d	Argilosi	Cx															
Ambiente Glaciale	2a	Ghiaiosi	Gx	GM														
	2b	Ghiaiosi	Gx		GW	GM		GC	GC	GM	GW	GW						
	2c	Sabbiosi	Sx		SM	SM		SW	SW	SW/SM	SW/SM		SM					
	2d	Argilosi	Cx		CL	CL		CL	CL	ML			CL	OL				
Ambiente eolico, costiero, di delta e marino	2e	Ghiaiosi	Gx												GP	GP		
	2f	Sabbiosi	Sx												SP	SW	SP	
	2g	Argilosi	Cx												ML	CL		CL
Tutti gli ambienti (depositi molto cementati e.g. travertini)	2h	Litoidi	LC					LC				LC			LC	LC		
Unità Geologico-Tecniche (UGT)																		

Figura 3-13 Matrice degli ambienti genetico-deposizionali.

La Figura 3-14 mostra la Carta Geologico-Tecnica regionale di dettaglio (CGTR), risultato del procedimento finora descritto.

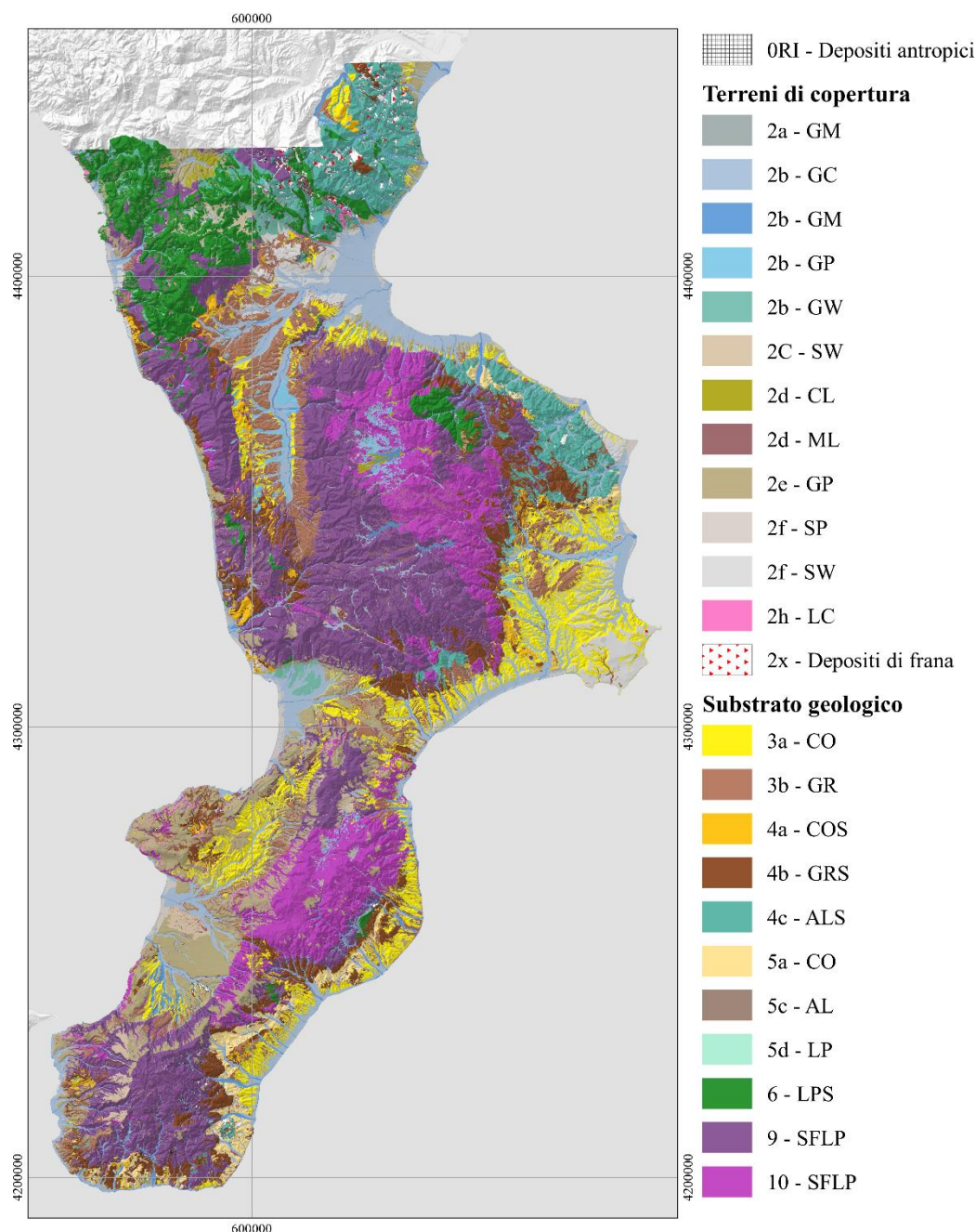


Figura 3-14 Carta geologico-tecnica regionale di dettaglio, derivante dall'associazione mediante la matrice degli ambienti delle sigle-gt degli standard di MS ai gruppi (GG) e sub-gruppi (sub-GG) geologici individuati a partire dalla Carta Geologica CASMEZ 1:25.000.

Il prodotto così realizzato garantisce un'omogeneità dei dati (stesse sigle-gt per le medesime unità geologiche e per le stesse tipologie di deposito) non solo a scala comunale (come avviene per gli studi di MS) ma anche a scala regionale e, di conseguenza, anche a scala di Contesto Territoriale. Oltre a ciò, il prefisso relativo alla sigla del GG garantisce l'univocità delle sigle e la posizione cronostratigrafica dei litotipi.

3.3 La carta geologico-tecnica di Contesto Territoriale

La carta geologico-tecnica di Contesto Territoriale (CT) rappresenta l'ultimo livello al quale si è spinta l'analisi e rappresenta il livello territoriale interposto tra la carta regionale di dettaglio (CGTR) descritta al paragrafo precedente (§3.2), e gli studi di MS che vengono realizzati a scala comunale.

Nella carta a scala di CT, le unità gt individuate a scala regionale possono essere ulteriormente distinte nel caso in cui per motivi stratigrafici (intercalazioni) o tettonici (raddoppi), esse si ripetono a diverse altezze all'interno del *multilayer*. La costruzione di una “*colonna stratigrafica di CT*”, oltre a rappresentare in modo semplificato i rapporti stratigrafici tra le unità gt, evita anche una loro possibile ripetizione.

L'applicazione della procedura è stata realizzata sul CT del Comune di Cariatì (CS). Le porzioni dell'unità ripetuta geometricamente sono state distinte associando un pedice di tipo numerico alla sigla gt (Figura 3-15). Di conseguenza, la carta geologico-tecnica di CT è stata realizzata seguendo le indicazioni fornite dalla colonna stratigrafica guida attraverso la distinzione delle unità gt in relazione alla loro posizione geometrica (Figura 3-16).

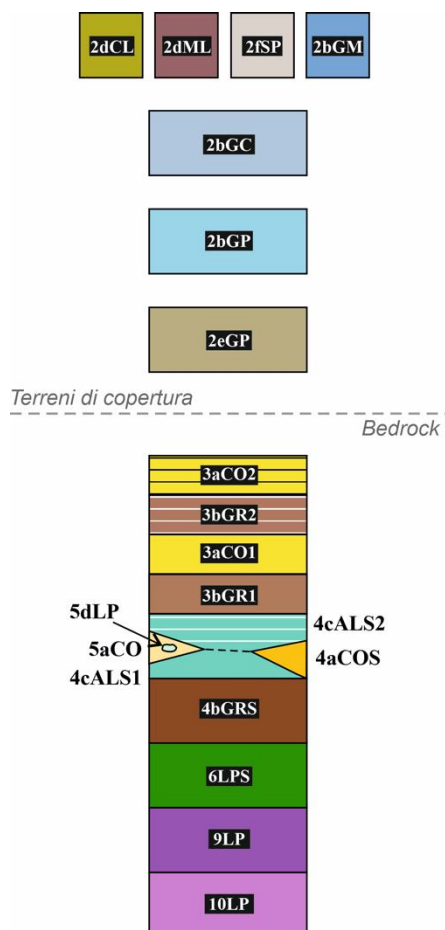


Figura 3-15 Rapporti stratigrafici tra le unità gt nel CT di Cariatì.

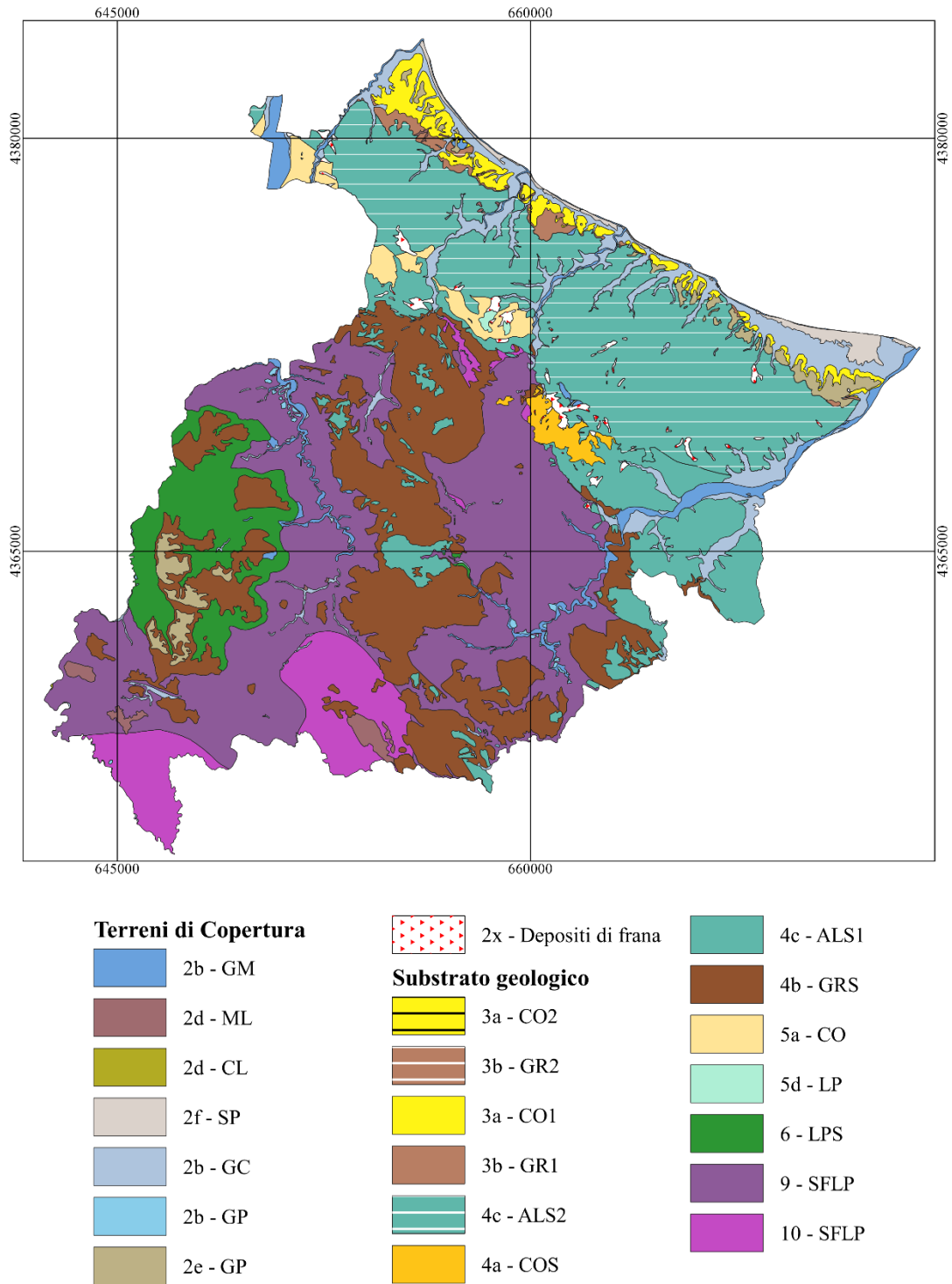


Figura 3-16 Carta geologico-tecnica del CT di Cariati. Le unità gt sono state ulteriormente distinte in relazione alla posizione geometrica assunta limitatamente all'area del CT.

Per la carta CGT di CT si è inoltre cercato di rappresentare in modo semplificato i rapporti geometrici tra le singole unità affioranti all'interno del CT e quelle immediatamente al di sotto o comprese nei primi 50m di profondità. L'obiettivo principale è stato quello di fornire una rappresentazione esaustiva ed allo stesso tempo di facile lettura di tutte le possibili colonne stratigrafiche ricostruibili all'interno del CT considerato. A tale scopo è stata realizzata la rappresentazione in forma matriciale di Figura 3-17.



La matrice di Figura 3-17 riporta, lungo l'asse verticale, tutti i litotipi presenti all'interno del CT in ordine cronostratigrafico ed in relazione ai possibili raddoppi o intercalazioni, e, lungo la diagonale, le unità *gt* in affioramento nel CT considerato (in questo caso, tutte le unità si trovano anche in affioramento oltre che in successione stratigrafica). La matrice deve essere letta in corrispondenza di ogni unità *gt* affiorante e, proseguendo lungo la verticale, attraverso la simbologia, leggerne i rapporti con le unità che si trovano in posizione geometrica più bassa. Prendendo ad esempio l'unità *gt* in affioramento (lungo la diagonale) “2dML”, proseguendo verso il basso, vediamo che questa può trovarsi a diretto contatto (simbolo ●) con le unità “2bGC”, “3CO₁”, “3GR₁”, “4ALS₂”, “9SFLP” e “10SFLP”. In particolare, il prefisso “SF” fratturato/alterato per le Unità 9LP e 10LP è suggerito dal simbolo — (**bordo spesso**), che indica la presenza di uno strato di alterazione al di sopra dell'unità considerata. In definitiva, la sovrapposizione di “2dML” con ognuna di queste unità configura 6 possibili colonne stratigrafiche riscontrabili all'interno del CT. Inoltre lungo la colonna di “2dML”, il simbolo ■ in corrispondenza dell'unità “2bGC”, rappresenta la possibile interposizione di questa unità tra l'unità in affioramento (“2dML”) e l'unità in corrispondenza del simbolo ■ (“9SFLP”). Di conseguenza, un'ulteriore colonna stratigrafica riscontrabile all'interno del CT in corrispondenza degli affioramenti di “ML” sarà data da “2dML” su “2bGC” su “9SFLP”. Riassumendo, la lettura della prima colonna riferita all'affioramento di “ML” permette di rappresentare un totale di 7 possibili colonne stratigrafiche.

Definizione di metodi avanzati di valutazione della qualità delle indagini e dei risultati degli studi di MS

2fSP	2fSP	2fSP	2fSP	2fSP
2bGC	2bGC	2bGC	2bGC	2bGC
	3CO ₂	3GR ₂	3CO ₁	3GR ₁

4 Realizzazione di carte Tematiche di Contesto Territoriale: La carta delle Aree a Risposta Sismica Omogenea (ARSO)

Analogamente a quanto si fa per gli studi di MS di livello comunale attraverso la realizzazione della carta delle MOPS, anche in questo caso, con le dovute eccezioni derivanti dalla scala cartografica alla quale si opera, viene proposto un approccio semplificato per la delimitazione delle Aree con Risposta Sismica Omogenee (ARSO) all'interno di un Contesto Territoriale. Le ARSO rappresentano quelle aree in cui l'omogeneità stratigrafica, assunta tale in termini di comportamento dinamico dei depositi caratterizzanti il sottosuolo, permette la definizione di colonne stratigrafiche semplificate da sottoporre a simulazione numerica monodimensionale per la determinazione del coefficiente di amplificazione (FA).

Utilizzando i risultati delle analisi statistiche condotte sul DB della MS e descritte alla sezione precedente (SEZIONE 1 - Analisi statistiche tecniche avanzate sul parametro Vs estratto dal DB_MS, e sulle proprietà dinamiche associate alle unità geologico-tecniche), ed in particolare ai paragrafi 4, e 4.2.3, le unità geologico-tecniche del Contesto territoriale di Cariatì sono state classificate, in relazione alla variabilità della Vs con la profondità, in tipologie dinamiche. Nella fattispecie sono stati definiti 4 gruppi tipologici dinamici relativi ai terreni di copertura e 3 relativi ai substrati geologici (Figura 4-1, e Figura 4-12, Figura 4-13, Figura 4-16, Figura 4-17 della sezione 1).

Depositi	tipologie	Unità gt
Depositi di copertura	g	LC
	f	CX (- ML - MH)
	e	SX + ML + MH
	d	GX + RI
Substrato geologico	C	SFGR + SFCOS + SFAL + SFGRS + SFCO + COS
	B	CO + GR + GRS + AL + ALS + SFALS
	A	LP + SFLP + LPS + SFLPS

Figura 4-1 Accorpamento delle Unità geologico-tecniche in gruppi tipologici sulla base delle proprietà dinamiche.

La Figura 4-1 riporta a destra l'elenco delle unità gt accomunate dalla variabilità del parametro Vs con la profondità, ed alle quali è stata associata una sigla di gruppo tipologico (A, B, C per i substrati e d, e, f, g per i terreni di copertura). La classificazione delle UGT del CT di Cariatì secondo i gruppi tipologici, porta ad una semplificazione sia nella rappresentazione cartografica sia nella matrice dei rapporti geometrici di CT (Figura 4-2, Figura 4-3).



Dalla carta delle tipologie dinamiche di terreni di copertura e substrati geologici affioranti (Figura 4-2), seguendo le possibili combinazioni geometriche suggerite dalla matrice di CT (Figura 4-3), è possibile perimetrare le Aree a Risposta Sismica Omogenea (ARSO) in corrispondenza delle aree che interessano il sistema minimo di gestione dell'emergenza del CT di Cariatì (Figura 4-4). A tali aree sono state associate le relative colonne di riferimento che riportano la successione geometrica delle unità ed il loro spessore minimo e massimo (Figura 4-5).

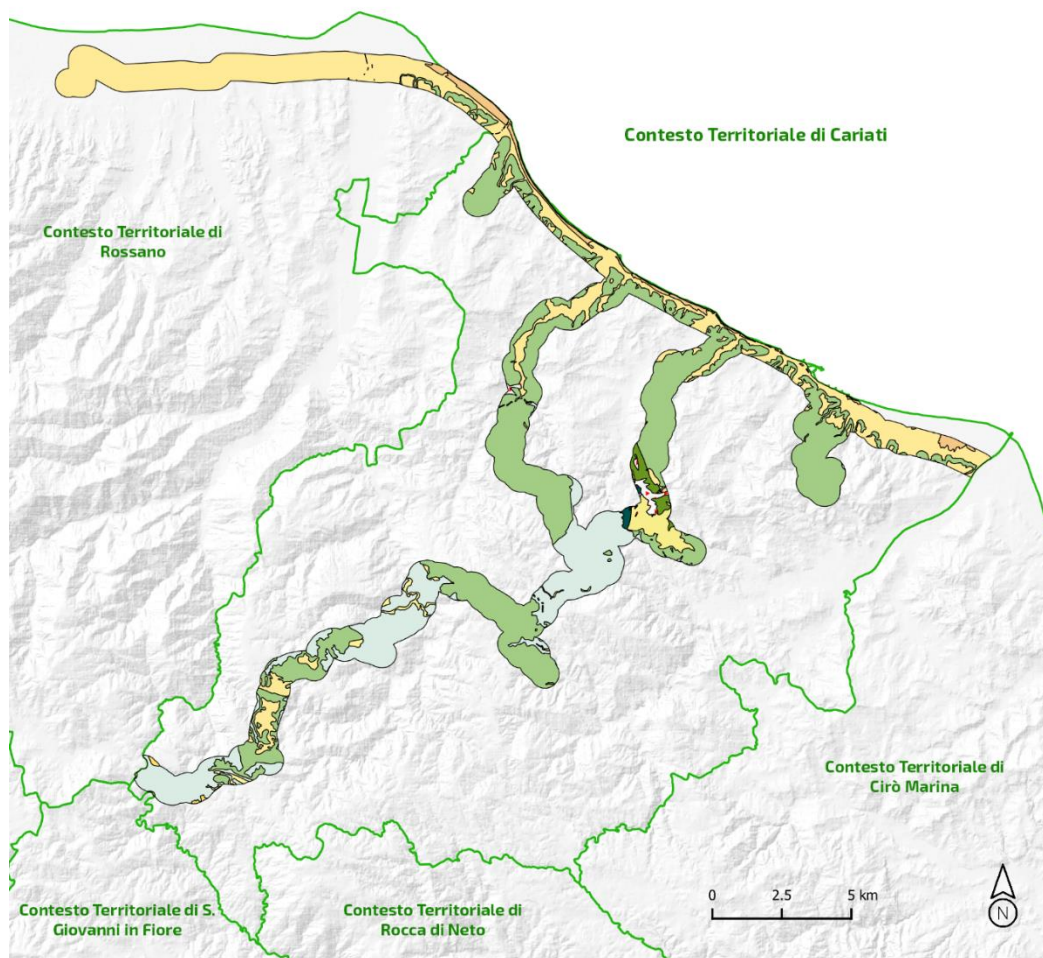


Figura 4-4 Perimetrazione delle Aree a Risposta Sismica Omogenea (ARSO) per il sistema di gestione dell'emergenza del CT di Cariatì

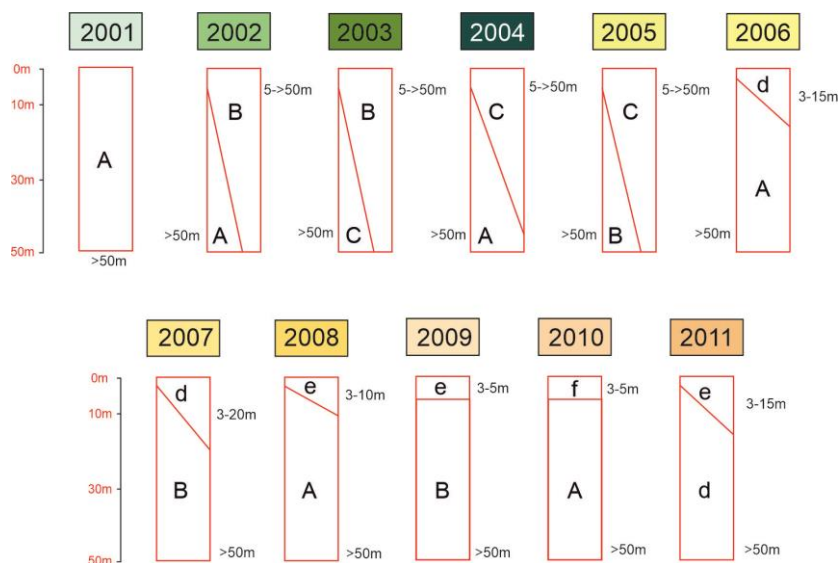


Figura 4-5 Colonne delle relazioni geometriche tra le unità dinamiche per le ARSO del sistema minimo di gestione delle emergenze del CT di Cariatì

5 Conclusioni

La metodologia proposta rappresenta un primo tentativo per standardizzare il processo di creazione di carte geologiche e geologico-tecniche multiscala, ed ottenere un risultato omogeneo e confrontabile nei limiti della scala cartografica utilizzata.

Le principali caratteristiche del metodo proposto riguardano:

- i) La costruzione e l'utilizzo di una legenda standard di riferimento comune che mette in relazione i Gruppi Geologici – Sub-Gruppi Geologici – Gruppi Geologico-Tecnici;
- ii) La matrice bidimensionale degli ambienti che permette di assegnare una univoca e predefinita Unità Geologico-Tecnica ai Sub-Gruppi Geologici di copertura in relazione all'ambiente deposizionale;
- iii) La carta nazionale alla scala 1:500.000 che insieme ai succitati elementi rappresenta un riferimento per la realizzazione di carte a più grande rapporto di scala.

La carta geologico-technica regionale con rappresentazione in Unità geologico-techniche (UGT), unita ai parametri geologico-technici (vedi Sezione 1) può appresentare una base cartografica per lo studio delle pericolosità geologiche su area vasta. Allo stesso modo, l'aumento del dettaglio informativo alla scala di CT, attraverso la ricostruzione dei rapporti geometrici tra le UGT interne al CT, permette di risalire alle possibili configurazioni delle unità nel sottosuolo, facilitando l'individuazione e la perimetrazione di aree stratigraficamente omogenee dal punto di vista della risposta sismica. Da qui, la possibilità di calcolare il valore dei Fattori di Amplificazione (FA) per queste aree utilizzando le colonne di riferimento definite e la variabilità dei parametri (Sezione 1).

6 Bibliografia

- Amanti M., Battaglini L. et al., 2007.** La Carta Litologica d'Italia alla scala 1:100.000. Atti 11ª Conferenza Nazionale ASITA, Centro Congressi Lingotto, Torino 6 – 9 novembre 2007, <http://atti.asita.it/Asita2007/Pdf/119.pdf>.
- Bigi G., Castellarin A., Coli M., Dal Piaz G.V. & Vai G.B., 1990.** Structural Model of Italy scale 1:500.000. C.N.R., Progetto Finalizzato Geodinamica, SELCA Firenze.
- Bonardi G., D'Argenio B. & Perrone V., 1988.** Carta Geologica dell'Appennino Meridionale (scala 1: 250.000). Atti del 74° Congresso della Società geologica Italiana, Sorrento 13 -17.
- Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, 2020.** Graphic and data archiving standards. Version 4.2. Department of Civil Protection of the Presidency of the Council of Ministers. Rome.
http://www.protezionecivile.gov.it/documents/20182/823803/StandardMS_4_2/b29f758c-c15a-4256-a1c9-957ef100dc4b.
- Cassa per il Mezzogiorno, 1967.** Carta Geologica della Calabria 1:25000. Poligrafica e carte valori, Ercolano (NA).
- Compagnoni B., Galluzzo, Bonomo R., Capotorti F., D'Ambrogi C., Di Stefano R., Graziano R., Martarelli L., Pampaloni M.L. F., Pantaloni M., Ricci V., Tacchia D., Masella G., Pannuti V., Ventura R. & Vitale V, 2011.** Carta Geologica d'Italia in scala 1:1.000.000. Servizio Geologico d'Italia (ISPRA). S.EL.CA., Firenze.
- Conti P., Cornamusini G. & Carmignani L., 2020.** An outline of the geology of the Northern Apennines (Italy), with Geological Map at 1:250,000 scale. Italian Journal of Geosciences, 139 (2), 149-194. <https://doi.org/10.3301/IJG.2019.25>.
- DPC, Dipartimento della Protezione Civile, 2018.** Commissione tecnica per il supporto e monitoraggio degli studi di Microzonazione Sismica (ex art.5, OPCM3907/10), (2018) – WebMs; WebCLE. A cura di: Maria Sole Benigni, Fabrizio Bramerini, Gianluca Carbone, Sergio Castenetto, Gian Paolo Cavinato, Monia Coltella, Margherita Giuffrè, Massimiliano Moscatelli, Giuseppe Naso, Andrea Pietrosante, Francesco Stigliano. www.webms.it.
- Kumar, Shiv Shankar, et al.** "Importance of Site-Specific Dynamic Soil Properties for Seismic Ground Response Studies: Ground Response Analysis." IJGEE vol.9, no.1 2018: pp.78-98. <http://doi.org/10.4018/IJGEE.2018010105>
- Lentini F. & Carbone S., 2014.** Carta Geologica della Sicilia in scala 1:250.000. Mem. Descr. Carta Geol. d'It. XCV (2014), pp. 7-414.
- Mori F., Gena A., Mendicelli A., Naso G., Spina D., 2020.** Seismic emergency system evaluation: The role of seismic hazard and local effects. Engineering Geology 270 (2020) 105587. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105587>.
- Pantaloni M., Bonomo R., Capotorti F., Compagnoni B., D'Ambrogi C., Di Stefano R., Galluzzo F., Graziano R., Martarelli L., Pampaloni M.L., Ricci V., 2006.** La nuova Carta Geologica d'Italia alla scala 1:500.000. Memorie descrittive Carta geologica d'Italia. 01. 113-114.
- Patacca, E. & Scandone, P., 2007.** Geology of the Southern Apennines. Bollettino Società Geologica Italiana. Special Issue 7, 75–120.

Patacca, E. & Scandone, P., 2001. Late thrust propagation and sedimentary response in the thrust-belt-foredeep system of the Southern Apennines (Pliocene-Pleistocene). In: Vai, G.B., Martini, I.P. (Eds.), *Anatomy of an Orogen: the Apennines and the Adjacent Mediterranean Basins*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherland, pp. 401–440.

Pon Governance 2014-2020 Rischio sismico e vulcanico. Attività CAL_F1.1 - Affiancamento per la definizione di obiettivi minimi e di linee guida per la programmazione degli interventi in materia di riduzione del rischio ai fini di protezione civile: Analisi dei fabbisogni e individuazione dei contesti territoriali.

Regione Calabria DGR n. 498 del 25 ottobre 2019. Prevenzione del rischio sismico. Adozione documento Contesti Territoriali e Comuni di Riferimento della Regione Calabria redatto dal Dipartimento Nazionale Protezione Civile. Revoca DGR n. 408 del 24.10.2016. https://www.regione.calabria.it/website/portalmedia/decreti/2020-03/DGR_2019_498.zip.

SM Working Group, 2015. Guidelines for Seismic Microzonation (English Version). Rome. http://www.protezionecivile.gov.it/httpdocs/cms/attach_extra/GuidelinesForSeismicMicrozonation.pdf.

SM-WG, (2008) Guidelines for Seismic Microzonation, Conference of Regions and Autonomous Provinces of Italy–Civil Protection Department, Rome. 3 vol. and DVD. English edition published online in 2015. <https://www.centromicrozonazioneismica.it/it/download/category/9-guidelines-for-seismic-microzonation>.

Vezzani, L., & Ghisetti, F., 1998. Carta Geologica dell'Abruzzo, Scala 1:100.00, Foglio 2, Regione Abruzzo, Settore Urbanistica-Beni ambientali e culturali, S.E.L.C.A., Firenze.

Vezzani L, Ghisetti F, Festa A, Follador U, 2004. Carta Geologica del Molise. Regione Molise. S.E.L.C.A., Firenze.