

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



DIREZIONE TECNICA
S.O. Geologia Tecnica, dell'Ambiente e del Territorio

PROGETTO DEFINITIVO

**LINEA PALERMO – MESSINA. RADDOPPIO FIUMETORTO – CEFALU'
CASTELBUONO. TRATTA OGLIASTRILLO - CASTELBUONO**

Fermata Cefalù –Rampa di accesso alla galleria di sfollamento

**RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA ED
IDROGEOLOGICA**

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

RS7B 00 D 69 RG GE0001 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	ARES	novembre 2022	M. Scarpelli <i>Mario Scarpelli</i>	novembre 2022	A. Barreca <i>A. Barreca</i>	novembre 2022	M. Comedini Novembre 2022
								 n. Elab

File: RS7B00D69RGGE0001001A.docx

n. Elab

INDICE

1	PREMESSA	4
2	NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	6
2.1	NORMATIVA NAZIONALE E TECNICA.....	6
2.2	NORMATIVA COMUNITARIA.....	6
2.3	NORMATIVA REGIONALE	6
3	DATI DI BASE	7
3.1	ALLEGATI.....	7
3.2	DOCUMENTAZIONE PREGRESSA	7
4	ASSETTO GEOLOGICO-STRUTTURALE REGIONALE	10
4.1	EVOLUZIONE GEOLOGICA	13
4.2	CARATTERISTICHE STRATIGRAFICHE	14
4.3	CARATTERISTICHE STRUTTURALI	17
5	INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO	20
6	INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO.....	22
7	INDAGINI GEOGNOSTICHE	25
7.1	SONDAGGI GEOGNOSTICI	26
7.2	POZZETTI ESPLORATIVI.....	28
7.3	INDAGINI GEOFISICHE	28
8	MODELLO GEOLOGICO-TECNICO DI RIFERIMENTO	29
8.1	UNITÀ LITOSTRATIGRAFICHE.....	29
8.1.1	<i>Unità Panormidi.....</i>	29
8.1.2	<i>Unità del Flysch Numidico.....</i>	29
8.1.3	<i>Unità Sicilidi.....</i>	30

8.1.4	Terreni di copertura	30
8.2	DIFFERENZE RISPETTO ALLE CARTOGRAFIE ESISTENTI.....	31
8.3	LIVELLI PIEZOMETRICI.....	32
8.4	CARATTERISTICHE DI PERMEABILITÀ.....	34
9	GEOMORFOLOGIA DELL'AREA	38
9.1	PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO REGIONE SICILIA	39
9.2	INVENTARIO DEI FENOMENI FRANOSI IN ITALIA (IFFI).....	40
10	SISMICITÀ DELL'AREA	42
10.1	SISMICITÀ REGIONALE	42
10.2	CLASSIFICAZIONE SISMICA E PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE	43
10.3	SISMICITÀ STORICA	46
10.4	SORGENTI SISMOGENETICHE.....	49
10.5	MAGNITUDO DI RIFERIMENTO.....	51
10.6	FAGLIE CAPACI.....	52
10.7	PARAMETRI PER LA DETERMINAZIONE DELL'AZIONE SISMICA DI RIFERIMENTO.....	53
10.7.1	Categoria di sottosuolo	53
10.8	CONSIDERAZIONI PRELIMINARI DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE	54
11	CONCLUSIONI.....	58
12	BIBLIOGRAFIA.....	60

1 PREMESSA

Nell'ambito del Progetto Definitivo per l'esecuzione dello studio "Fermata Cefalù –Rampa di accesso alla galleria di sfollamento" sono stati effettuati i rilievi e gli approfondimenti propedeutici alla redazione degli elaborati di sintesi previsti dal progetto stesso.

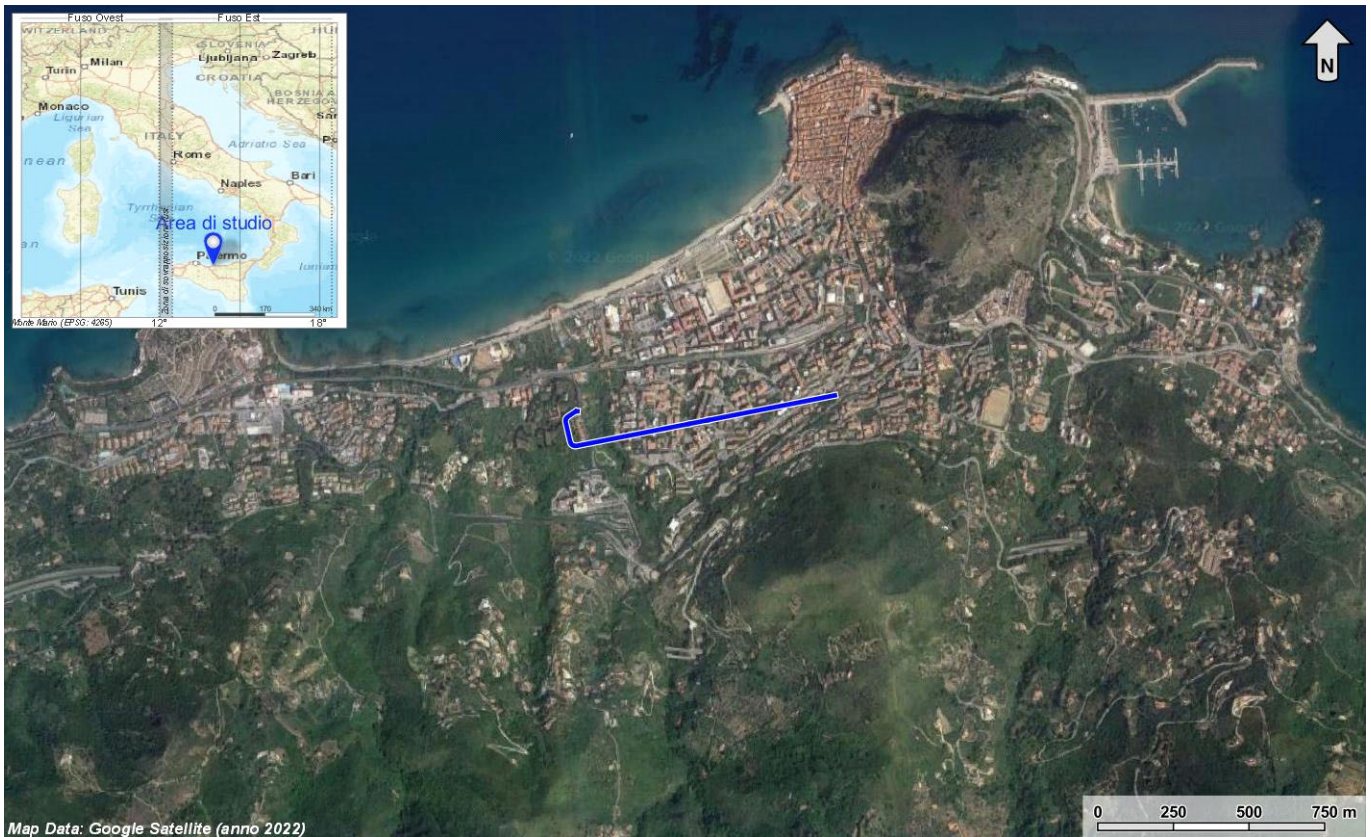


Figura 1 - Corografia in scala 1:25000 dell'area di studio geologico con individuazione della galleria di sfollamento (blu).

In particolare, il lavoro si è svolto attraverso le seguenti fasi operative:

- acquisizione ed analisi degli studi geologici esistenti riguardanti l'area di interesse;
- approfondimenti conoscitivi mediante studi fotointerpretativi condotti su ortofoto;
- rilievi diretti sul terreno mirati alla definizione delle caratteristiche geologiche, geomorfologiche ed idrogeologiche dell'area;
- acquisizione ed analisi delle indagini geognostiche disponibili ed appositamente realizzate nell'area di interesse progettuale;
- analisi dei dati e redazione delle presenti note di sintesi e degli elaborati cartografici a corredo.

L'area di studio si colloca nel settore costiero tirrenico della Sicilia settentrionale in corrispondenza della tratta ferroviaria Palermo-Messina, nei pressi del centro abitato di Cefalù. La galleria di sfollamento in progetto si



LINEA PALERMO – MESSINA. RADDOPPIO FIUMETORTO – CEFALU'
CASTELBUONO. TRATTA OGLIASTRILLO - CASTELBUONO

Fermata Cefalù –Rampa di accesso alla galleria di sfollamento

RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA ED
IDROGEOLOGICA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS7B	00	D69RG	GE 00 01 001	A	5 di 66

sviluppa per una lunghezza di circa 1 km e interessa il territorio del comune di Cefalù, in provincia di Palermo (PA).

Con riferimento alla Carta Topografica d'Italia edita dall'Istituto Geografico Militare Italiano (I.G.M.I.), l'area oggetto di studi è individuabile all'interno del Foglio 251 (Cefalù) in scala 1:100000, nella Tavoletta 251-III-SO (Cefalù) in scala 1:25000 e, con riferimento alla Carta Tecnica Regionale della Regione Sicilia, nella sezione 597130 in scala 1:10000.

Dal punto di vista orografico il tracciato di progetto impegna settori di territorio posti a quote comprese tra 38 m s.l.m. e 63 m s.l.m. circa, mentre le quote progettuali variano da 13 m s.l.m. a 36 m s.l.m. circa.

Dal punto di vista morfologico, l'area di studio si colloca su un versante caratterizzato da valori medio bassi di pendenza, alla base di alcuni rilievi collinari da mediamente a molto acclivi. Tali rilievi rappresentano la propaggine più settentrionale della catena montuosa delle Madonie, a ridosso della costa tirrenica. Infatti, il versante oggetto di studi, costituito da depositi marini terrazzati e detritici di versante, è delimitato immediatamente a nord da un'area pianeggiante riferibile al settore litoraneo/di spiaggia della costa tirrenica.

Il sistema idrografico dell'area di studio è poco sviluppato. Gli elementi idrici che caratterizzano l'area di studio sono il Vallone Pisciotto, che interseca l'opera in progetto e scorre in direzione circa S-N, il Vallone Gallizza, che scorre in direzione circa SSW-NNE a circa 350 m a W dall'opera in progetto, e il Vallone S. Elia, che scorre in direzione circa SSW-NNE a circa 730 m a E dall'opera in progetto. Essi sfociano nel Mar Tirreno e hanno un carattere prevalentemente torrentizio stagionale.

Le presenti note e gli elaborati cartografici ad esse allegati contengono la sintesi dello studio effettuato, chiariscono gli aspetti connessi con lo scenario naturale relativamente alla componente geologica in cui si colloca il settore di studio e affrontano gli elementi ritenuti critici dal punto di vista geologico, geomorfologico, idrogeologico e sismico.

Il modello geologico applicativo proposto, in riferimento ad un volume geologico significativo (*sensu* NTC 2018) in cui sia possibile cogliere interrelazioni dinamiche tra la componente geologica *s.l.* e quella antropica, pone particolare attenzione alla ricostruzione degli assetti e alle configurazioni geometriche delle differenti unità individuate e alla caratterizzazione in senso fisico, litologico e granulometrico dei terreni direttamente interessati dalle opere in progetto.

Gli elaborati cartografici e le relative note di riferimento sono stati redatti secondo gli standard metodologici più diffusi in ambito scientifico, nazionale ed internazionale.

2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Di seguito si riporta una sintesi della normativa nazionale e comunitaria di riferimento per il presente studio.

2.1 Normativa nazionale e tecnica

- A.G.I. 1977 - Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche;
- A.G.I. 1994 - Raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio;
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20/03/2003. Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica;
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3316 del 02/10/2003. Modifiche ed integrazioni all'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20/03/2003;
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3431 del 03/05/2005. Ulteriori modifiche ed integrazioni all'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274.
- D.lgs. n. 152 del 03/04/2006 "Norme in materia ambientale" e s.m.i.;
- D.M. Infrastrutture del 17/01/2018 "Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni";
- Circolare 7 del 21/01/2019 C.S.LL.PP. Istruzioni per l'applicazione dell'"Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le Costruzioni"' di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018;

2.2 Normativa comunitaria

- UNI ENV 1997-1 (2005) - Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica - Parte 1: Regole generali;
- UNI ENV 1997-2 (2007) - Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica - Parte 2: Indagini e prove nel sottosuolo;
- UNI ENV 1997-3 (2002) - Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica - Parte 3: Progettazione assistita con prove in sito";
- UNI ENV 1998-5 (2005) - Eurocodice 8 - Progettazione delle strutture per la resistenza sismica - Parte 5: Fondazioni, strutture e contenimento ed aspetti geotecnici.

2.3 Normativa regionale

- Decreto del Dirigente Generale (2022) - D.D.G. n. 64 del 11/03/2022 "Aggiornamento della classificazione sismica del territorio regionale della Sicilia. Applicazione dei criteri dell'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri 28 aprile 2006, n. 3519. Deliberazione della Giunta Regionale 24 febbraio 2022, n. 81. Decreto di adozione della nuova classificazione sismica".

3 DATI DI BASE

Di seguito si riportano gli elaborati prodotti per la presente fase progettuale e i dati raccolti per la redazione delle presenti note di sintesi e degli elaborati cartografici allegati.

3.1 Allegati

A corredo della presente relazione sono stati elaborati i seguenti documenti:

● CI2022		
codifica elaborato	descrizione elaborato	scala
RS7B00D69L6GE0001001A	Carta geologica con elementi di geomorfologia e profilo geologico	1:2000
RS7B00D69L6GE0002001A	Carta idrogeologica e profilo idrogeologico	1:2000
RS7B00D69SGGE0000001A	Indagini geognostiche - Sondaggi	-

3.2 Documentazione pregressa

Nella presente relazione si è fatto riferimento ai seguenti documenti:

● CI2001		
“Raddoppio Fiumetorto-Cefalù-Castelbuono” PROGETTO DEFINITIVO – 2000-2001		
codifica elaborato	descrizione elaborato	scala
RS2300D69-	Indagini geofisiche - Relazione tecnica	-
RS2300D69-	Indagini geofisiche - Planimetria generale - Indagini geosismiche	1:10000
RS2300D69-	Indagini geofisiche - Settore 3 (Km 6+685-8+415) - Planimetria indagini geosismiche	1:2000
RS2300D47RGGE0000011A	Relazione prove laboratorio	-
RS2300D47RGGE0000009A	Relazione indagini geognostiche	-
RS2300D47RGGE0000010A	Relazione prove in sito	-

● CI2004		
“Raddoppio Fiumetorto-Cefalù-Castelbuono - Tratta Ogliastrillo-Castelbuono” PROGETTO DEFINITIVO – 2004		
codifica elaborato	descrizione elaborato	scala
-	Indagini sismiche a rifrazione	-

● **CI2005**

**“Raddoppio Fiumetorto-Cefalù-Castelbuono - Tratta Ogliastrillo-Castelbuono”
PROGETTO DEFINITIVO – 2005**

codifica elaborato	descrizione elaborato	scala
RS2H00D07SGGE0005001A	Geotecnica - Indagini geofisiche opere in galleria / 2000 - Stratigrafie, Prove in sito e foto	-
RS2H00D07IGGE0005001A	Indagini geofisiche - Prospezioni sismiche a rifrazione	-
RS2H00D07IGGE0005002A	Geotecnica - Indagini geofisiche opere in galleria / 2004	-
RS2H00D07IGGE0005002A	Indagini geofisiche - Prospezioni sismiche a rifrazione - Planimetria ed ubicazione profili simici - Cefalù (All. tav 1/7)	1:2000
RS2H00D07IGGE0005004A	Indagini geofisiche - Prospezioni sismiche a rifrazione - Profilo sismico tomografico P4/Cefalù Tav. 3/7	1:500
RS2H00D07IGGE0005003A	Indagini geofisiche - Prospezioni sismiche a rifrazione - Profili sismici tomografici P1-P2-P3/Cefalù Tav. 2/7	1:500
RS2H00D07PRGE0005001A	Geotecnica - Prove di laboratorio / 2000	-
RS2H00D07PRGE0005002A	Geotecnica - Prove di laboratorio / 2004	-
RS2H00D07PRGE0005003A	Geotecnica - Prove di laboratorio / 2005	-
RS2H00D07SGGE0005001A	Indagini geognostiche opere in galleria / 2000 - Stratigrafie, prove in sito e foto	-
RS2H00D07SGGE0005002A	Indagini geognostiche opere in galleria / 2004 - Stratigrafie, prove in sito e foto	-
RS2H00D07SGGE0005003A	Indagini geognostiche opere in galleria / 2005 - Stratigrafie, prove in sito e foto	-

● **CI2012**

**“Linea Palermo-Messina - Raddoppio Fiumetorto-Cefalù-Castelbuono - Tratta Ogliastrillo-Castelbuono”
PROGETTO ESECUTIVO – 2012-2013-2014**

codifica elaborato	descrizione elaborato	scala
RS2P20EZZG5GE0001001B	Gallerie - Geologia gallerie - Carta geologica con elementi di geomorfologia 1/3	1:5000
RS2P20EZZF6GE0001001B	Gallerie - Geologia gallerie - Profili geologici 1/3	1:2000
RS2P20EZZG5GE0002001B	Gallerie - Geologia gallerie - Carta idrogeologica 1/3	1:5000
RS2P20EZZRGGE0001001B	Geologia gallerie - Relazione geologica ed idrogeologica	-
RS2P20EZZWZGE0200004B	Fermata di Cefalù - Geotecnica area Cefalù - Sezioni geologiche (tav. 1/3)	1:200
RS2P20EZZWZGE0200005B	Fermata di Cefalù - Geotecnica area Cefalù - Sezioni geologiche (tav. 2/3)	1:200
RS2P20EZZWZGE0200006B	Fermata di Cefalù - Geotecnica area Cefalù - Sezioni geologiche (tav. 3/3)	1:200

●CI2012

**“Linea Palermo-Messina - Raddoppio Fiumetorto-Cefalù-Castelbuono - Tratta Ogliastrillo-Castelbuono”
PROGETTO ESECUTIVO – 2012-2013-2014**

codifica elaborato	descrizione elaborato	scala
RS2P20EZZW8GE0200002B	Fermata di Cefalù - Geotecnica area Cefalù - Profilo geomeccanico in asse alla galleria di sfollamento	1:500
RS2P20EZZP5GE0000002B	Elaborati di carattere generale - Indagini geognostiche integrative - Planimetria con ubicazione indagini geognostiche - Tav. 2/5	1:5000
RS2P20EZZPRGE0000001A	Elaborati di carattere generale - Indagini geognostiche integrative - Report Sondaggi SL1	-
RS2P20EZZPRGE0000006A	Elaborati di carattere generale - Indagini geognostiche integrative - Certificati prove di laboratorio Sondaggio SL1-SL10	-
RS2P20EZZRGGE0000001A	Elaborati di carattere generale - Indagini geognostiche integrative - Rilievi geostrutturali - Relazione	-
RS2P20EZZP4IF0001001D	Elaborati di carattere generale - Elaborati di inquadramento - Planimetria generale	1:10000
RS2P20EZZP7IF0001004C	Corpo stradale ferroviario - Planimetrie-Profilo-Sezioni - Planimetria di progetto (Galleria Cefalù) Tav.4	1:1000
RS2P20EZZP7IF0001005C	Corpo stradale ferroviario - Planimetrie-Profilo-Sezioni - Planimetria di progetto (Fermata Cefalù) Tav.5	1:1000
RS2P20EZZROGN0100002B	Galleria Cefalù - Relazione tecnica di monitoraggio	-
RS2P20EZZIGGE0000001B	Elaborati di carattere generale - Indagini geognostiche integrative - Indagini geofisiche - Relazione illustrativa	-
RS2P20EZZIGGE0000002A	Elaborati di carattere generale - Indagini geognostiche integrative - Indagini geofisiche - Profilo sismico P1 Tav.1	1:2000
RS2P20EZZIGGE0000003A	Elaborati di carattere generale - Indagini geognostiche integrative - Indagini geofisiche - Profilo sismico P1 Tav.2	1:2000
RS2P20EZZIGGE0000004A	Elaborati di carattere generale - Indagini geognostiche integrative - Indagini geofisiche - Profilo sismico P2 Tav.1	1:2000
RS2P20EZZIGGE0000005A	Elaborati di carattere generale - Indagini geognostiche integrative - Indagini geofisiche - Profilo sismico P2 Tav.2	1:2000
RS2P20EZZIGGE0000006A	Elaborati di carattere generale - Indagini geognostiche integrative - Indagini geofisiche - Profilo sismico P3	1:2000

4 ASSETTO GEOLOGICO-STRUTTURALE REGIONALE

Il territorio siciliano presenta una conformazione geologica *s.l.* piuttosto articolata e complessa, strettamente legata ai differenti processi geodinamici e morfoevolutivi che si sono verificati nell'area durante il Quaternario (Lentini et al. 1991; Finetti et al. 1996; Monaco et al. 2000, 2002; Carbone 2011), quali l'attività vulcano-tettonica, le variazioni del livello marino e l'attività antropica.

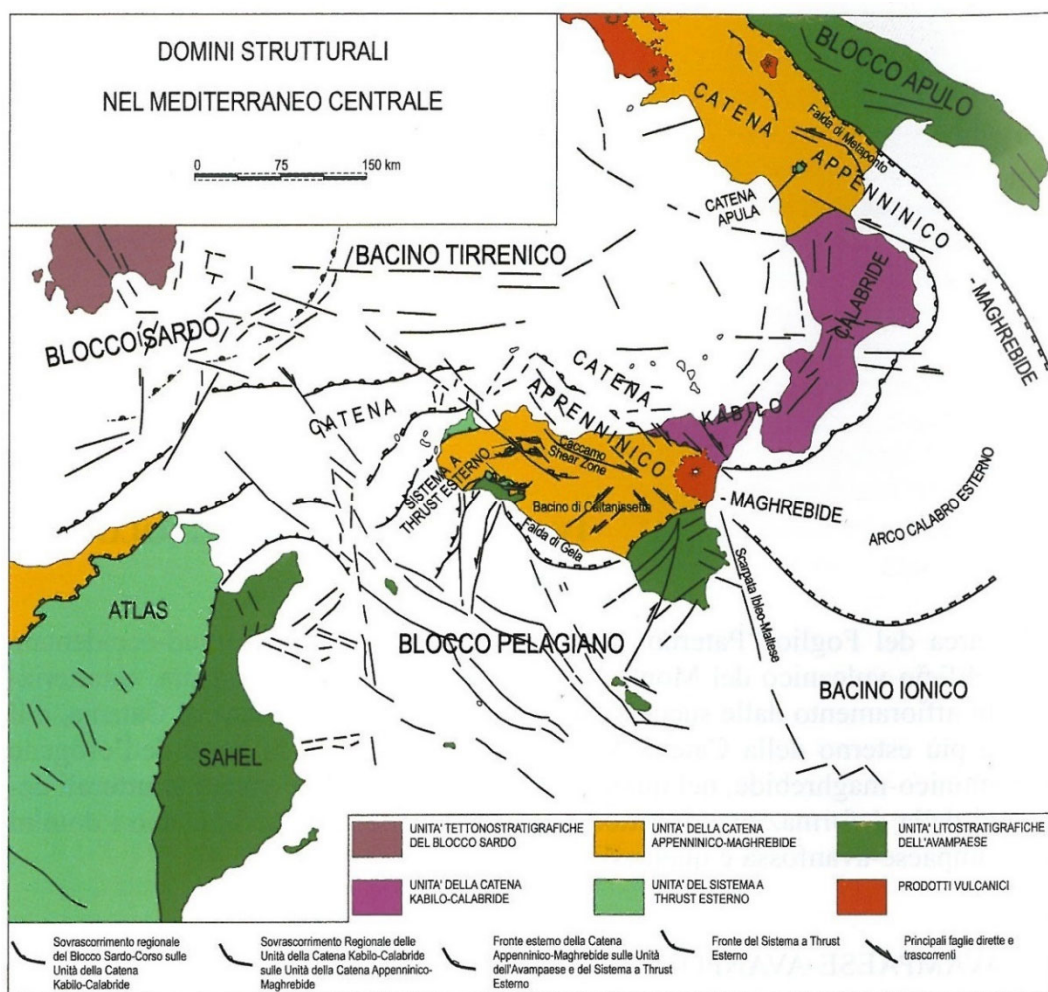


Figura 2 – Domini strutturali ed elementi tettonici nel Mediterraneo centrale (da Lentini et al. 1995, modificato).

Dal punto di vista geologico (Figura 2), le principali strutture che caratterizzano il complesso collisionale della Sicilia e il suo prolungamento *offshore* sono (Amodio-Morelli et al. 1976; Lentini et al. 1995; Catalano et al. 1996; Finetti et al. 1996; Monaco et al. 2000; Carbone 2011):

- l'**Avampaese Ibleo**, affiorante nei settori Sud-orientali dell'isola e caratterizzato da una potente successione carbonatica meso-cenozoica, con ripetute intercalazioni di vulcaniti basiche (Patacca et al. 1979; Lentini et al. 1984; Carbone 2011);
- l'**Avanfossa Gela-Catania**, affiorante nella porzione orientale della Sicilia e costituita da una spessa

successione sedimentaria tardo-cenozoica, parzialmente sepolta sotto le coltri alloctone del sistema frontale della catena (Ogniben 1969; Di Geronimo et al. 1978; Lentini 1982; Torelli et al. 1998);

- la **Catena Appenninico-Maghrebide**, affiorante nella porzione settentrionale dell'isola e costituita da sequenze meso-cenozoiche sia di piattaforma sia di bacino, con le relative coperture flyschoidi mioceniche (Ogniben 1969; Amodio-Morelli et al. 1976; Mostardini & Merlini 1986; Cello et al. 1989; Catalano et al. 1996; Monaco et al. 1998);
- la **Catena Kabilo-Calabride**, affiorante nei settori nord-orientali della Sicilia e caratterizzata da un basamento metamorfico di vario grado con le relative coperture sedimentarie meso-cenozoiche, cui si associano le unità ofiolitifere del Complesso Liguride (Ogniben 1969; Amodio-Morelli et al. 1976; Bonardi et al. 1982; Tansi et al. 2007).

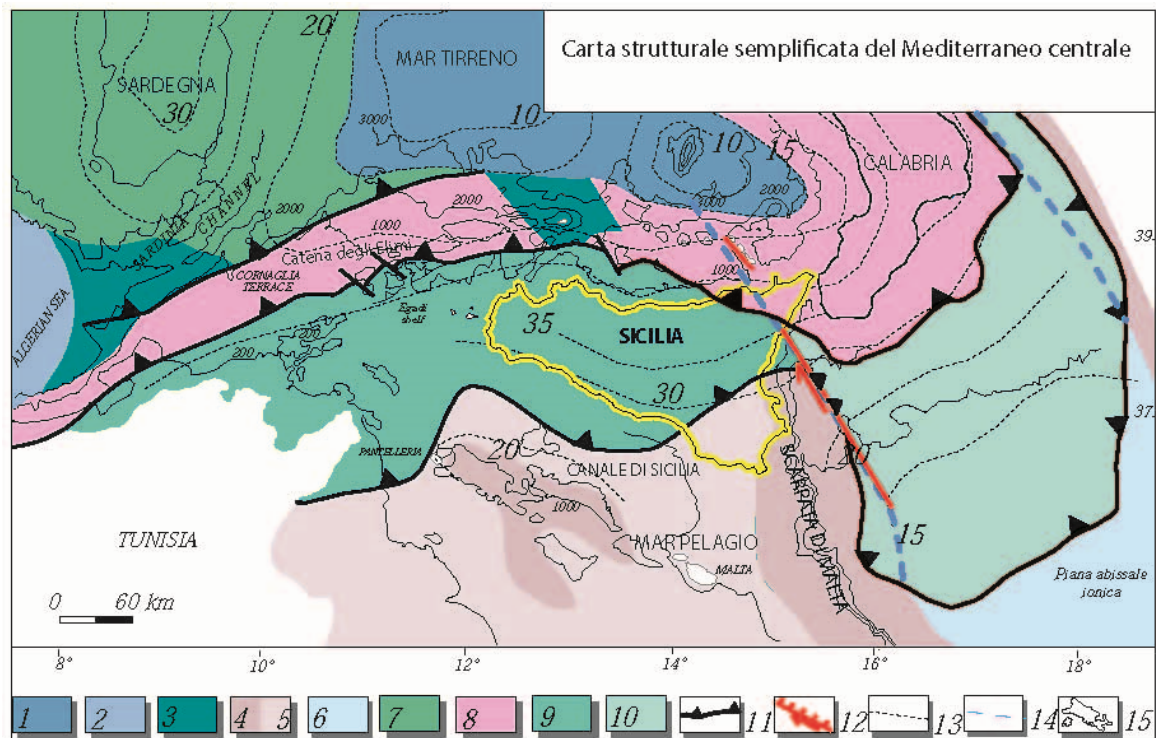


Figura 3 – Carta dei settori crostali del Mediterraneo centrale e della Sicilia (Catalano et al. 2011): 1) crosta oceanica del Mar Tirreno; 2) crosta oceanica del Bacino Algerino; 3) crosta continentale assottigliata kabilo e sarda; 4) crosta continentale africana; 5) crosta continentale assottigliata africana 6) crosta oceanica del Mar Ionio; 7) unità tettoniche sarde; 8) unità kabilo-calabridi; 9) unità siciliane-maghrebidi; 10) prisma di accrezione ionico; 11) fronti di sovrascorrimento; 12) faglia con probabile componente transtensiva; 13) isobate (in km) della Moho; 14) limite marginale passivo-oceanico ionico; 15) batimetria.

Nella sua complessità, il paesaggio fisico della Sicilia è quindi il risultato di una complessa interazione di diversi fattori geologici, tettonici, geomorfologici e climatici che, nel corso del tempo, hanno interessato l'area in esame in maniera differente (Lentini et al. 1995; Finetti et al. 1996; Monaco et al. 2000). Nello specifico, l'area di studio ricade nella porzione centro-settentrionale dell'isola siciliana, all'interno del dominio della Catena Appenninico-Maghrebide (Lentini et al. 1995; Catalano et al. 1996; Finetti et al. 1996; Monaco et al. 2000; Monaco & De Guidi 2006; Catalano et al. 2011).

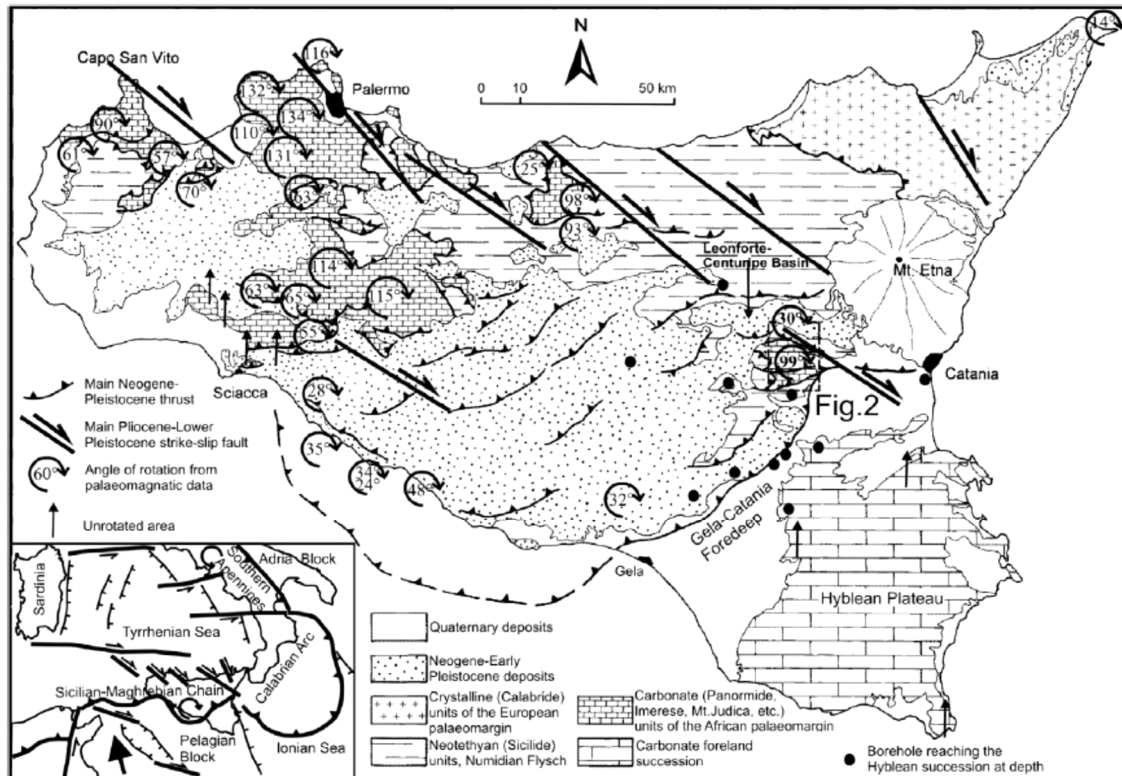


Figura 4 – Carta geologico-strutturale della Sicilia, con evidenze delle rotazioni neogeniche connesse allo sviluppo dell'orogene (da Monaco & De Guidi 2006).

La catena è costituita da un sistema a *thrust* pellicolare (Catalano et al. 2011), con vergenza verso SE nel tratto siculo-maghrebide e ENE in quello appenninico (Monaco et al. 2000). Il sistema comprende sequenze mesozoiche sia di piattaforma sia di bacino (Catalano et al. 2011), con spesse coperture flyschoidi mioceniche probabilmente appartenenti ad un paleomargine afro-adriatico (Ogniben 1969; Amodio-Morelli et al. 1976; Mostardini & Merlini 1986; Catalano et al. 1996; Monaco et al. 1998). Queste ultime formano differenti orizzonti tettonici sovrapposti e sono interpretabili, essenzialmente, come il prodotto della deposizione di detrito quarzoso sia all'interno del dominio di avanfossa che all'interno di bacini di avampaese di età oligocenica-inframiocenica (Catalano et al. 2011).

La Catena Appenninico-Maghrebide è quindi costituita da una serie di falde più o meno alloctone, totalmente sovrapposte sul Sistema a *Thrust* Esterno (Catalano et al. 2011). Le Unità Sicilidi, che ricoprono la porzione sommitale della pila, risultano derivanti dal Bacino Alpino-Tetideo (Figura 3) che separava il margine europeo dal blocco panormide (Finetti et al. 2005) e sono interpretabili come i resti di un cuneo d'accrezione oceanico, sovrascorso fino al raggiungimento dell'attuale fronte della catena (Bello et al. 2000; Catalano et al. 2011). Ulteriori sequenze oceaniche, riconoscibili nelle unità tettoniche più esterne sono invece riferibili al dominio di crosta oceanica, che rappresenta la porzione subdotta dell'originario bacino ionico (Finetti et al. 2005).

Nella porzione centrale e settentrionale della Sicilia (Figura 4), al di sopra dei termini marini di catena, si rinvencono spesse ed estese successioni marine neogenico-quadernarie (Bianchi et al. 1987; Monaco & De Guidi 2006). Le successioni neogeniche sono essenzialmente connesse alla crisi di salinità del Messiniano e formano, pertanto, la sequenza evaporitica della Gessoso-Solfifera (Decima & Wezel 1971; Lentini et al. 1991; Catalano et

al. 2011). Le successioni marine quaternarie, invece, sono rappresentate da depositi bacinali e di piattaforma continentale di natura sia carbonatica che silicoclastica (Bianchi et al. 1987; Lentini et al. 1991).

4.1 Evoluzione geologica

Ad esclusione del settore peloritano nord-orientale, la tettonogenesi che ha interessato la Sicilia durante il Cenozoico ha portato le principali unità tettoniche dell'area accavallarsi dalle zone nord-occidentali verso quelle sud-orientali, dando vita a un sistema a *thrust and fold* vergente verso SE (Catalano et al. 1996; Bello et al. 2000; Monaco et al. 2000; Lavecchia et al. 2007; Carbone et al. 2010; Broquet 2016). Le falde della Catena Appenninico-Maghrebide si accavallano, quindi, sull'Avampaese Ibleo con modalità simili a quelle che determinano la messa in posto delle coltri appenniniche sul Dominio Apulo (Lentini et al. 1995; Bello et al. 2000).

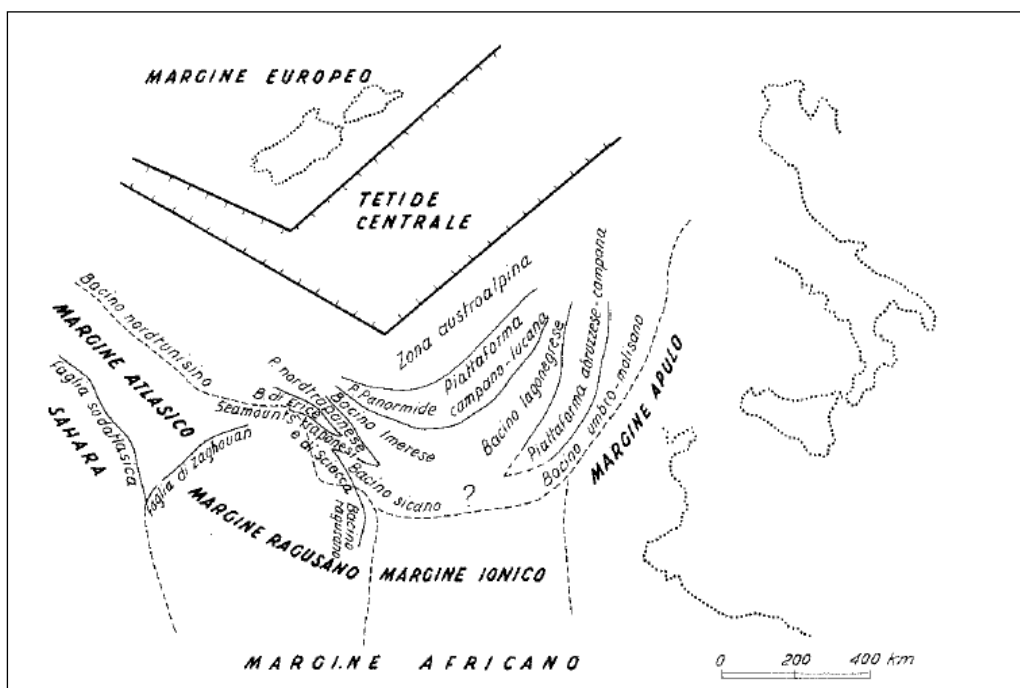


Figura 5 – Ricostruzione palinspastica della Tetide centrale nel Giurassico (da Scandone et al. 1974).

Durante il Giurassico (Figura 5), con il processo di separazione continentale che porta all'apertura del settore meridionale della Tetide, si individua un importante bacino intra-cratonico a sedimentazione terrigena, il Bacino di Lercara (Scandone et al. 1974; Catalano et al. 1996). Tale dominio evolve successivamente in due distinte unità paleogeografiche, rappresentate dal Bacino Imerese a nord e dal Bacino Sicano a sud (Scandone et al. 1974; Bonardi et al. 1976). Questi ultimi, in particolare, risultano separati dall'interposizione della Piattaforma nord Trapanese, a sua volta sostituita verso sud dal dominio paleogeografico dei *Seamounts* Trapanesi (Scandone et al. 1974; Bonardi et al. 1976). Il processo di dissezione in blocchi della Piattaforma carbonatica Panormide, più interna, è iniziata nel Giurassico ed è proseguita almeno fino all'Oligocene inferiore (Scandone et al. 1974).

Da questo momento inizia la costruzione vera e propria della Catena, con la deformazione e l'imbricazione interna delle unità cristalline del Dominio Calabride e delle relative coperture sedimentarie (Catalano et al. 2011). La deformazione dei domini paleogeografici più interni porta, quindi, alla formazione di un primordiale bacino di avanfossa a sedimentazione terrigena, conosciuto come Bacino Numidico (Scandone et al. 1974; Bonardi et al.

1982; Bianchi et al. 1987). Tra l'Aquitano ed il Langhiano la sedimentazione nel Bacino Numidico si contraddistingue per il carattere regressivo delle successioni che, nella loro porzione sommitale, sono caratterizzate da una sedimentazione di tipo prevalentemente pelitico (Bianchi et al. 1987; Lentini et al. 1991). Al contempo, nel Bacino Sicano si instaurano le condizioni per una sedimentazione di ambiente profondo (Catalano et al. 1996).

Questa prima fase deformativa, protratta fino all'intervallo Burdigaliano-Langhiano, ha portato alla deformazione delle Unità Sicilidi e alla migrazione verso SE dei bacini (Catalano et al. 2011). Nel Langhiano le aree più settentrionali del dominio Imerese subiscono una importante fase tettonica a seguito dell'accavallamento dei terreni più esterni della Piattaforma Panormide su quelli più interni del Bacino Imerese che, a loro volta, si accavallano sui termini più esterni dello stesso (Bianchi et al. 1987). Su queste unità deformate, infine, si vanno a deporre in discordanza i depositi pelagici ed emipelagici del Langhiano superiore mentre, contemporaneamente, le Unità Sicilidi si sovrappongono tettonicamente alle successioni suddette (Bianchi et al. 1987; Catalano et al. 1996; Bello et al. 2000).

A partire dal Miocene superiore, la sovrapposizione frontale della catena sulle successioni iblee è stata accompagnata dall'attivazione di *thrust* fuori sequenza e dalla formazione di bacini sedimentari sintettonici nelle depressioni al retro (Di Grande et al. 1976), mentre si individuava il bacino di avanfossa al fronte (Lentini et al. 1990; Butler & Grasso 1993; Bello et al. 2000). Durante la migrazione della catena le unità sovrascorse hanno subito rotazioni orarie di notevole entità (Channell et al. 1980, 1990; Speranza et al. 1999; Monaco & De Guidi 2006), mentre l'attivazione di sistemi di faglie trascorrenti destre, disposte *en-echelon* e orientate NW-SE e WNW-ESE, ha caratterizzato le fasi post-tortoniane dell'orogenesi (Lentini et al. 1991).

Alla fine del Messiniano, la conformazione paleogeografica dei diversi domini individuati determina la formazione di un'area con ridotta circolazione delle masse d'acqua, che porta un progressivo abbassamento del livello del mare ed alla formazione di complessi sistemi di scogliera (Lentini et al. 1991; Catalano et al. 2011). Questi ultimi, in seguito al verificarsi della crisi di salinità, vengono ricoperti dalla sedimentazione delle successioni gessoso-evaporitiche mioceniche (Bianchi et al. 1987; Lentini et al. 1991).

Successivamente, nel Pliocene inferiore, si instaurano nuovamente condizioni marine normali, come testimoniato dalla sedimentazione della successione dei Trubi, rocce biancastre marnoso-calcaree tipiche di un ambiente marino relativamente profondo (Bianchi et al. 1987; Lentini et al. 1991). Tra il Pliocene superiore ed il Pleistocene inferiore si ha un sollevamento complessivo dell'area, mentre la porzione più settentrionale della catena subisce un generale sollevamento e un successivo smembramento in blocchi lungo linee tettoniche ad andamento NW-SE e NE-SW (Ghisetti & Vezzani 1984), che determinano sollevamenti differenziati da luogo a luogo (Bianchi et al. 1987; Lentini et al. 1991).

Alla fine del Pleistocene si assiste, quindi, alla definitiva emersione della Catena Appenninico-Maghrebide, in concomitanza con i sollevamenti regionali che coinvolgono anche ampi settori di avanfossa ed avampaese (Bianchi et al. 1987; Monaco et al. 2002). I terrazzi quaternari, distribuiti a varie quote lungo la fascia costiera, testimoniano le oscillazioni eustatiche del livello medio marino e i movimenti tettonici a prevalente componente verticale verificatisi in questo ultimo periodo (Lentini et al. 1991; Monaco et al. 2002).

4.2 Caratteristiche stratigrafiche

Nel complesso, la Catena Appenninico-Maghrebide è costituita da una serie di falde di ricoprimento che derivano dalla deformazione di sequenze sedimentarie che si sono depositate in domini paleogeografici differenti ubicati tra il paleomargine africano e quello europeo (Carbone & Grasso 2012). La catena è principalmente costituita da falde

disposte a più orizzonti strutturali (Figura 6), sovrapposte sulla *Pelagian-Sicilian Thrust Belt* (Lentini et al. 1994, 1996, Finetti et al. 2005).

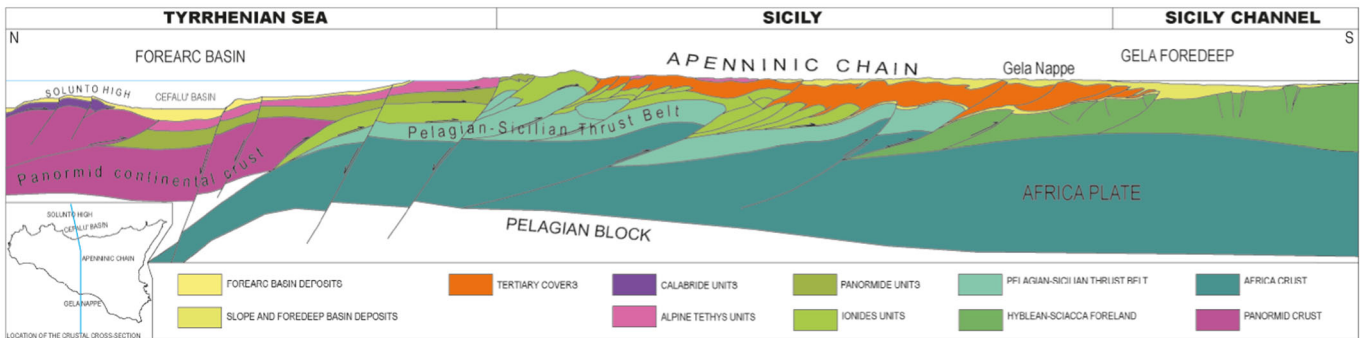


Figura 6 - Sezione crostale della Sicilia occidentale (da Finetti et al. 2005).

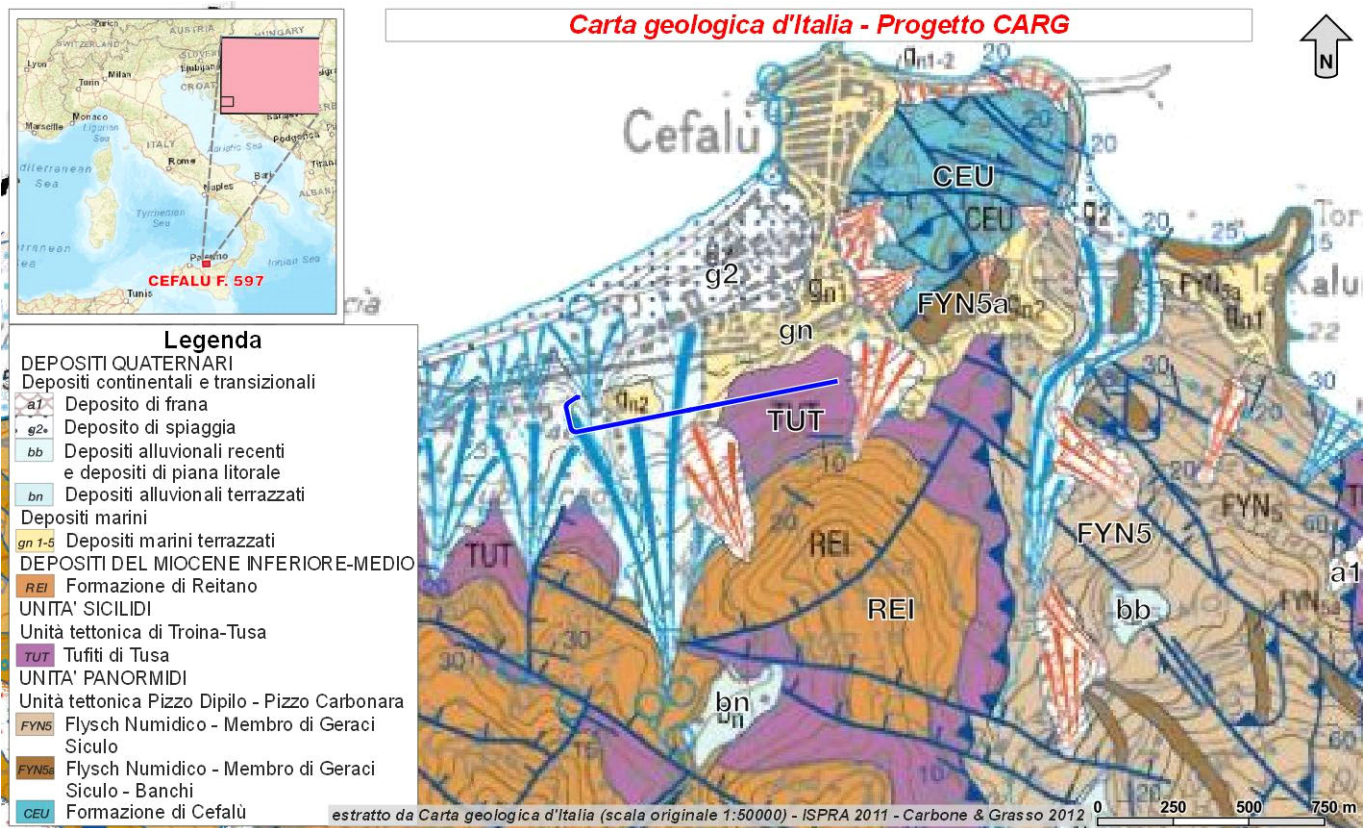


Figura 7 – Stralcio del foglio CARG n. 597 “Cefalù” (ISPRA 2011), scala originale 1:50000, riprodotto in scala 1:25000, con indicazione dell’opera in progetto (in blu).

Con diretto riferimento a quanto riportato nella Carta Geologica d’Italia (Figura 7) in scala 1:50000 (Carbone & Grasso 2012), le successioni stratigrafiche presenti nell’area di interesse possono essere distinte, dal basso verso l’alto, in:

- **Unità Panormidi:** successione mesozoica di piattaforma carbonatica con una copertura terziaria marnosa e

silicoclastica (Carbone & Grasso 2012).

- **Unità Tettonica Pizzo Dipilo – Pizzo Carbonara:** successioni di ambiente neritico di piattaforma carbonatica s.s. e laguna di retroscogliera.
 - **Formazione di Cefalù (CEU)** (Giurassico Superiore – Cretacico): calcari biocostruiti e calcari dolomitici grigio-bluastri, oolitici o pseudoolitici in grossi banchi, con breccie intraformazionali e dicchi nettuniani riempiti da calcilutiti e marne in *facies* di Scaglia. I calcari sono caratterizzati da radiolitidi e caprinidi, oltre a gasteropodi, coralli, alghe e briozoi. I foraminiferi planctonici rinvenuti sono riferibili al Cenomaniano medio-superiore, biozona a *Rotalipora cushmani*. Limite inferiore non affiorante. Spessore fino a 300 m. Ambiente di piattaforma carbonatica interna.
 - **Flysch Numidico – Membro di Geraci Siculo (FYN5)** (Oligocene Superiore – Miocene Inferiore (Burdigaliano)): argilliti nerastre a stratificazione indistinta, passanti verso l'alto ad argille brune cui si intercalano quarzareniti e quarzoruditi giallastre matrice sostenuti, in grossi banchi (FYN5a). Limite inferiore graduale su GPM, netto su GRT, erosivo su PNBa e CEU. Spessore fino a 400 m. Ambiente di scarpata-bacino.
- **Unità Sicilidi:** costituite da sequenze cretacico-paleogeniche prevalentemente argillitiche caratterizzate da coperture terrigene di diversa natura ed età in funzione dell'originaria posizione paleogeografica e del momento del loro coinvolgimento nel cuneo di accrezione (Carbone & Grasso 2012).
 - **Unità Tettonica di Troina-Tusa:** rappresentata da un orizzonte basale ad argilliti policrome scagliettate e da calciclastiti.
 - **Tufiti di Tusa (TUT)** (Oligocene Superiore – Miocene Inferiore): alternanza di arenarie micacee e tufitiche a grana medio-grossa, a cemento carbonatico, in banchi di 1-2 m, di marne e calcari marnosi e calcareniti in livelli decimetrici. Limite inferiore netto e disarmnico su MPD e ALV, tettonico su FYN4, FYN5 e MCU. Spessore fino a 480 m. Ambiente deposizionale di scarpata e base di scarpata.
- **Depositi del Miocene Inferiore – Medio:** depositi relativi a un ciclo deposizionale di età Miocene inferiore – Medio affioranti in discordanza sulle unità appenninico-maghrebidi e rappresentati da successioni flyschoidi a composizione arcossico-litica e da successioni marnose langhiano-saravalliane (Carbone & Grasso 2012).
 - **Formazione di Reitano (REI)** (Miocene Inferiore – Medio): alternanza di arenarie micacee grigio-brune o giallastre spesso gradate, in strati da 20 cm a 2 m, con sottili intercalazioni di argille marnoso-siltose grigie o verdi, e di marne grigio plumbee. Limite inferiore discordante ed erosivo su TUT. Spessore fino a 500 m. Ambiente di scarpata e conoide torbiditica.
- **Depositi Quaternari:** costituiti da depositi clastici marini, continentali e transizionali (Carbone & Grasso 2012).
 - **Depositi Marini**
 - **Depositi Marini Terrazzati (gn1-5)** (Pleistocene Medio – Superiore): sabbie fossilifere giallo ocra, talora ghiaiose, breccie eterometriche e monogeniche a clasti sedimentari arrotondati e appiattiti, in matrice sabbiosa, a stratificazione poco evidente. Costituiscono cinque ordini di terrazzamento con orli compresi tra 425 e 30 m s.l.m.. Spessore da qualche decimetro a 5 m.
 - **Depositi Continentali e Transizionali**
 - **Depositi Alluvionali Terrazzati (bn)** (Pleistocene Superiore – Olocene): ghiaie eterometriche e poligeniche brune o giallastre, a clasti prevalentemente arrotondati di 2-20 cm, a supporto di matrice sabbioso-argillosa; sabbie e limi argillosi e suolo agrario, terrazzati in più ordini. Spessore fino a 15 m.
 - **Depositi Alluvionali Recenti e Depositi di Piana Litorale (bb)** (Olocene): ghiaie con livelli di sabbie e limi, talora terrazzati, lungo i corsi d'acqua. Costituiscono anche il deposito delle conoidi alluvionali formato da ghiaie eterometriche in scarsa matrice sabbiosa, e con intercalazioni sabbioso-ghiaiose. Spessore fino a 20 m.
 - **Deposito di Spiaggia (g2)** (Olocene): ghiaie a prevalenti clasti mineralici di quarzo, di litici e di selce

policroma, arrotondati, di 1-1' cm; localmente sabbie quarzose giallastre e/o grigiastre a grana medio-grossolana, ben cernite.

- **Deposito di Frana (a1)**: accumuli gravitativi caotici di materiali eterogenei ed eterometrici, in matrice da argillosa a sabbiosa, localmente a grossi blocchi, a luoghi stabilizzati o senza indizi di evoluzione in atto.

4.3 Caratteristiche strutturali

L'edificio tettonico sia affiorante che sepolto è il risultato di diversi eventi deformativi, dall'Oligocene ad oggi (Bianchi et al. 1987; Catalano et al. 2011). Questi eventi hanno interessato tanto le successioni sedimentarie che si erano deposte nell'antico margine continentale passivo africano tra il Triassico e il Miocene inferiore, quanto le successioni generalmente clastiche formatesi durante la sua deformazione (Ogniben 1969; Mostardini & Merlini 1986; Bianchi et al. 1987; Monaco et al. 1998; Catalano et al. 2011).

La fase collisionale e la relativa costruzione della catena è iniziata verosimilmente alla fine dell'Oligocene, con la deformazione e l'imbricazione interna delle Unità cristalline Calabre e delle relative coperture terrigene (Catalano et al. 2011). Questa fase si è protratta fino all'intervallo Burdigaliano-Langhiano, durante il quale si è avuta la deformazione delle Unità Sicilidi (Scandone et al. 1974; Catalano et al. 2011). In questo momento, i bacini di avanfossa *s.l.* caratterizzati da depositi flyschoidi dell'Oligocene superiore – Miocene inferiore hanno iniziato a migrare progressivamente verso SE (Bianchi et al. 1987).

La deformazione delle coperture sedimentarie del margine continentale africano ha raggiunto prima i domini bacinali più interni, probabilmente caratterizzati da crosta continentale assottigliata, dando luogo alle unità strutturalmente più alte presenti nella catena (Scandone et al. 1974; Bonardi et al. 1982; Bianchi et al. 1987). La deformazione delle unità bacinali, prevalentemente del Langhiano-Tortoniano inferiore, è stata inizialmente innescata da scollamenti interstratali, con geometrie di tipo *duplex* (Catalano et al. 2011). Dopo il distacco, i corpi sono stati coinvolti nella rotazione oraria di 70°-100°, contemporanei all'imbricazione interna (Channell et al. 1980, 1990; Catalano et al. 2011).

La sovrapposizione delle unità bacinali e delle relative coperture sull'avampaese avviene durante il Serravalliano superiore-Tortoniano inferiore (Bianchi et al. 1987; Catalano et al. 2011). Antecedente a questo evento è l'inserimento di lembi di Flysch Numidico scollatosi dal substrato imerese e deformatosi insieme ad esso o precedentemente (Catalano et al. 1995). A partire dalla fine del Tortoniano, la deformazione ha raggiunto i livelli inferiori, coinvolgendo progressivamente il corpo della piattaforma carbonatica che si deformava secondo grandi antiformali a direzione assiale E-W, successivamente dislocate da strutture plicative NE-SW del Pliocene superiore (Oldow et al. 1990).

La fase di strutturazione del Miocene superiore-Pleistocene è caratterizzata da due eventi deformativi principali: un primo evento prevalentemente compressivo e un secondo evento prevalentemente transpressivo (Bianchi et al. 1987; Catalano et al. 2011). A questi fa seguito una tettonica più recente, distensiva e trascorrente connessa all'apertura del Tirreno, che si protrae fino all'attuale mantenendo una direzione di massima compressione orizzontale NNW-SSE (Ghisetti & Vezzani 1984; Lentini et al. 1991; Catalano et al. 2011).

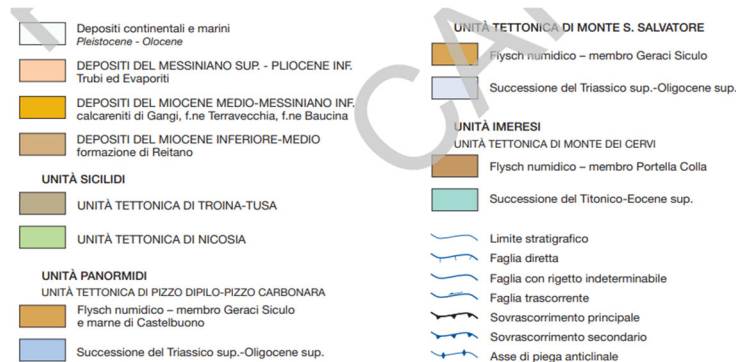
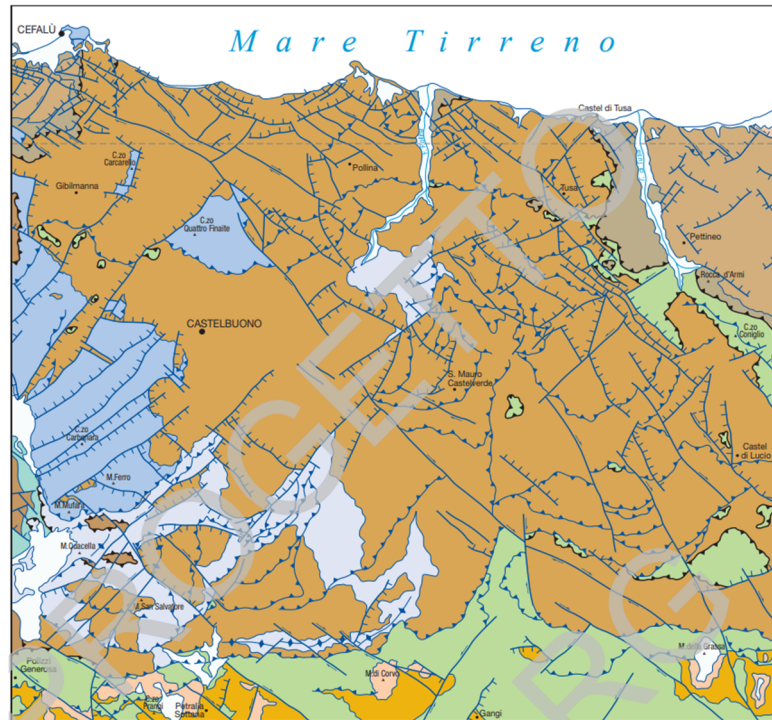


Figura 8 - Schema tettonico dei settori centro-settentrionali della Sicilia, tra Cefalù e il Torrente di Tusa (da Carbone & Grasso 2012).

La deformazione compressiva più antica è riconoscibile nella messa in posto delle Unità Sicilidi su quelle numidiche, con una direzione di trasporto orientata attualmente verso S e SW (Bianchi et al. 1987; Catalano et al. 2011). La suturazione del fronte di sovrascorrimento ad opera della deposizione in discordanza della Formazione Castellana Sicula o della Formazione Terravecchia permette di riferire la messa in posto delle Unità Sicilidi su quelle numidiche all'intervallo compreso tra la fine del Langhiano e la fine del Serravalliano (Bianchi et al. 1987; Catalano et al. 1996, 2011).

A partire dal Tortoniano le unità carbonatiche più interne, Panormidi e Imeresi, vengono coinvolte nella deformazione e si sovrappongono su quelle più esterne di piattaforma, Trapanesi (Bianchi et al. 1987; Catalano et al. 2011). Questa fase, caratterizzata da geometrie di tettonica pellicolare, si realizza con una generale vergenza meridionale, accompagnata da ampie rotazioni orarie (Channell et al. 1980, 1990; Speranza et al. 1999; Monaco &

De Guidi 2006). La strutturazione di queste unità è testimoniata da pieghe e sovrascorrimenti con direzione NW-SE, vergenti verso SW (Catalano et al. 2011).

L'evento tettonico transpressivo inizia nel Messiniano ed è testimoniato da strutture trascorrenti e transpressive con *trend* NNW-SSE per le trascorrenti destre e NE-SW per i sistemi antitetici sinistri (Catalano et al. 2011). L'evento coinvolge le unità profonde di piattaforma carbonatica e determina la formazione di strutture plicative ad ampio raggio e doppia vergenza, che inducono un ulteriore raccorciamento nelle sovrastanti unità bacinali (Bianchi et al. 1987; Catalano et al. 2011). Le strutture di questo evento sono compatibili con una direzione di massima compressione orientata NNW-SSE e testimoniano che le deformazioni sono perdurate fino al Plio-Pleistocene (Catalano et al. 2011).

La tettonica trascorrente e transtensiva è correlabile all'apertura del Tirreno durante il Plio-Pleistocene e ha interessato gran parte degli elementi strutturali più antichi (Catalano et al. 2011). Infatti, i corpi piegati e sovrascorsi durante le prime fasi di strutturazione della catena sono oggi dislocati e ribassati in direzione della costa (Ghisetti & Vezzani 1984; Lentini et al. 1991; Catalano et al. 2011). In generale è possibile riconoscere due principali sistemi di faglie con andamento, NW-SE e NE-SW (Figura 8), anche se quello a direzione anti-appenninica risulta essere il più importante in quanto caratterizzato da rigetti che raggiungono il migliaio di metri (Ghisetti & Vezzani 1984; Catalano et al. 2011).

Infine, la tettonica recente è prevalentemente connessa al regime distensivo e ha interessato tutte le strutture e i depositi più antichi, incidendo in maniera sostanziale sull'evoluzione quaternaria dell'area (Bianchi et al. 1987; Lentini et al. 1991; Catalano et al. 2011). I sedimenti marini che costituiscono i terrazzi del Pleistocene medio-superiore risultano interessati da due sistemi di faglie dirette (Lentini et al. 1991; Monaco et al. 2002; Catalano et al. 2011). Il primo sistema presenta andamento variabile da E-W a WNW-ESE, mentre il secondo mostra un *trend* compreso tra N-S e NNW-SSE. Quest'ultimo, in particolare, controlla gran parte dei principali corsi d'acqua dell'area (Contino 2002).

Alcune faglie dirette con locali componenti trascorrenti postdatano il piegamento delle Unità Sicilidi e appaiono correlabili alla fase finale della formazione del Bacino Tirrenico (Catalano et al. 2011). A questo evento deformativo, che provoca un collasso delle strutture plicative verso la costa, sono associate faglie dirette mesoscopiche con direzione NW-SE e faglie a grande scala con direzione NE-SW e E-W, che delimitano al piede scarpate e/o versanti di particolare importanza (Lentini et al. 1991; Catalano et al. 2011).

5 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

L'evoluzione geomorfologica del settore di studio è legata ad un insieme di fattori geologici *s.l.* e geologico-strutturali che hanno agito, in maniera concomitante, nello sviluppo del paesaggio attuale. In particolare, la morfologia superficiale del territorio in esame risulta profondamente connessa all'evoluzione geodinamica della Catena Appenninico-Maghrebide e dell'Avanfossa Gela-Catania (Lentini et al. 1995; Finetti et al. 1996; Monaco et al. 2000), particolarmente intensa nel Pleistocene medio-superiore e nell'Olocene (Carbone et al. 2010). Ad essa si aggiungono gli effetti geomorfologici dovuti al deflusso delle acque superficiali e ai fenomeni gravitativi agenti sui rilievi, oltre che locali elementi di genesi antropica connessi alle maggiori opere di comunicazione e ai sistemi di regimazione idraulica dei corsi d'acqua.

I rilievi del versante tirrenico delle Madonie orientali, in corrispondenza di Cefalù, sono costituiti prevalentemente da terreni arenaceo-argillosi e caratterizzati da pendici collinari ripide con una morfologia irregolare, arrotondate alla sommità, e valli strette o appena svasate. Dalle zone costiere si risale rapidamente verso l'interno, dove si raggiungono i 300-400 m s.l.m.. Le quote più elevate, oltre i 300 m s.l.m., sono quelle di Cozzo Rotondo e Cozzo Sant'Elia a monte dell'abitato di Cefalù e quella di Contrada Mazzatore più a est. La Rocca di Cefalù, invece, è costituita da un ammasso roccioso calcareo che costituisce, quindi, un elemento geomorfologico isolato delimitato da pendici ripide, scoscese e, per ampi tratti, sub-verticali.

Nella zona costiera sono presenti ampie zone sub-pianeggianti con un'estesa fascia litorale e ampi terrazzi marini che si sviluppano tra la zona di Ogliastrillo e la Rocca di Cefalù. A est di Cefalù, invece, le pendici arenaceo-argillose raggiungono direttamente la linea di costa, dove sono presenti strette spiagge ghiaiose, e i terrazzi marini si trovano a quote variabili lungo le pendici, conferendo alle ripide pendici locali diminuzioni delle pendenze con tratti da poco acclivi a sub-pianeggianti.

Dal punto di vista idrografico, il versante tirrenico delle Madonie presenta una serie di corsi d'acqua che hanno fortemente influenzato l'attuale morfologia dell'area. I corsi d'acqua sono caratterizzati da solchi vallivi a V, da stretti e incisi a svasati, e privi o quasi di depositi alluvionali. Le aste fluviali hanno, in genere, pendenze medio-elevate e una direzione condizionata dalla linea di massima pendenza dei versanti. Molti corsi d'acqua si instaurano in corrispondenza delle linee di faglia, in quanto favoriti dalle caratteristiche di maggiore debolezza e fratturazione dell'ammasso roccioso.

I corsi presenti nell'area sono il Vallone Gallizza, il Vallone Pisciotto e il Vallone Sant'Elia. Essi scorrono in direzione circa S-N fino a raggiungere la linea di costa e presentano uno spiccato carattere torrentizio con portate di piena talora molto elevate in concomitanza con eventi meteorici particolarmente intensi.

Il territorio in esame presenta diffuse forme di dissesto costituite da corpi di frana di dimensioni variabili e da fenomeni di erosione che interessano i versanti dalle quote medio-alte fino in prossimità della costa tirrenica (Carbone & Grasso 2012). Le alternanze argilloso-arenacee, i termini argillosi caotici e le formazioni calcareo-dolomitiche sono le litologie che maggiormente sono interessate da questi fenomeni (Carbone & Grasso 2012).

La tipologia di movimenti franosi che prevalentemente interessa l'area è lo scorrimento rotazionale, caratterizzato da superfici di scivolamento profonde che coinvolgono sia la coltre detritica superficiale che la parte del substrato con caratteristiche geomeccaniche scadenti (Carbone & Grasso 2012). Un'altra tipologia è il colamento di terra e di detrito che interessa i primi metri delle coperture di alterazione (Carbone & Grasso 2012). Queste due tipologie, insieme, danno luogo anche a frane complesse. Sono, inoltre, presenti frane da crollo che si verificano nelle

formazioni costituite da rocce carbonatiche o arenacee, come in corrispondenza della Rocca di Cefalù (Carbone & Grasso 2012).

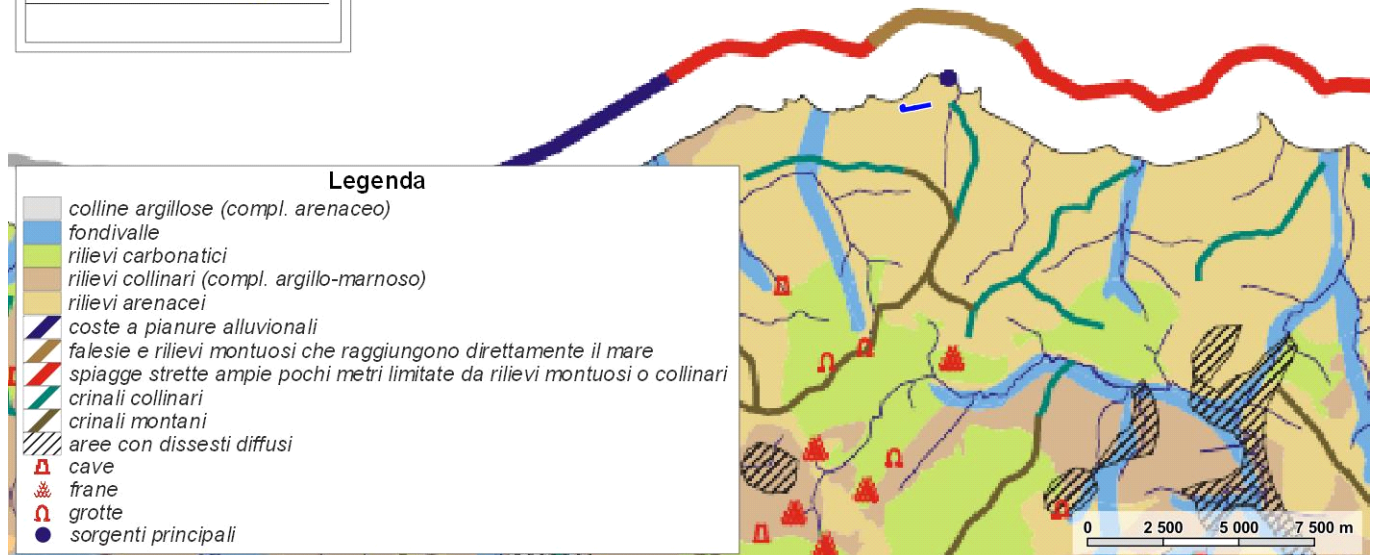
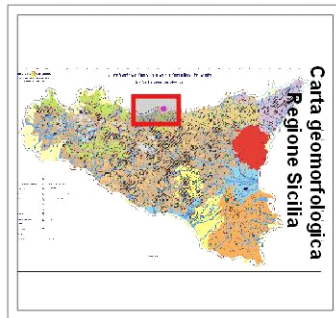


Figura 9 – Stralcio della Carta Geomorfologica in scala 1:250000 (da Regione Siciliana 2002) con indicazione dell'opera in progetto in blu.

6 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

Il territorio in esame risulta caratterizzato da particolari condizioni idrogeologiche determinate dai rapporti tra i complessi carbonatici e i termini argilloso-arenacei. A seconda della litologia e delle caratteristiche strutturali che ne condizionano la permeabilità, i termini argilloso-arenacei si comportano diversamente nei confronti dell'infiltrazione delle acque meteoriche e della circolazione idrica al loro interno (Carbone & Grasso 2012). Nei depositi terrigeni in alternanza flyschoidi, le condizioni sono molto variabili a seconda della presenza di termini a permeabilità differente per tipo e grado; nella zona costiera e lungo i fondovalle, invece, dove i depositi alluvionali sono più estesi e consistenti, vi è la presenza di falde di limitata produttività (Carbone & Grasso 2012).

La ricarica dei principali acquiferi avviene in corrispondenza degli affioramenti carbonatici appartenenti all'Unità Panormide. Questi acquiferi costituiscono l'Acquifero carbonatico superiore, composto dai termini calcareo-dolomitici panormidi. Essi sono separati da formazioni prevalentemente impermeabili, prima di tutti le argille del flysch numidico (Carbone & Grasso 2012).

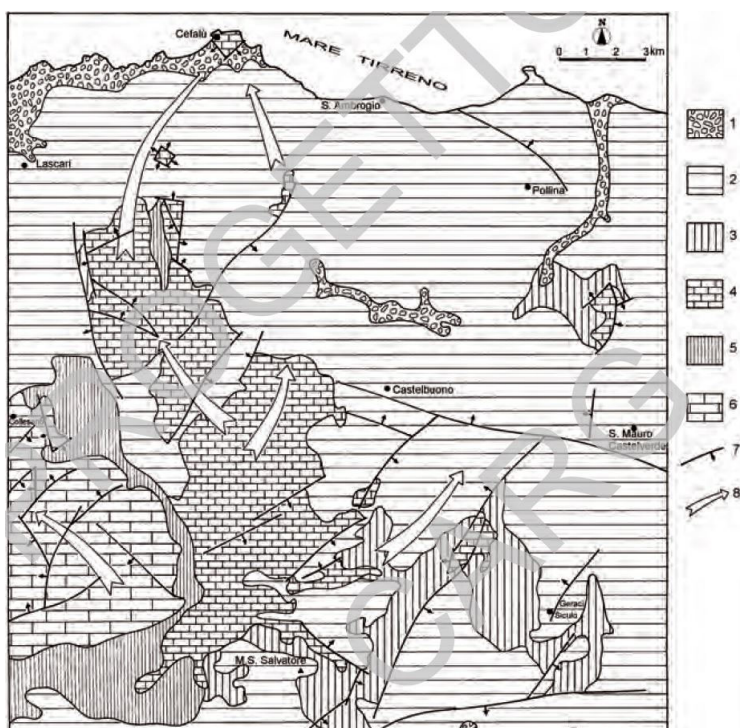


Figura 10 – Carta idrostrutturale: 1) Acquiferi alluvionali; 2) Terreni prevalentemente impermeabili; 3) Aquiclude superiore; 4) Acquifero carbonatico superiore; 5) Aquiclude intermedio; 6) Acquifero carbonatico inferiore; 7) Faglia; 8) Direzione dei deflussi sotterranei (da Carbone & Grasso 2012).

L'Acquifero carbonatico superiore mostra due direzioni principali di deflusso sotterraneo (Figura 10). La falda è sostenuta dalle formazioni impermeabili intermedie ("Argille di Portella Colla" e alternanze di argilliti e radiolariti con termini marnoso-calcarei) e confinata a nord dagli affioramenti carbonatici e dalle formazioni impermeabili superiori ("Argille di Portella di Mandarini" e alternanze argilloso-marnoso-calcaree) (Carbone & Grasso 2012). La direttrice di deflusso più importante è quella che si manifesta in corrispondenza della Rocca di Cefalù, alla cui base si localizzano le maggiori sorgenti (Carbone & Grasso 2012). La seconda direttrice si sviluppa verso nord-est,

parallelamente agli allineamenti strutturali rilevabili al margine orientale degli affioramenti carbonatici tra Pizzo Canna e Rocca Gonato, e si evidenzia attraverso le sorgenti localizzate sugli alti versanti dei massicci carbonatici che appartengono al bacino idrografico del Fiume Pollina (Carbone & Grasso 2012). Lungo questa direzione non risulta esserci continuità strutturale dell'acquifero carbonatico fino alla costa, al contrario a quanto si verifica nel caso della Rocca di Cefalù (Carbone & Grasso 2012). Nelle alternanze flyschoidi superiori sono contenuti, inoltre, discontinui livelli acquiferi di scarso significato che alimentano locali emergenze sorgentizie di portata molto modesta, localizzate al contatto tra banconi quarzarenitici e intercalazioni argillose (Carbone & Grasso 2012).

Alla base degli ammassi carbonatici e quasi al livello del mare sono presenti emergenze sorgentizie. Anche in mare, a breve distanza dalla costa sono note sorgenti di acqua dolce. Per non turbare l'equilibrio tra acque sotterranee e acque marine, al fine della captazione delle acque dolci, è stata costruita una galleria drenante impostata poco sopra il livello del mare su uno dei lati della Rocca di Cefalù (Carbone & Grasso 2012). Prima della costruzione della galleria sono stati condotti studi e indagini che hanno permesso la ricostruzione della superficie piezometrica della falda e la ricostruzione delle modalità di circolazione idrica sotterranea nel rilievo carbonatico (Carbone & Grasso 2012) (Figura 11 e Figura 12).

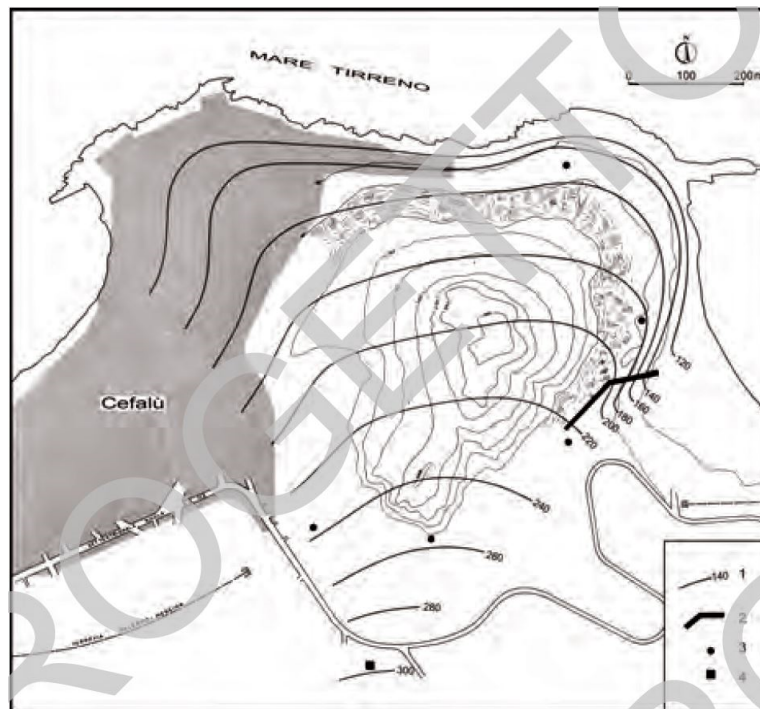


Figura 11 - Piezometria della Rocca di Cefalù: 1) Curva isopiezometrica in m s.l.m.; 2) Galleria drenante; 3) Piezometro; 4) Pozzo (da Carbone & Grasso 2012).

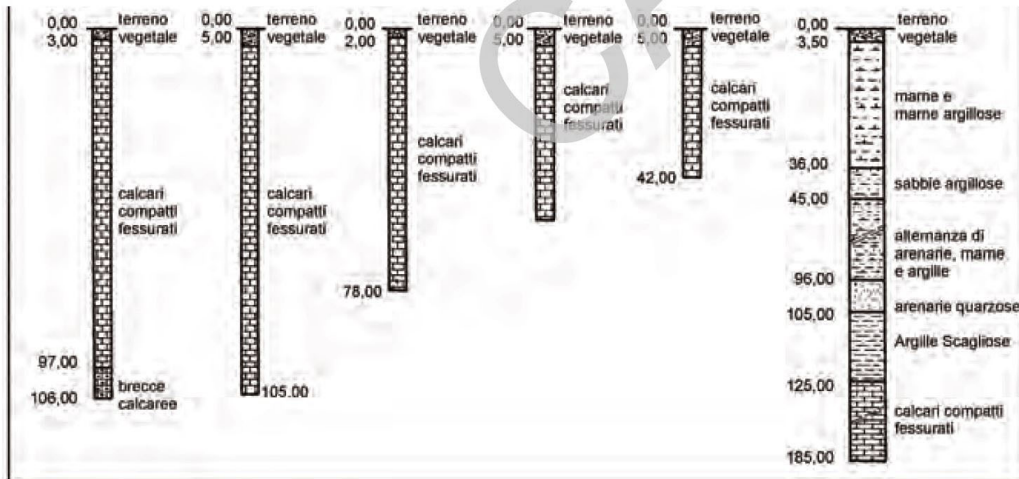


Figura 12 - Stratigrafie dei sondaggi geognostici e del pozzo utilizzati per la realizzazione della galleria drenante (da Carbone & Grasso 2012).

7 INDAGINI GEOGNOSTICHE

Nel corso dello studio sono state consultate e analizzate le indagini geognostiche disponibili nel settore di territorio interessato dagli interventi in progetto. L'intero *set* di dati derivanti dalle indagini di sito ha permesso di configurare un quadro di conoscenze soddisfacente, in relazione con la specifica fase di approfondimento progettuale in corso, circa l'assetto litostratigrafico e geologico-strutturale dei termini litologici interessati dalle opere in progetto.

Complessivamente sono state analizzate le seguenti indagini di sito:

tipologia indagine		totale
SONDAGGI A ROTAZIONE E CAROTAGGIO CONTINUO	piezometro	21
	sismica in foro (DH)	4
POZZETTI	pozzetto esplorativo	1
GEOFISICA	rifrazione	8

Tabella 1 - Sintesi del numero totale di indagini disponibili.

campioni/prove in foro		totale
CAMPIONI PRELEVATI	Indisturbati	23
	Semidisturbati	37
	Rimaneggiati	79
	Litoidi	17
	SPT	4
PROVE IN FORO	SPT	86
	Lefranc/Lugeon	46
	Pressiometriche	11

Tabella 2 - Sintesi del numero totale di campioni e prove in foro disponibili.

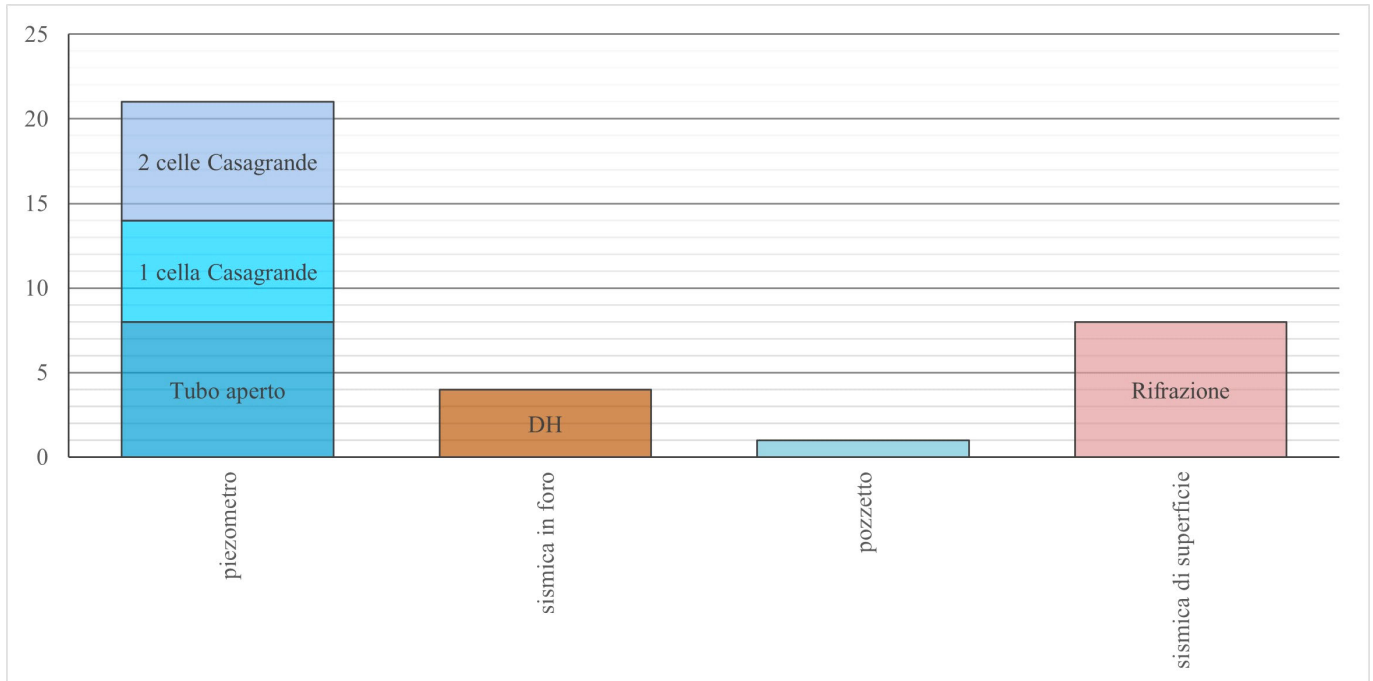


Figura 13 – Grafico mostrante la distribuzione e il numero delle indagini geognostiche a disposizione.

Nei paragrafi seguenti è riportata una sintesi delle indagini geognostiche relative alle opere in progetto. I punti di ubicazione sono riportati nell'allegata "Carta geologica con elementi di geomorfologia e profilo geologico" in scala 1:2000 (RS7B00D69L6GE0001001). I certificati delle prove relativi alla presente fase progettuale sono riportati negli specifici elaborati (RS7B00D69SGGE0000001), mentre i certificati relativi alle indagini pregresse sono riportati negli specifici elaborati come elencato nel paragrafo 3.2 - Documentazione pregressa.

7.1 Sondaggi geognostici

Di seguito vengono elencati tutti i sondaggi geognostici eseguiti nell'ambito di differenti lavori nei settori di studio, con indicazione dei principali dati tecnici relativi ad ogni singola indagine (sigla, coordinate nel sistema di riferimento Monte Mario Italy zona 2/fuso Est (EPSG 3004), quota, strumentazione, profondità (prof), campioni prelevati (C), numero prove SPT, numero prove Lefranc/Lugeon (P) e numero prove Pressiometriche (Ps)).

sigla	Monte Mario Italy 2		quota m s.l.m.	strumentazione	prof m	C	prove in foro		
	X	Y					SPT	P	Ps
BH1_PZ	2433315	4209634	46.9	Piezometro	30.0	7	5	2	2
●CI2022					Totale	7	5	2	2

Tabella 3 - Sintesi dei sondaggi geognostici realizzati nella campagna indagini CI2022.

sigla	Monte Mario Italy 2		quota m s.l.m.	strumentazione	prof m	C
	X	Y				
SL1	2433653	4209607	54.0	Piezometro	50.0	4

sigla	Monte Mario Italy 2		quota m s.l.m.	strumentazione	prof m	C	prove in foro			
	X	Y					SPT	P	Ps	
●CI2012						<i>Totale</i>	4			

Tabella 4 - Sintesi dei sondaggi geognostici realizzati nella campagna indagini CI2012.

sigla	Monte Mario Italy 2		quota m s.l.m.	strumentazione	prof m	C	prove in foro			
	X	Y					SPT	P	Ps	
FER S02	2434033	4209737	54.3	Piezometro	55.0	9	5	3	0	
FER S03	2434114	4209779	51.0	Piezometro	50.0	6	4	3	0	
FER S04	2433922	4209809	45.5	Piezometro	45.0	5	4	2	1	
FER S05	2433848	4209725	47.0	Piezometro	50.0	9	5	3	1	
FER S07	2433933	4209652	66.4	Piezometro	60.0	11	5	3	0	
●CI2005						<i>Totale</i>	40	23	14	2

Tabella 5 - Sintesi dei sondaggi geognostici realizzati nella campagna indagini CI2005.

sigla	Monte Mario Italy 2		quota m s.l.m.	strumentazione	prof m	C	prove in foro			
	X	Y					SPT	P	Ps	
SE06	2433655	4209735	35.0	Piezometro	25.0	3	3	2		
SE07	2433733	4209706	54.0	Piezometro	50.0	10	5	2		
SE05	2433205	4209804	27.3	Piezometro	25.0	6	2	2		
SE10	2433948	4209741	57.3	Piezometro	40.0	4	5	2		
SE13	2433925	4209830	23.0	Piezometro	20.0	3	1	2		
SE14	2434026	4209734	58.0	Piezometro	50.0	10	4	2		
SE15	2434136	4209720	67.8	Piezometro	70.0	18	6	2		
SE17	2434168	4209782	56.0	Sismica in foro	50.0	8	5	2		
SE19	2434237	4209892	63.0	Piezometro	70.0	3	4	2		
●CI2004						<i>Totale</i>	65	35	18	

Tabella 6 - Sintesi dei sondaggi geognostici realizzati nella campagna indagini CI2004.

sigla	Monte Mario Italy 2		quota m s.l.m.	strumentazione	prof m	C	prove in foro		
	X	Y					SPT	P	Ps
S17	2434413	4209896	58.0	Piezometro	50.0	8	0	2	0
S18	2434142	4209768	57.0	Sismica in foro	50.0	3	4	2	1
S19	2434057	4209852	39.0	Piezometro	40.0	0	2	1	0
S20	2433939	4209804	37.0	Sismica in foro	50.0	4	2	1	1
S21	2433926	4209859	23.0	Piezometro	25.0	5	4	0	0
S22	2433833	4209678	51.0	Piezometro	50.0	8	2	2	1

sigla	Monte Mario Italy 2		quota m s.l.m.	strumentazione	prof m	C	prove in foro			
	X	Y					SPT	P	Ps	
S23	2433582	4209691	49.0	Piezometro	45.0	4	3	1	1	
S24	2433435	4209643	55.0	Sismica in foro	55.0	4	3	1	1	
S25	2433333	4209587	54.0	Piezometro	55.0	6	3	2	2	
● CI2001						Totale	42	23	12	7

Tabella 7 - Sintesi dei sondaggi geognostici realizzati nella campagna indagini CI2001.

7.2 Pozzetti esplorativi

Di seguito vengono elencati tutti i pozzetti esplorativi eseguiti nell'ambito di differenti lavori nei settori di studio, con indicazione dei principali dati tecnici relativi ad ogni singola indagine (sigla, coordinate nel sistema di riferimento Monte Mario Italy zona 2/fuso Est (EPSG 3004), quota, profondità e numero dei campioni prelevati).

sigla	Monte Mario/Italy 2		quota m s.l.m.	profondità m	campioni	
	X	Y				
TR1	2433952	4209865	23.0	3.7	2	
■ CI2005					Totale	2

Tabella 8 - Sintesi dei pozzetti esplorativi realizzati nell'ambito della campagna indagini CI2005.

7.3 Indagini geofisiche

Nelle tabelle seguenti è riportata una sintesi di tutte le indagini sismiche disponibili, con indicazione dei principali dati tecnici relativi ad ogni singola indagine (sigla, coordinate nel sistema di riferimento Monte Mario Italy zona 2/fuso Est (EPSG 3004) del punto medio di ogni singolo stendimento, tipologia e lunghezza).

sigla	X	Y	tipologia	lunghezza
P1	2433346	4209655	Rifrazione	120.0
P2	2433340	4209785	Rifrazione	105.0
P3	2433272	4209928	Rifrazione	180.0
P4	2433645	4209679	Rifrazione	110.0

— CI2004
Tabella 9 - Sintesi delle indagini sismiche di superficie realizzate nell'ambito della campagna indagini CI2004.

sigla	X	Y	tipologia	lunghezza
20	2434079	4209761	Rifrazione	230.0
25	2433342	4209583	Rifrazione	115.0
26	2433353	4209610	Rifrazione	115.0
46	2433079	4209551	Rifrazione	115.0

— CI2001
Tabella 10 - Sintesi delle indagini sismiche di superficie realizzate nell'ambito della campagna indagini CI2001.

8 MODELLO GEOLOGICO-TECNICO DI RIFERIMENTO

L'assetto stratigrafico dell'area di stretto interesse progettuale è stato ricostruito integrando i dati ottenuti dal rilevamento geologico effettuato con tutte le informazioni ricavate dalla fotointerpretazione appositamente condotta, dalle fonti bibliografiche disponibili e dalle indagini di sito a disposizione.

8.1 Unità litostratigrafiche

Gli studi appositamente condotti hanno permesso di distinguere e cartografare undici differenti unità geologiche, relative all'Unità Panormidi, all'Unità del Flysch Numidico, all'Unità Sicilidi e ai terreni di copertura. In particolare, le perimetrazioni e le descrizioni geologico-strutturali delle unità individuate nell'area derivano da un'integrazione tra le informazioni riportate in letteratura ed i dati raccolti dal rilevamento geologico di superficie e dalle indagini geognostiche a disposizione. La sintesi del modello geologico di riferimento è riportata nella "Carta geologica con elementi di geomorfologia e profilo geologico" (RS7B00D69L6GE0001001).

Le indagini disponibili e i rilievi di campo hanno consentito di ricostruire il locale assetto litostratigrafico piuttosto regolare. In corrispondenza delle opere sono ovunque presenti depositi terrazzati marini quaternari e un substrato costituito dalle litofacies del Flysch Numidico.

Di seguito viene proposta una dettagliata descrizione delle singole unità litostratigrafiche individuate nel settore d'intervento.

8.1.1 Unità Panormidi

Le Unità Panormidi, nell'area di studio, sono rappresentate da una singola formazione affiorante nella porzione orientale dell'area di studio.

8.1.1.1 Calcarei di Cefalù

Questi depositi affiorano esclusivamente in una piccola porzione nel settore orientale dell'area di studio. Si tratta di calcari biocostruiti di colore grigio bluastro (C) e calcari oolitici o pseudoolitici a rudiste (radiolitidi, caprinidi), gasteropodi, coralli, alghe e briozoi, mal stratificati, in grossi banchi e con livelli di breccie intraformazionali. Lo spessore massimo è di circa 300 m. Dal punto di vista cronostratigrafico, sono riferibili all'intervallo Giurassico superiore - Cretaceo inferiore-medio.

8.1.2 Unità del Flysch Numidico

Le Unità del Flysch Numidico, nell'area di studio, sono rappresentate da una singola formazione affiorante nella porzione sud-orientale dell'area di studio.

8.1.2.1 Flysch Numidico

Questi depositi affiorano esclusivamente in una piccola porzione nel settore sud-orientale dell'area di studio. Sono costituiti da due differenti litofacies a composizione pelitico-arenacea e siltitica. Lo spessore totale è superiore ai 200 m. Dal punto di vista cronostratigrafico, sono riferibili all'intervallo Oligocene superiore - Miocene inferiore.

La litofacies pelitico-arenacea, dal punto di vista litologico, è costituita da un'alternanza di livelli di argille scagliose, argille marnose e argilliti di colore grigio e nerastro (FNaq), con subordinati livelli di siltiti, quarzosiltiti

e quarzareniti di spessore variabile da qualche centimetro ad alcuni metri, spesso campionati in frammenti; superficialmente è presente una fascia di alterazione in cui le argille e le argilliti si presentano di colore bruno giallastro e con patine di ossidazione ocracee.

Mentre, la litofacies siltitica è formata da argilliti e siltiti di colore grigio e nerastro (**FNqs**), fessurate e fratturate a frattura concoide, con sottili e frequenti intercalazioni di argille scagliose e argille sabbiose; le fratture sono frequentemente riempite da calcite secondaria; sono presenti superfici di discontinuità variamente orientate o sub-verticali con superfici lucide e striate.

8.1.3 Unità Sicilidi

Le Unità Sicilidi, nell'area di studio, sono rappresentate da due distinte formazioni, le Tufiti di Tusa e il Flysch di Reitano. Esse affiorano nella porzione meridionale dell'area di studio.

8.1.3.1 Tufiti di Tusa

Questi depositi affiorano esclusivamente in una piccola porzione nel settore sud-orientale dell'area di studio. Si tratta di un'alternanza di arenarie azzurro-verdastre (**TT**), spesso poco cementate, arenarie tufitiche grigio-nerastre a grana generalmente medio-grossa e a cemento carbonatico, marne, calcari marnosi, calcareniti e argille marnose in strati decimetrici. Lo spessore massimo è di circa 480 m. Cronostratigraficamente sono riferibili all'intervallo Eocene superiore – Oligocene.

8.1.3.2 Flysch di Reitano

Questi depositi affiorano esclusivamente in una piccola porzione nel settore meridionale dell'area di studio. Si tratta di arenarie e microconglomerati di colore grigio-bruno e giallastro (**FR**), spesso gradati, in banchi e strati da decimetrici a metrici, intercalati ad argille marnose grigio-verdi e marne grigie; il cemento delle arenarie e dei microconglomerati è di natura silicea e calcarea mentre la matrice argilloso-siltosa. Lo spessore massimo è di circa 500 m. Sono riferibili all'intervallo Oligocene – Miocene inferiore.

8.1.4 Terreni di copertura

I Terreni di copertura sono costituiti da sei differenti formazioni, i Depositi dei terrazzi marini, i Depositi alluvionali sabbioso-ghiaiosi attuali, il Detrito di falda, i Depositi litorali sabbioso-ghiaiosi attuali, i Depositi di spiaggia sabbioso-ghiaiosi attuali e i Terreni di riporto. Essi affiorano diffusamente in tutta l'area di studio.

8.1.4.1 Depositi dei terrazzi marini

Questi terreni affiorano diffusamente nell'area di studio, in particolare nella porzione centrale. Si tratta di sabbie, sabbie limose e sabbie limoso-argillose di colore giallo e giallo-bruno (**tm**), talora grigiastre, a struttura indistinta o debolmente laminata, con locali ghiaie poligeniche eterometriche, da angolose a sub-arrotondate; si rinvencono frequenti livelli di arenarie tenere dallo spessore centimetrico e decimetrico. Lo spessore massimo è di circa 24 m. Sono riferibili all'intervallo Pleistocene medio - Pleistocene superiore.

8.1.4.2 Depositi alluvionali sabbioso-ghiaiosi attuali

Questi terreni affiorano in una piccola porzione del settore nord-occidentale dell'area di studio. Si tratta di ghiaie poligeniche ed eterometriche, da sub-arrotondate ad arrotondate, in matrice sabbioso-argillosa di colore bruno e giallo (**ala**), generalmente abbondante; si rinvencono livelli di sabbie e limi argillosi di colore bruno e giallo, a

struttura indistinta o debolmente laminata. Lo spessore massimo è di circa 35 m. Dal punto di vista cronostatigrafico, sono riferibili all'Olocene.

8.1.4.3 Detrito di falda

Questi terreni affiorano diffusamente in tutta l'area di studio, in particolare nella porzione orientale, meridionale e occidentale. Si tratta di un deposito eterogeneo costituito da sabbie e sabbie limose di colore bruno-rossastro (**dt**) con inclusi lapidei poligenici eterometrici, da angolosi a sub-angolosi; spesso si rinvencono passaggi di argille e argille sabbiose di colore bruno-giallastro, a struttura indistinta, con inclusi lapidei poligenici eterometrici, da angolosi a sub-arrotondati. Lo spessore massimo è di circa 7 m. Sono riferibili all'intervallo Olocene - Attuale.

8.1.4.4 Depositi litorali sabbioso-ghiaiosi recenti

Questi terreni affiorano nel settore settentrionale e nord-occidentale dell'area di studio. Si tratta di ghiaie poligeniche ed eterometriche, da sub-arrotondate ad arrotondate, talora appiattite, in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa di colore grigio e nocciola (**dl**), da scarsa ad abbondante; a luoghi sono presenti sabbie quarzose grossolane di colore giallo, marrone e grigio. Dal punto di vista cronostatigrafico, sono riferibili all'Olocene.

8.1.4.5 Depositi di spiaggia sabbioso-ghiaiosi attuali

Questi terreni affiorano in una piccola porzione del settore nord-occidentale dell'area di studio. Si tratta di ghiaie poligeniche ed eterometriche, da sub-arrotondate ad arrotondate, talora appiattite, in matrice sabbiosa di colore grigio e marrone (**ds**), da scarsa ad abbondante; a luoghi sono presenti sabbie quarzose grossolane di colore giallo e grigio. Sono riferibili all'intervallo Olocene - Attuale.

8.1.4.6 Terreno di riporto

Questi terreni affiorano localmente lungo le principali reti stradali e ferroviarie della zona di studio. Si tratta di ghiaie poligeniche ed eterometriche, da angolose a sub-arrotondate, con locali frammenti di laterizi, calcestruzzo e bitume, in matrice sabbioso-limosa e limoso-sabbiosa di colore grigio e marrone (**r**), da scarsa ad abbondante; a luoghi si rinvencono passaggi di sabbie e sabbie limose grigie e marroni, a struttura indistinta, con diffusi resti vegetali e abbondanti ghiaie poligeniche da sub-angolose a sub-arrotondate. Lo spessore massimo è di circa 12 m. Sono riferibili all'Attuale.

8.2 Differenze rispetto alle cartografie esistenti

Le analisi condotte e le ricostruzioni degli assetti geologico-strutturali riportati in carta hanno permesso di definire il contesto geologico di riferimento e tutti gli elementi di potenziale criticità per le opere in progetto. Al fine di produrre la carta e il profilo geologico, il Foglio CARG 597-610 Cefalù-Castelbuono ha costituito una base bibliografica di riferimento. I risultati ottenuti, però, hanno permesso di constatare importanti differenze nell'assetto stratigrafico con la cartografia bibliografica esistente. L'area di stretto interesse progettuale, secondo il Foglio CARG 597-610 Cefalù-Castelbuono, è caratterizzata da un substrato riferibile alle Tufiti di Tusa, affiorante nella porzione orientale del tracciato e ricoperto da spessori variabili di Depositi alluvionali recenti nella porzione occidentale. L'assetto geologico ricostruito nella presente fase progettuale, invece, grazie anche all'ausilio delle numerose indagini geognostiche eseguite, ha evidenziato la presenza di un substrato riferibile al Flysch Numidico e, nello specifico, delle litofacies pelitico-arenacea e siltitica. Tali litotipi sono ricoperti lungo tutto il tracciato dai Depositi dei terrazzi marini e, specialmente nel settore orientale, da depositi di falda detritica.

Ulteriori differenze sono riferibili alla differente scala di lavoro che determina, nella presente fase progettuale, una migliore precisione nel cartografare le unità di copertura come i Depositi di spiaggia, Depositi litorali, Detrito di falda, Depositi alluvionali, Depositi dei terrazzi marini e Terreno di riporto. Allo stesso modo, l’analisi delle indagini geognostiche pregresse e appositamente realizzate ha permesso di meglio definire gli spessori e i limiti stratigrafici delle unità affioranti.

Dal punto di vista geomorfologico, la cartografia prodotta nel presente studio presenta un buon grado di correlazione con la cartografia del Piano Stralcio per l’Assetto Idrogeologico Regione Sicilia *UoM ITR191* e l’Inventario dei Fenomeni Franosi (Progetto IFFI), denotando la presenza di un movimento franoso complesso nel settore occidentale dell’area di studio e la presenza di alcuni fenomeni franosi di differente tipologia alla base dei rilievi di Cozzo Sant’Elia e La Rocca. Anche in questo caso, alcune differenze possono essere legate alla scala di lavoro di maggior dettaglio del presente lavoro.

8.3 Livelli piezometrici

Per una indicazione preliminare circa l’assetto idrogeologico dell’area di studio sono stati consultati gli studi bibliografici esistenti. In particolare, la “Carta idrogeologica” del comune di Cefalù (Figura 14, Figura 15; Iraci 2019) evidenzia una direzione di deflusso superficiale orientata circa S-N, dai rilievi collinari posti a sud fino al mare. Vengono inoltre segnalate alcune opere di captazione puntuali a nord del tracciato in progetto. In tale elaborato, invece, non viene indicato l’assetto piezometrico.

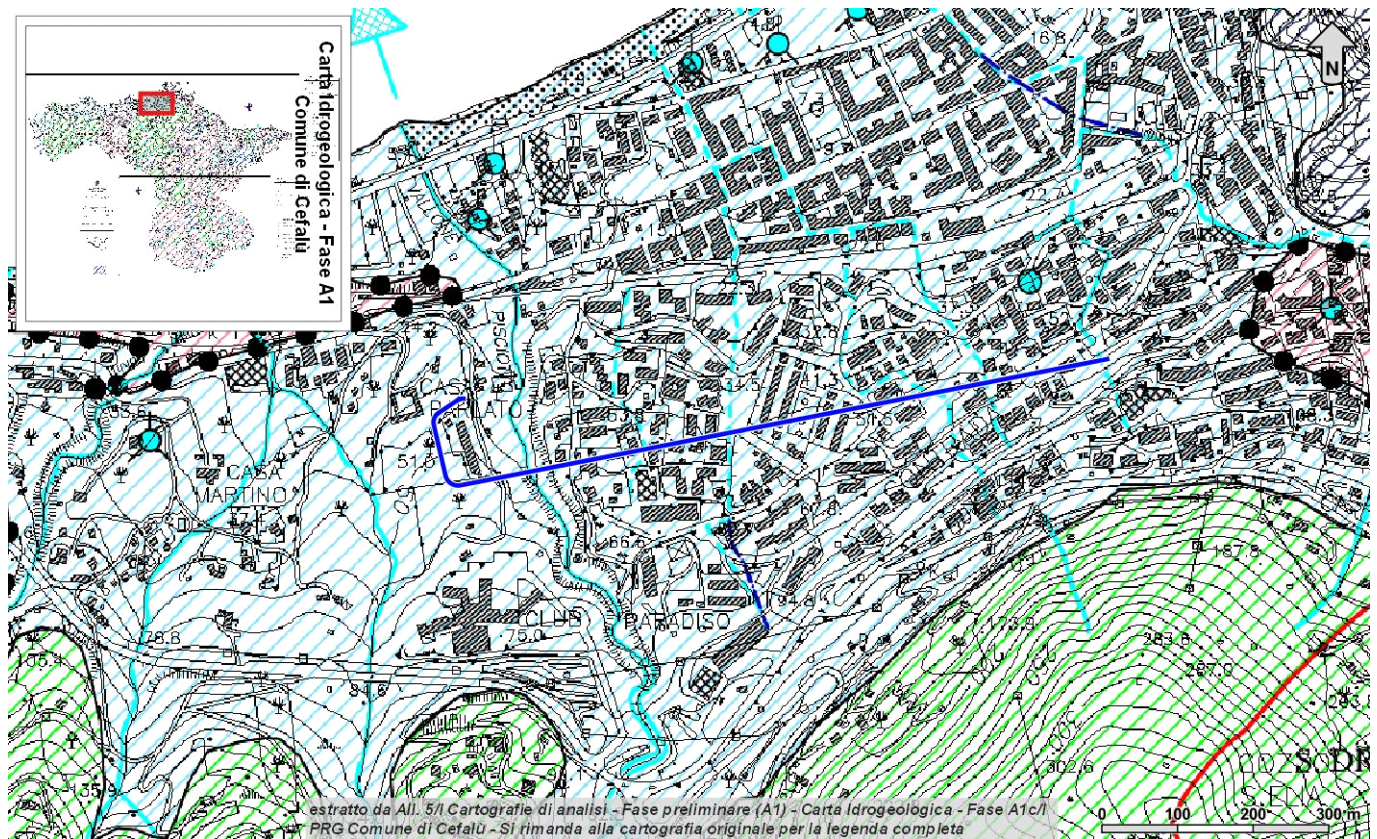


Figura 14 – Stralcio della Carta idrogeologica – Fase A1 del PRG del Comune di Cefalù (Iraci 2019), con indicazione della galleria di sfollamento (blu). Per la legenda cfr. Figura 15.

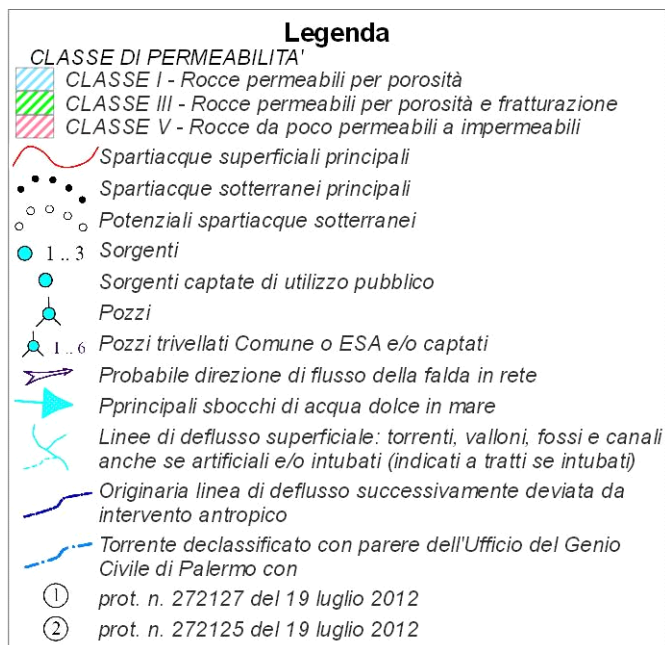


Figura 15 – Legenda della Carta idrogeologica – Fase A1 del PRG del Comune di Cefalù (Iraci 2019).

Di seguito si riportano i dati del livello piezometrico registrato in fase di monitoraggio (CI2004), con indicazione delle principali caratteristiche del foro (sigla, piezometro, data, profondità falda, quota falda e note).

sigla	piezometro	data	profondità falda m p.c.	quota falda m s.l.m	note
SE05	Tubo aperto	05/2004	7.28	20.02	
	cieco: 0.0 - 5.0 finestrato: 5.0 - 25.0	06/2004	7.23	20.07	
SE06	Tubo aperto	05/2004	5.20	29.80	
	cieco: 0.0 - 5.0 finestrato: 5.0 - 25.0	06/2004	5.24	29.76	
SE07	Tubo aperto	05/2004	13.63	40.37	
	cieco: 0.0 - 30.0 finestrato: 30.0 - 50.0	06/2004	13.62	40.38	
SE10	Tubo aperto	05/2004	13.01	44.29	
	cieco: 0.0 - 9.0 finestrato: 9.0 - 40.0	06/2004	13.01	44.29	
SE13	1 cella Casagrande	05/2004	0.60	22.40	
	Cella 1: 10.0	06/2004	0.64	22.36	
SE14	1 cella Casagrande	05/2004	16.51	41.49	
	Cella 1: 44.0	06/2004	17.13	40.87	
SE15	1 cella Casagrande	05/2004	26.38	41.42	
	Cella 1: 65.0	06/2004	23.70	44.10	
SE19	1 cella Casagrande	05/2004	5.37	57.63	

sigla	piezometro	data	profondità falda <i>m p.c.</i>	quota falda <i>m s.l.m</i>	note
	Cella 1: 60	06/2004	5.56	57.44	

Tabella 11 - Dati piezometrici registrati nei fori di sondaggio in fase di monitoraggio nell’ambito della campagna indagini CI2004.

Inoltre, di seguito si riportano i dati del livello piezometrico registrato in fase di perforazione nella presente campagna indagini (CI2022), con indicazione delle principali caratteristiche del foro (sigla, piezometro, data, profondità falda, quota falda e note).

sigla	piezometro	data	profondità falda <i>m p.c.</i>	quota falda <i>m s.l.m</i>	note
BH1_PZ	1 cella Casagrande Cella 1: 15.0	10/2022	10.00	36.90	

Tabella 12 - Dati piezometrici registrati nei fori di sondaggio in fase di perforazione nell’ambito della presente campagna indagini (CI2022).

8.4 Caratteristiche di permeabilità

Nell’area in esame sono stati individuati e cartografati sette complessi idrogeologici, distinti sulla base delle differenti caratteristiche di permeabilità e del tipo di circolazione idrica che li caratterizza. Di seguito, vengono descritti i caratteri peculiari dei diversi complessi individuati, seguendo uno schema basato sull’assetto geologico e litostratigrafico dell’area in esame.

Nello specifico, la definizione delle caratteristiche idrogeologiche dei vari complessi presenti nell’area è stata compiuta in considerazione delle prove di permeabilità (Lenfranc e Lugeon) precedentemente realizzate (cfr. Tabella 13), in funzione delle caratteristiche sedimentologiche e litologiche dei terreni, nonché sulla base di dati bibliografici relativi a terreni con le medesime caratteristiche geologiche. Di seguito vengono sintetizzati i principali complessi idrogeologici presenti nell’area di studio:

- **Complesso calcareo-breccioso (CCB):** questo complesso è rappresentato da calcari biocostruiti e calcari oolitici o pseudoolitici a rudiste, gasteropodi, coralli, alghe e briozoi, mal stratificati, in grossi banchi e con livelli di breccie intraformazionali dell’unità C. Tali terreni costituiscono acquiferi fessurati di elevata trasmissività, fortemente eterogenei ed anisotropi, e sono sede di falde idriche sotterranee di discreta rilevanza, sia frazionate che a deflusso unitario, contenute nelle porzioni più carsificate e fratturate dell’ammasso. La permeabilità, per fessurazione e carsismo, è variabile da media ad alta. A questo complesso si può attribuire, quindi, un coefficiente di permeabilità k variabile tra $1 \cdot 10^{-5}$ m/s e $1 \cdot 10^{-2}$ m/s.
- **Complesso argillitico-siltitico (CRS):** a tale complesso sono riferite le argilliti e siltiti, fessurate e fratturate, con sottili e frequenti intercalazioni di argille scagliose e argille sabbiose, le cui fratture sono frequentemente riempite da calcite secondaria dell’unità FNqs. Tali depositi costituiscono acquiferi misti di scarsa trasmissività, fortemente eterogenei ed anisotropi, e sono sede di falde idriche di ridotta rilevanza confinate all’interno delle porzioni più fratturate ed alterate dell’ammasso. La permeabilità, per porosità e fessurazione, è variabile da molto bassa a bassa. Al presente complesso può quindi essere attribuito un coefficiente di permeabilità k compreso tra $1 \cdot 10^{-9}$ m/s e $1 \cdot 10^{-6}$ m/s.
- **Complesso pelitico-arenaceo (CPA):** il complesso in questione è formato dalle argille scagliose, argille marnose e argilliti, con subordinati livelli di siltiti, quarzosiltiti e quarzareniti di spessore variabile da

qualche centimetro ad alcuni metri dell'unità **FNaq**. Questi depositi costituiscono acquiferi misti di modesta trasmissività, piuttosto eterogenei ed anisotropi, e sono sede di falde idriche di ridotta rilevanza confinate all'interno delle porzioni più fratturate ed alterate dell'ammasso. La permeabilità, per porosità e fessurazione, è variabile da molto bassa a bassa. Al complesso in questione si può attribuire, quindi, un coefficiente di permeabilità k variabile tra $1 \cdot 10^{-9}$ m/s e $1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

- **Complesso arenaceo-pelitico (CAP):** questo complesso è rappresentato da arenarie e microconglomerati, spesso gradati, in banchi e strati da decimetrici a metrici, intercalati ad argille marnose e marne e da alternanze di arenarie, arenarie tufitiche, marne, calcari marnosi, calcareniti e argille marnose in strati decimetrici delle unità **FR** e **TT**. Tali terreni costituiscono acquiferi porosi di discreta trasmissività, piuttosto eterogenei ed anisotropi; sono sede di corpi idrici sotterranei di modesta rilevanza, contenute nelle porzioni più fessurate e porose dell'ammasso. La permeabilità, per porosità e fessurazione, è variabile da bassa a media. A questo complesso si può attribuire, quindi, un coefficiente di permeabilità k variabile tra $1 \cdot 10^{-7}$ m/s e $1 \cdot 10^{-4}$ m/s.
- **Complesso dei depositi alluvionali (CAL):** a tale complesso sono riferite le ghiaie poligeniche ed eterometriche, da sub-arrotondate ad arrotondate, in matrice sabbioso-argillosa, generalmente abbondante, con livelli di sabbie e limi argillosi, a struttura indistinta o debolmente laminata dell'unità **al**. Tali depositi costituiscono acquiferi porosi di modesta trasmissività, piuttosto eterogenei ed anisotropi; sono sede di corpi idrici sotterranei di scarsa importanza, frazionati o a deflusso unitario, direttamente influenzati dal regime delle precipitazioni meteoriche. La permeabilità, esclusivamente per porosità, è variabile da bassa a media. Al presente complesso può quindi essere attribuito un coefficiente di permeabilità k compreso tra $1 \cdot 10^{-7}$ m/s e $1 \cdot 10^{-3}$ m/s m/s.
- **Complesso dei depositi detritici e terrazzati (CDT):** il complesso in questione è formato da sabbie, sabbie limose e sabbie limoso-argillose a struttura indistinta o debolmente laminata con inclusi lapidei poligenici eterometrici, da angolosi a sub-arrotondati, con frequenti passaggi di argille e argille sabbiose e livelli di arenarie tenere dallo spessore centimetrico e decimetrico delle unità **dt** e **tm**. Questi depositi costituiscono acquiferi porosi di buona trasmissività, fortemente eterogenei ed anisotropi, e sono sede di falde idriche sotterranee di modesta rilevanza, localmente autonome ma globalmente a deflusso unitario, alimentate dalle precipitazioni meteoriche e con frequenti interscambi con i corpi idrici superficiali e limitrofi. La permeabilità, esclusivamente per porosità, è variabile da bassa a media. Al complesso in questione si può attribuire, quindi, un coefficiente di permeabilità k variabile tra $1 \cdot 10^{-7}$ m/s e $1 \cdot 10^{-4}$ m/s.
- **Complesso dei depositi litorali (DLI):** questo complesso è rappresentato da ghiaie poligeniche ed eterometriche, da sub-arrotondate ad arrotondate, talora appiattite, in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa, da scarsa ad abbondante, con a luoghi sabbie quarzose grossolane delle unità **ds** e **dl**. Tali terreni costituiscono acquiferi porosi di notevole trasmissività, fortemente eterogenei ed anisotropi; sono sede di falde idriche sotterranee di discreta importanza, parzialmente alimentate dalle precipitazioni meteoriche e direttamente collegate al mare. La permeabilità, esclusivamente per porosità, è variabile da bassa ad alta. A questo complesso si può attribuire, quindi, un coefficiente di permeabilità k variabile tra $1 \cdot 10^{-6}$ m/s e $1 \cdot 10^{-2}$ m/s.

Di seguito si riporta una sintesi delle prove di permeabilità relative alla tratta in esame, con indicazione dei valori di permeabilità determinati.

sondaggio	prova	tipologia	profondità <i>m</i>	permeabilità <i>m/s</i>	campagna indagini
S17	LU1	Lugeon	25.0 - 26.0	9.00E-07	CI2001
S17	LU2	Lugeon	43.0 - 44.0	6.00E-07	CI2001
S18	LU1	Lugeon	25.0 - 26.0	9.60E-07	CI2001
S18	LU2	Lugeon	43.0 - 44.0	4.50E-07	CI2001

sondaggio	prova	tipologia	profondità <i>m</i>	permeabilità <i>m/s</i>	campagna indagini
S19	LU1	Lugeon	21.0 - 22.0	6.00E-07	CI2001
S20	LU1	Lugeon	39.0 - 40.0	4.20E-07	CI2001
S22	LU1	Lugeon	26.0 - 27.0	3.10E-06	CI2001
S22	LU2	Lugeon	39.0 - 40.0	1.80E-06	CI2001
S23	LU1	Lugeon	34.0 - 35.0	3.60E-07	CI2001
S24	LU1	Lugeon	43.0 - 44.0	8.70E-07	CI2001
S25	LU1	Lugeon	40.0 - 41.0	7.20E-07	CI2001
S25	LU2	Lugeon	41.5 - 42.5	6.60E-07	CI2001
SE05	LU1	Lugeon	14.0 - 15.0	7.78E-07	CI2004
SE05	LU2	Lugeon	19.0 - 20.0	2.90E-07	CI2004
SE06	LE1	Lefranc	9.0 - 10.0	2.50E-05	CI2004
SE06	LE2	Lefranc	14.0 - 15.0	5.87E-09	CI2004
SE07	LE1	Lefranc	26.5 - 27.5	9.30E-05	CI2004
SE07	LU1	Lugeon	40.0 - 41.0	1.10E-06	CI2004
SE10	LU1	Lugeon	23.0 - 24.0	3.95E-07	CI2004
SE10	LU2	Lugeon	33.0 - 34.0	4.74E-07	CI2004
SE13	LU1	Lugeon	2.4 - 3.4	1.10E-06	CI2004
SE13	LU2	Lugeon	6.3 - 8.3	3.60E-07	CI2004
SE14	LU1	Lugeon	34.0 - 35.0	5.52E-07	CI2004
SE14	LU2	Lugeon	43.0 - 44.0	4.63E-07	CI2004
SE15	LU1	Lugeon	54.0 - 55.0	8.53E-07	CI2004
SE15	LU2	Lugeon	63.0 - 64.0	3.85E-07	CI2004
SE17	LU1	Lugeon	29.5 - 30.5	1.26E-07	CI2004
SE17	LU2	Lugeon	39.0 - 41.5	4.20E-07	CI2004
SE19	LU1	Lugeon	51.5 - 53.5	5.92E-07	CI2004
SE19	LU2	Lugeon	59.0 - 60.0	4.43E-07	CI2004
FER S02	LE1	Lefranc	15.0 - 17.0	5.07E-07	CI2005
FER S02	LU1	Lugeon	33.0 - 35.0	1.34E-07	CI2005
FER S02	LU2	Lugeon	44.0 - 46.0	8.34E-08	CI2005
FER S03	LE1	Lefranc	9.0 - 10.5	2.07E-06	CI2005
FER S03	LE2	Lefranc	13.5 - 14.9	1.07E-08	CI2005
FER S03	LU1	Lugeon	30.0 - 31.0	2.29E-07	CI2005
FER S04	LE1	Lefranc	9.0 - 10.2	5.97E-07	CI2005
FER S04	LU1	Lugeon	35.0 - 38.0	1.90E-07	CI2005
FER S05	LE1	Lefranc	14.0 - 15.3	2.40E-07	CI2005

sondaggio	prova	tipologia	profondità <i>m</i>	permeabilità <i>m/s</i>	campagna indagini
FER S05	LU1	Lugeon	30.0 - 33.0	5.24E-08	CI2005
FER S05	LU2	Lugeon	39.0 - 42.0	1.01E-07	CI2005
FER S07	LE1	Lefranc	14.0 - 15.5	1.78E-07	CI2005
FER S07	LU1	Lugeon	37.0 - 39.0	4.98E-08	CI2005
FER S07	LU2	Lugeon	48.0 - 51.0	5.64E-08	CI2005
BH1_PZ	LE1	Lefranc	2.0 - 3.0	3.13E-06	CI2022
BH1_PZ	LE2	Lefranc	24.0 - 25.0	1.64E-07	CI2022

Tabella 13 - Prospetto sintetico delle prove di permeabilità.

9 GEOMORFOLOGIA DELL'AREA

L'evoluzione geomorfologica dell'area ed i principali elementi morfologici presenti sul territorio sono direttamente connessi con l'evoluzione geodinamica della Catena Appenninico-Maghrebide, i processi gravitativi di versante, con la natura e la permeabilità dei litotipi presenti, nonché l'assetto strutturale.

Inoltre, l'intenso grado di antropizzazione dell'area, in particolare, ha modificato l'assetto morfologico originario attraverso scavi, sbancamenti e la messa in posto di ingenti spessori di materiali di risulta che, localmente, mascherano le reali condizioni geologiche e geomorfologiche.

Dal punto di vista morfologico, l'area di studio si colloca su un versante caratterizzato da valori medio bassi di pendenza, alla base di alcuni rilievi collinari da mediamente a molto acclivi. Tali rilievi rappresentano la propaggine più settentrionale della catena montuosa delle Madonie, a ridosso della costa tirrenica. Infatti, il versante oggetto di studi, costituito da depositi marini terrazzati e detritici di versante, è delimitato immediatamente a nord da un'area pianeggiante riferibile al settore litoraneo/di spiaggia della costa tirrenica.

La porzione centrale dell'area di studio, in prossimità dell'attuale linea ferroviaria, è caratterizzata da una superficie marina terrazzata immergente verso la costa e localmente incisa da alcune aste fluviali che si originano sui retrostanti rilievi collinari. I terrazzi marini nel settore occidentale sono delimitati da evidenti scarpate di origine marina, mentre solo raramente sono delimitati da scarpate morfologiche nella porzione centrale, dove si raccordano gradualmente con il settore di pianura costiera, sia a causa dei processi erosivi che hanno agito nel tempo, sia per la diffusa azione dell'uomo che ha obliterato parte delle morfologie originarie. Lateralmente, invece, i terrazzi morfologici sono a luoghi delimitati da scarpate di degradazione con andamento parallelo ai corsi d'acqua in approfondimento. L'azione di questi corsi d'acqua ha contribuito a generare l'energia di rilievo necessaria per la formazione di tali forme erosive.

L'azione delle acque correnti superficiali, quindi, è evidente in corrispondenza dei piccoli corsi d'acqua sopra citati, dove è possibile osservare orli di scarpata di erosione fluviale, solchi di erosione concentrata e alvei in approfondimento.

I fenomeni di versante connessi con la gravità sono distribuiti prevalentemente alla base dei rilievi che delimitano l'intera area di studio, ad est e a sud. La porzione più bassa del versante di Cozzo Sant'Elia è caratterizzata da fenomeni di franosità diffusa e scarpate di degradazione, mentre evidenze di frane da crollo o ribaltamento e scarpate di degradazione sono presenti lungo il versante occidentale del rilievo La Rocca. Nel settore occidentale dell'area di studio, una frana complessa stabilizzata interessa la superficie terrazzata, dall'ospedale fino a pochi metri dall'attuale tracciato ferroviario, senza interferire con esso. Allo stato attuale, tale movimento franoso, che presenta una lunghezza di circa 450 m, una larghezza di circa 160 m e uno spessore anche superiore a 10 m, non presenta evidenze di riattivazione. Nella porzione medio-alta di questo fenomeno si imposta un ulteriore movimento franoso complesso quiescente. Tale fenomeno è caratterizzato da una lunghezza di circa 100 m e una larghezza di circa 50 m e si trova a circa 100 m a sud-ovest dalla tratta in oggetto.

Infine, ricadendo nell'area urbana di Cefalù, nel settore di studio risultano particolarmente diffusi elementi e forme antropiche. L'elevata antropizzazione dell'area è testimoniata dalle numerose strutture e infrastrutture antropiche presenti, quali edifici, strade, ferrovie, ponti e interventi di regimazione idraulica. In molti settori sono presenti materiali di riporto antropico, con spessori e caratteristiche sedimentologiche estremamente variabili. Gran parte di questi terreni si rinvencono in corrispondenza delle principali infrastrutture dell'area, quali ferrovie, strade ed edifici di grosse dimensioni. Ai suddetti elementi si aggiungono numerosi tagli e scarpate antropiche realizzate sia lungo le principali arterie stradali e ferroviarie, che in corrispondenza di fabbricati e abitazioni.

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>LINEA PALERMO – MESSINA. RADDOPPIO FIUMETORTO – CEFALU' CASTELBUONO. TRATTA OGLIASTRILLO - CASTELBUONO</p> <p>Fermata Cefalù –Rampa di accesso alla galleria di sfollamento</p>												
<p>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA ED IDROGEOLOGICA</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RS7B</td> <td>00</td> <td>D69RG</td> <td>GE 00 01 001</td> <td>A</td> <td>39 di 66</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RS7B	00	D69RG	GE 00 01 001	A	39 di 66
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RS7B	00	D69RG	GE 00 01 001	A	39 di 66								

9.1 Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico Regione Sicilia

Le cartografie tematiche del Piano stralcio di Assetto Idrogeologico della Regione Sicilia (PAI 2005 aggiornamento 2021) riportano areali di pericolosità geomorfologica connessi con la stabilità di versante nell'area di studio.

In particolare, la porzione più occidentale della tratta di intervento presenta interferenza con un areale a pericolosità geomorfologica bassa (**P0**) che si trova in corrispondenza dell'ospedale di Cefalù (Figura 17). Inoltre, ad oltre 110 m a sud della porzione occidentale della tratta è presente un areale a pericolosità geomorfologica media (**P2**) che non interessa direttamente l'opera in questione, così come un areale a pericolosità geomorfologica elevata (**P3**) (sigla: 027-6CX-016) ad oltre 150 m a sud della porzione più orientale. Infine, a circa 310 m a nord-est della porzione più orientale della tratta, è presente un areale a pericolosità geomorfologica molto elevata (**P4**) (sigla: 027-6CX-030) che non interessa direttamente l'opera in questione.

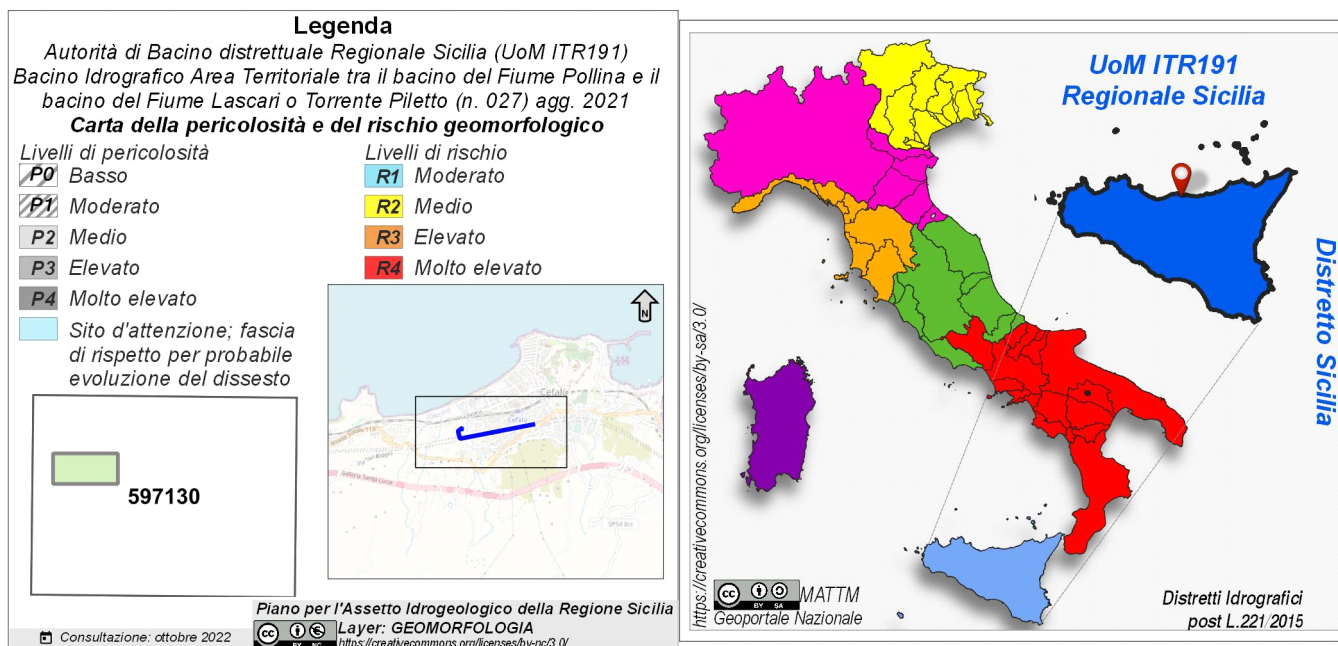


Figura 16 - Legenda delle cartografie del Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico della Regione Sicilia (PAI 2005 aggiornamento 2021 – 027 Bacino Idrografico dell'Area territoriale tra il Bacino del Fiume Pollina e il Bacino del Fiume Lascari o Torrente Piletto) con tavola di inquadramento delle figure seguenti.

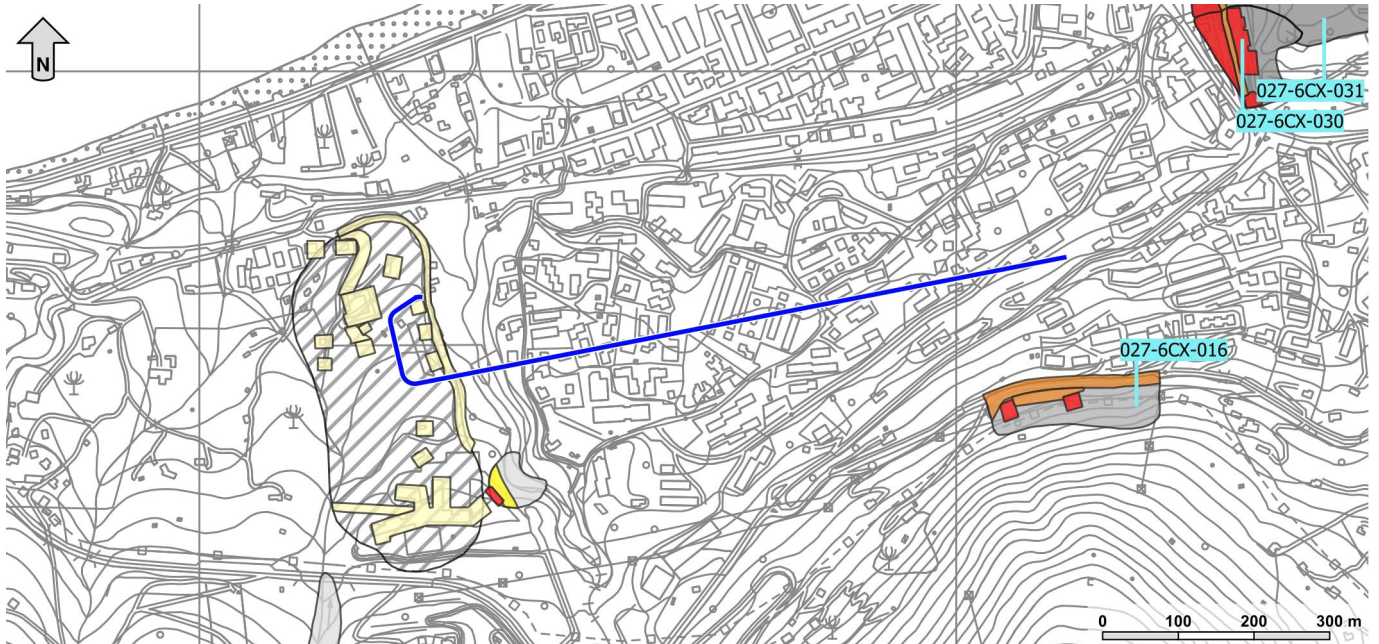


Figura 17 - Stralcio della carta della pericolosità e del rischio geomorfologico del Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico della Regione Sicilia (PAI 2005 aggiornamento 2021 – 027 Bacino Idrografico dell'Area territoriale tra il Bacino del Fiume Pollina e il Bacino del Fiume Lascari o Torrente Piletto), con individuazione della galleria di sfollamento in blu (legenda: Figura 16).

9.2 Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (IFFI)

Dalla consultazione dell'inventario frane IFFI (Figura 18) si evidenziano fenomeni franosi nell'area di studio. In corrispondenza della porzione più occidentale della tratta è riportata una frana complessa con stato di attività stabilizzato (id frana: 0825897500) che interessa direttamente la tratta in progetto. Sono inoltre riportati areali che non interessano direttamente l'opera in progetto. In particolare, a circa 110 m a sud della porzione occidentale del tracciato è riportata una frana complessa con stato di attività attivo/riattivato/sospeso (id frana: 0825897600), ad oltre 200 m a sud della porzione più orientale della tratta, è riportato un fenomeno da crollo/ribaltamento con stato di attività attivo/riattivato/sospeso (id frana: 0825898800), mentre, ad oltre 320 m a nord-est della porzione più orientale del tracciato, è riportato un crollo/ribaltamento con stato di attività attivo/riattivato/sospeso (id frana: 0825898200).

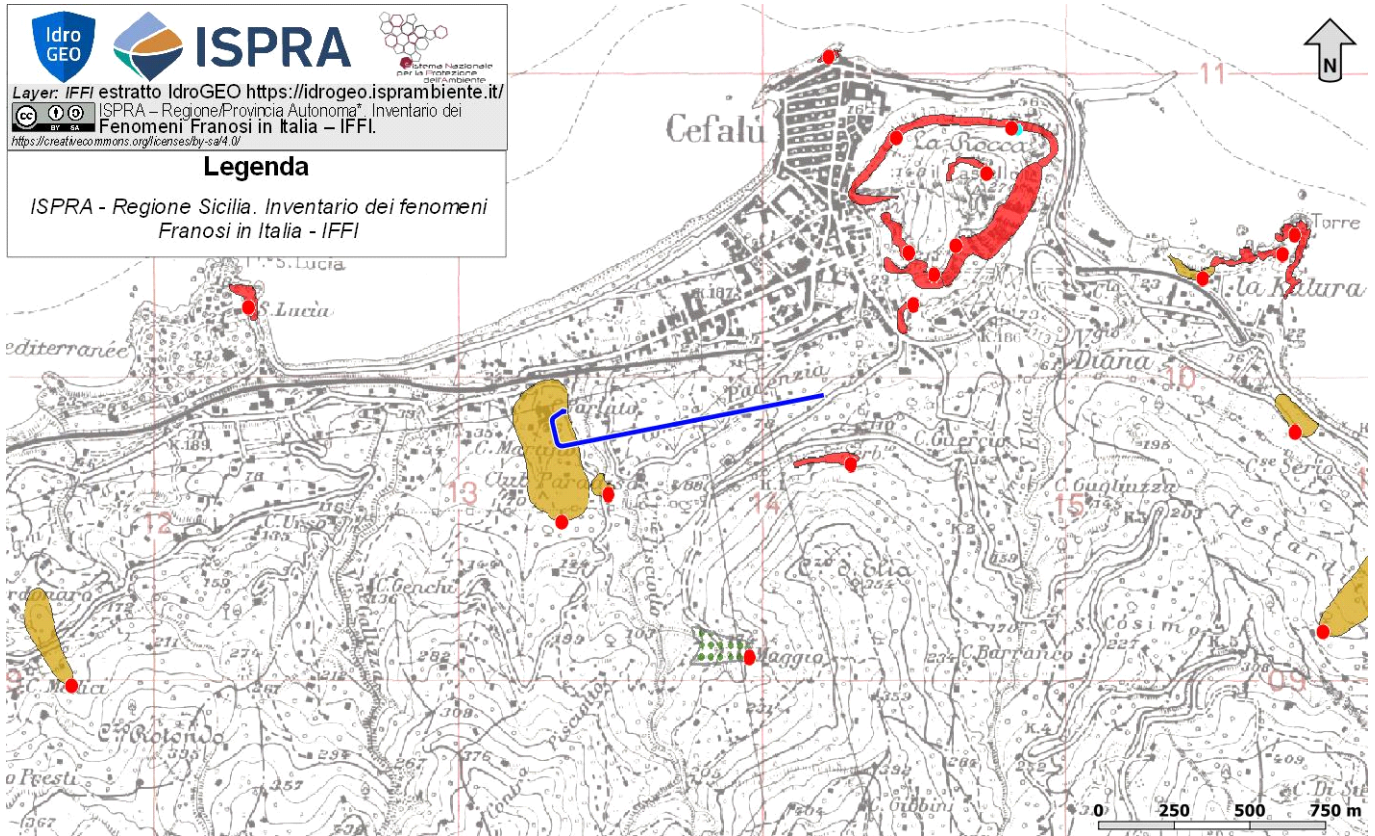


Figura 18 - Stralcio della carta dell'“Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia” progetto IFFI (Regione Sicilia 2016), con individuazione della galleria di sfollamento in progetto.

Ad ogni modo, il livello di criticità specifica dei fenomeni di dissesto è relativo all'attuale contesto antropico e morfo-climatico dell'area. Pertanto, la possibile influenza dei fenomeni di dissesto sulle opere in progetto, dove segnalato, andrà puntualmente valutata ed analizzata in funzione delle specifiche scelte progettuali e delle indicazioni fornite nel presente studio specialistico.

10 SISMICITÀ DELL'AREA

La Sicilia centro-settentrionale presenta un elevato rischio sismico, connesso alla particolare conformazione geologica del territorio e all'evoluzione recente di questo settore di catena. Infatti, i dati relativi la sismicità storica indicano che gran parte della regione è stata interessata, nel corso della sua storia, da frequenti ed importanti eventi sismici, sia *onshore* che *offshore* (Pondrelli et al. 2006; Lavecchia et al. 2007; Catalano et al. 2013).

10.1 Sismicità regionale

Nel Mar Tirreno meridionale, in prossimità della costa siciliana, i terremoti sono stati frequenti sia in epoca storica che in tempi recenti (Giunta et al. 2009; Agate et al. 2000; Catalano et al. 2013). Questi eventi, distribuiti lungo una fascia circa E-W, evidenziano che il margine tirrenico meridionale è una regione tettonicamente attiva, con sequenze sismiche di bassa e media magnitudo (Pondrelli et al. 1998, 2006). I meccanismi focali indicano che i terremoti sono prevalentemente connessi a *thrust* con asse di massima compressione orizzontale e con direzione circa N-S (Agate et al. 2000).

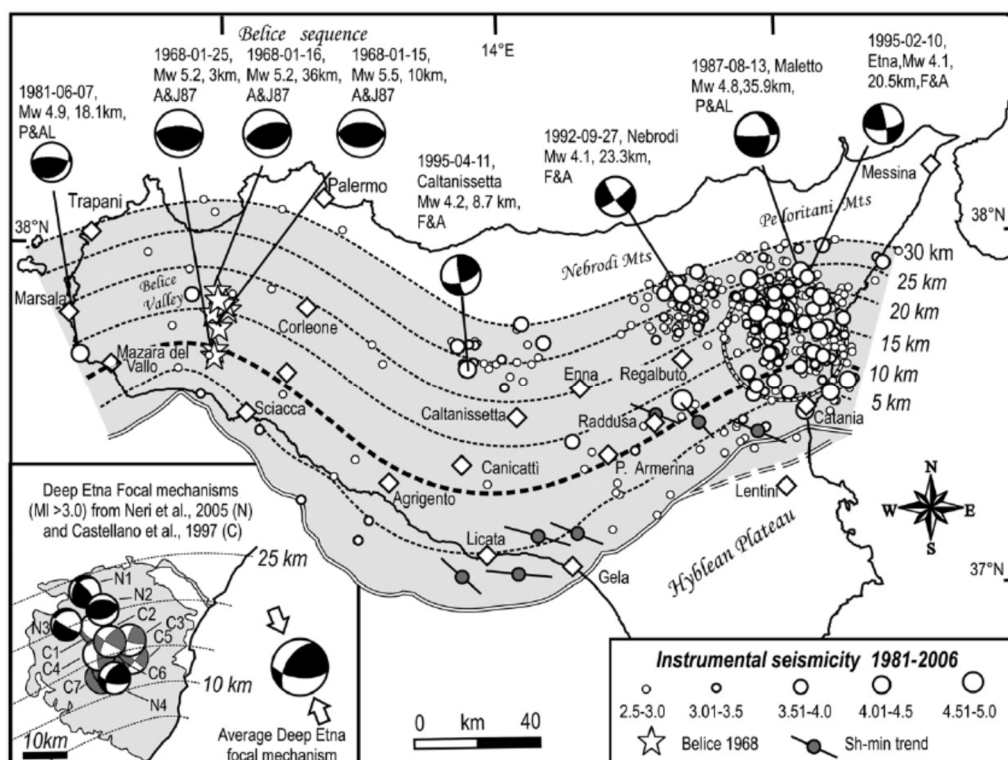


Figura 19 – Distribuzione spaziale dei terremoti storici e strumentali della Regione Sicilia (da Lavecchia et al. 2007).

Nei settori *onshore*, tra la costa tirrenica e le Madonie (Figura 19), sono stati registrati numerosi eventi recenti di media e bassa magnitudo (Catalano et al. 2013). In questo caso, i meccanismi focali indicano che i terremoti sono prevalentemente connessi a un regime di tipo distensivo o transtensivo (Lavecchia et al. 2007; Billi et al. 2009), profondamente differente da quello dei settori *offshore*. Nonostante il gran numero di dati strumentali, non ci sono indicazioni sicure sulla presenza di strutture tettoniche attive in questo settore della Sicilia.

10.2 Classificazione sismica e pericolosità sismica di base

L'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n° 3274 del 20/03/2003 (e successive modifiche ed integrazioni) – “*Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di Normative tecniche per le costruzioni in zona sismica*” disciplinava la classificazione sismica dei comuni d'Italia. Con l'emanazione dell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri 3519/06 lo Stato ha definito i criteri nazionali che ciascuna Regione deve seguire per l'aggiornamento della classificazione sismica del proprio territorio. Questo strumento normativo ha portato a valutare la classificazione sismica del territorio secondo parametri sismologici svincolati dal solo criterio politico del limite amministrativo fin qui utilizzato.

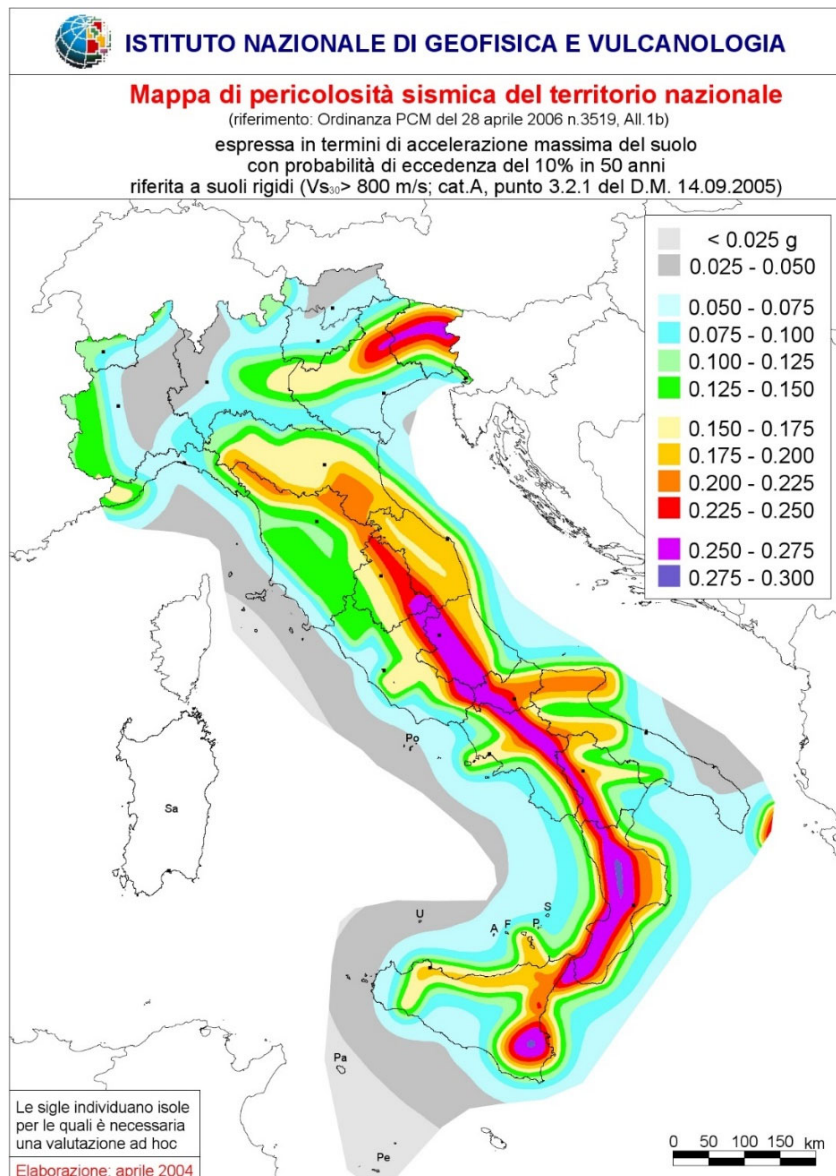


Figura 20 – Mapa di pericolosità sismica del territorio nazionale (da Meletti & Montaldo 2007) contenuta nel Progetto S1 dell'INGV-DPC (<http://esse1.mi.ingv.it/d2.html>).

In seguito a tale classificazione, effettuata per ognuno dei comuni d'Italia, è stato emanato un nuovo provvedimento che prevede l'adozione delle stime di pericolosità sismica contenute nel Progetto S1 dell'INGV-DPC (Figura 20). Detto studio è stato condotto dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) che ha prodotto, per l'intera comunità nazionale, uno strumento scientificamente valido ed avanzato, nonché utilizzabile nell'immediato in provvedimenti normativi.

In particolare, con tale provvedimento è stato superato il concetto di una classificazione sismica legata al singolo territorio comunale e si è posta nuova attenzione sul concetto di una pericolosità sismica uniforme a livello nazionale, stimata sulla base di quattro fondamentali zone sismiche. La vecchia classificazione sismica produceva, sovente, situazioni in cui un comune classificato sismico era fisicamente confinante con un comune non classificato e, pertanto, si assisteva ad un brusco cambiamento nei parametri sismici che avveniva in un breve arco di territorio.

Attualmente, la pericolosità sismica è stimata con una precisione maggiore e, di fatto, le variazioni tra le caratteristiche sismiche di aree adiacenti sono continue e graduali. Successivamente verrà mantenuta, infatti, la classificazione secondo la quale il territorio nazionale è suddivisibile in quattro differenti classi sismiche, ma a scopo esclusivamente amministrativo.

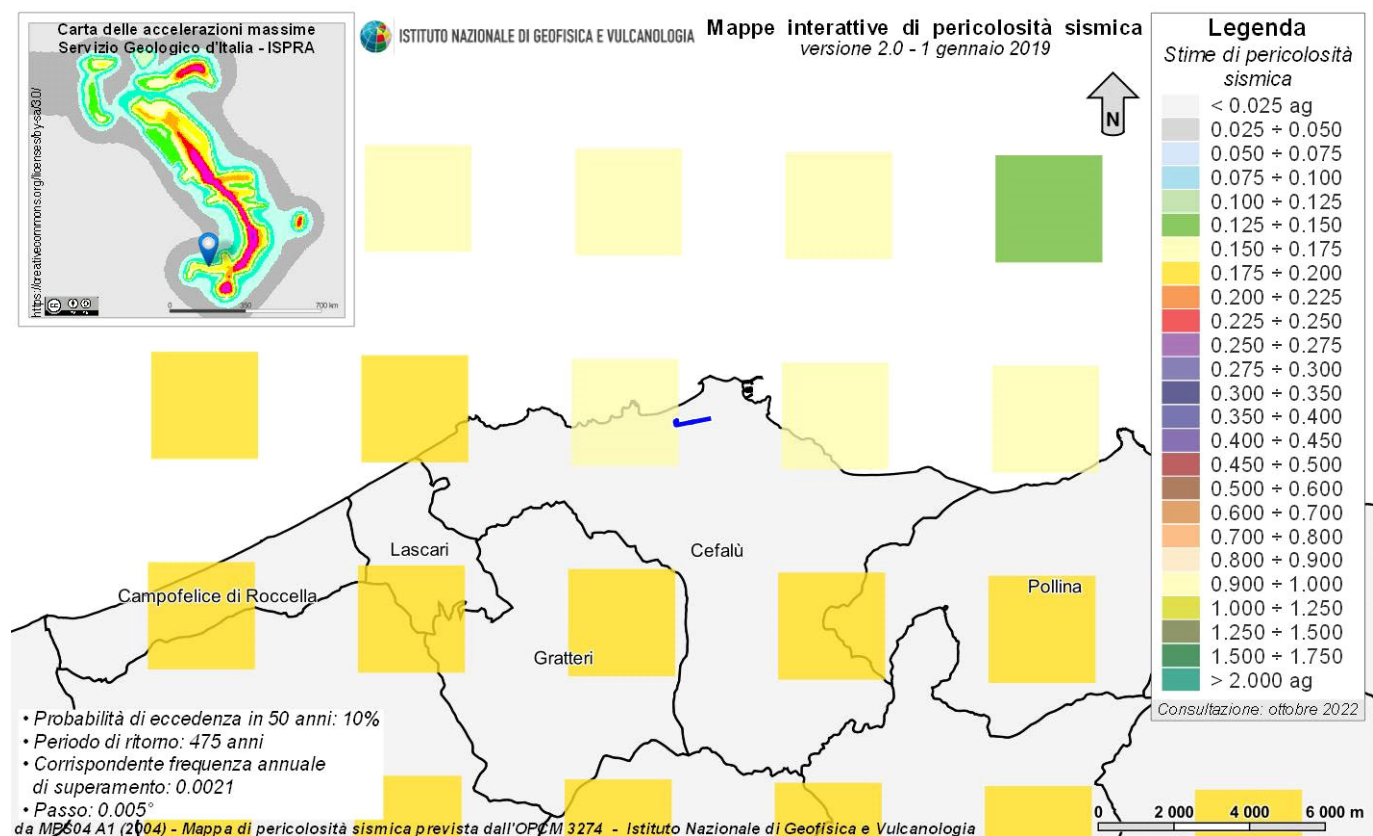


Figura 21 – Mappa di pericolosità sismica per l'area di interesse, in scala 1:200000; i colori della legenda indicano le diverse accelerazioni del suolo (<http://esse1-gis.mi.ingv.it>).

All'attuale stato delle conoscenze e del progresso scientifico è possibile, attraverso l'applicazione *WebGIS*, consultare in maniera interattiva le mappe di pericolosità sismica (Figura 21). In particolare, per la zona interessata

dall'opera in progetto, i valori di accelerazione al suolo (con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni) sono compresi all'incirca nell'intervallo 0.150-0.200 a_g (accelerazione massima del suolo).

La pericolosità sismica di un territorio è funzione di un complesso insieme di parametri naturali e rappresenta la probabilità che un evento sismico di data intensità si manifesti in una certa area in un determinato intervallo di tempo. Diverso è, invece, il concetto di rischio sismico che è il risultato catastrofico dell'evento naturale sul sistema antropico. Affinché si abbia rischio è necessario, pertanto, che uno o più degli elementi antropici esposti (vite umane, attività, beni) possieda un carattere di vulnerabilità tale da determinarne la perdita parziale o totale. La vulnerabilità, in tale accezione, è l'entità della perdita attesa derivante dal manifestarsi di un evento di data intensità nell'area in esame. Non potendo intervenire sulla pericolosità, che dipende esclusivamente da dinamiche naturali, si può intervenire sulla vulnerabilità degli elementi esposti al rischio e, quindi, sul rischio totale.

Oltre alla conoscenza della probabilità di accadimento di un evento sismico, delle caratteristiche della sorgente sismogenetica e delle modalità di propagazione della perturbazione, è necessario analizzare le caratteristiche locali del sito di studio. Queste, infatti, condizionano la reazione del terreno all'*input* sismico in termini di variazione del contenuto in frequenza del segnale, amplificazione/smorzamento dell'onda e perdita o modificazione delle sue caratteristiche di resistenza e deformabilità.



Figura 22 – Griglia di riferimento per il settore oggetto di studio, riprodotto in scala 1:150000, con individuazione dell'opera in progetto (in blu) e dei punti del grigliato scelti (in rosso).

All'indomani della riclassificazione sismica del territorio nazionale scaturita dal progetto S1 dell'INGV-DPC, si dispone di parametri sismici di riferimento aggiornati e di maggior dettaglio rispetto alla classificazione

macrosismica nazionale cui faceva riferimento il D.M. LL.PP. 16 gennaio 1996 (Norme Tecniche per le Costruzioni in zone sismiche). La rappresentazione di sintesi delle caratteristiche sismologiche e sismogenetiche del territorio è contenuta nella “Mappa di Pericolosità Sismica” dell'Italia, che costituisce oggi la base di riferimento per la valutazione delle azioni sismiche di progetto sul sito in esame secondo le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. Infrastrutture 14 gennaio 2008).

Con riferimento al D.M. Infrastrutture 17 gennaio 2018, sono stati determinati i parametri sismici di progetto per la realizzazione delle opere previste. In particolare, sulla base delle Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 e dei dati relativi al progetto S1 dell'INGV-DPC, sono stati determinati i valori reticolari (Figura 22) dei parametri di riferimento relativamente ad un suolo rigido, per un tempo di ritorno T_r pari a 475. Per i valori di a_g , F_0 e T_c^* (Tabella 14), necessari per la determinazione delle azioni sismiche, si fa riferimento agli Allegati A e B al Decreto del Ministro delle Infrastrutture 14 gennaio 2008 (come previsto dalle NTC 2018 cfr. paragr. 3.2). I parametri forniti possono essere direttamente utilizzati per la ricostruzione degli spettri di risposta del sito e, quindi, per la progettazione di tutte le opere previste in conformità con le vigenti normative a livello nazionale.

ID	longitudine	latitudine	a_g	F_0	T_c
45629	13.997	38.034	0.175	2.380	0.300
45630	14.061	38.034	0.173	2.380	0.300
45851	13.997	37.984	0.181	2.380	0.300
45852	14.060	37.984	0.181	2.380	0.300

Tabella 14 - Parametri di riferimento del moto sismico su suolo rigido per un periodo di ritorno T_r pari a 475 anni, le coordinate sono espresse in gradi decimali (EPSG:4230).

La Regione Sicilia, con D.D.G. 11 marzo 2022, n. 64, ha provveduto all'aggiornamento della classificazione sismica dei Comuni. Tale decreto è stato emanato in applicazione dei criteri dell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri 28 aprile 2006, n. 3519. Secondo tale normativa, il territorio del Comune di **Cefalù** ricade in Zona sismica 2, con valori di accelerazione pari a 0.1825.

10.3 Sismicità storica

Situata nel centro del Mediterraneo, la Sicilia è stata sempre considerata in una posizione strategica per il controllo delle vie del commercio con l'Asia minore e, per tale motivo, fu teatro di numerose guerre che resero l'isola soggetta alle dominazioni bizantina, araba, normanna e spagnola. In un simile contesto, i documenti storici con riferimenti agli eventi sismici succedutisi nel tempo risultano scarsi e lacunosi, anche se non mancano alcuni manoscritti che permettono di datare i terremoti più violenti e di avere un quadro, almeno parziale, degli effetti indotti sui centri urbani e sull'ambiente (Figura 23).

Nell'area, i maggiori danni causati da terremoti si sono verificati in seguito al sisma del 5 marzo 1823 ($M = 5.81$) che si è verificato 18 km al largo della costa di Santo Stefano di Camastra (ME), 33 km a SW dall'opera in progetto. Danni a seguito di tale terremoto sono stati registrati anche a Palermo con molti edifici crollati, morti e feriti.



Figura 23 – Epicentri e magnitudo dei principali terremoti storici che hanno interessato la costa tirrenica della Sicilia centro-settentrionale, in scala 1:350000. In blu è riportata l'opera in progetto.

Di seguito sono elencati gli eventi sismici riportati nel Database Macrosismico Italiano pubblicato dall'INGV (versione DBMI15 v4.0, Rovida et al. 2022) al fine di documentare la storia sismica del centro abitato di **Cefalù** (<http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>).

Storia sismica di Cefalù

[38.036, 14.020]

Numero eventi: 36

Effetti	In occasione del terremoto del:												
	I	N	Year	Mo	Da	Ho	Mi	Se	EpicentralArea	DepDef	IoDef	MwDef	ErMwDef
5-6	551	1693	1	11	13	30			Sicilia sud-orientale		11	7.32	0.1
4	1043	1818	9	8	9	50			Monti Madonie		7-8	5.34	0.26
6	1046	1819	2	24	23	20			Monti Madonie		7-8	5.37	0.37
7	1060	1823	3	5	16	37			Sicilia settentrionale		8	5.81	0.13
3	1587	1892	3	16	12	38			Alicudi		7	5.24	0.45
NF	1701	1897	5	15	13	42	30		Tirreno meridionale		5	4.52	0.33
NF	1918	1907	1	21	3	41			Tirreno meridionale		5	4.14	0.28
5	1972	1908	12	28	4	20	27		Stretto di Messina		11	7.1	0.18

Effetti	In occasione del terremoto del:											
I	N	Year	Mo	Da	Ho	Mi	Se	EpicentralArea	DepDef	IoDef	MwDef	ErMwDef
NF	2016	1910	6	8	11	49		Monti Madonie ?		4-5	3.9	0.49
NF	2055	1912	1	30	21	40		Monti Madonie		5-6	4.4	0.46
NF	2070	1912	12	22	8	5		Stretto di Messina		5-6	4.68	0.24
NF	2079	1913	6	28	8	53	2	Calabria settentrionale		8	5.64	0.08
4	2493	1934	9	11	1	19		Sicilia centro-settentrionale		5-6	4.84	0.15
5-6	2558	1940	1	15	13	19	24	Tirreno meridionale		7-8	5.29	0.12
4	2805	1959	12	23	9	29		Piana di Catania		6-7	5.11	0.15
6	2941	1968	1	15	2	1	9	Valle del Belice		10	6.41	0.09
4	3025	1971	2	3	4	53	33.18	Tirreno meridionale	20.9		4.57	0.3
4	3153	1976	9	17	1	23	55	Monti Nebrodi		5-6	4.55	0.14
2	3171	1977	6	5	13	59		Monti Nebrodi		6-7	4.61	0.1
4	3194	1978	4	15	23	33	48.15	Golfo di Patti	17.9	8	6.03	0.1
4-5	3200	1978	8	26	18	43	39	Tirreno meridionale		4-5	4.35	0.2
F	3209	1979	1	16	19	27	10.13	Golfo di Patti	16.4	5	4.35	0.26
F	3210	1979	1	20	13	49	58.49	Tirreno meridionale	2.3		4.87	0.1
3	3365	1983	5	13	1	35	1	Monti Madonie		4	4.16	0.18
NF	3644	1990	12	16	13	50	28.68	Ionio meridionale	23.2		4.38	0.16
NF	3646	1991	1	7	11	42	55.44	Monti Madonie	2.9	4-5	3.79	0.23
5	3711	1993	6	26	17	47	52.88	Monti Madonie ?	5.1	6-7	4.92	0.1
3-4	3729	1994	1	5	13	24	11.37	Tirreno meridionale	290.5		5.82	0.1
3	3769	1995	7	23	18	44	22.95	Isole Eolie	10.8	6	4.63	0.1
3	4115	2001	11	25	19	34	19.95	Monti Madonie	9.4	4-5	4.69	0.07
5-6	4132	2002	9	6	1	21	27.25	Tirreno meridionale	9.6	6	5.92	0.07
NF	4234	2004	5	5	13	39	42.93	Isole Eolie	228.6		5.42	0.07
3	4282	2005	11	3	9	19	4.45	Costa siciliana settentrionale	1.4	4-5	3.3	0.15
NF	4284	2005	11	21	10	57	40.23	Sicilia centrale	63.2		4.56	0.07
F	4411	2009	11	8	6	51	16.41	Monti Nebrodi	7.6	5	4.52	0.07
3	4451	2011	6	23	22	2	46.71	Monti Nebrodi	7.3	5-6	4.7	0.07

Tabella 15 - Sintesi dei principali terremoti storici che hanno interessato il centro abitato di Cefalù (da Database Macrosismico Italiano, DBMI15). Legenda: I intensità al sito (MCS); N numero di registrazione del terremoto in ordine cronologico; EpicentralArea area epicentrale o area con i maggiori effetti macrosismici; DepDef profondità predefinita; Mw magnitudo momento; ErMw errore associato alla magnitudo momento.

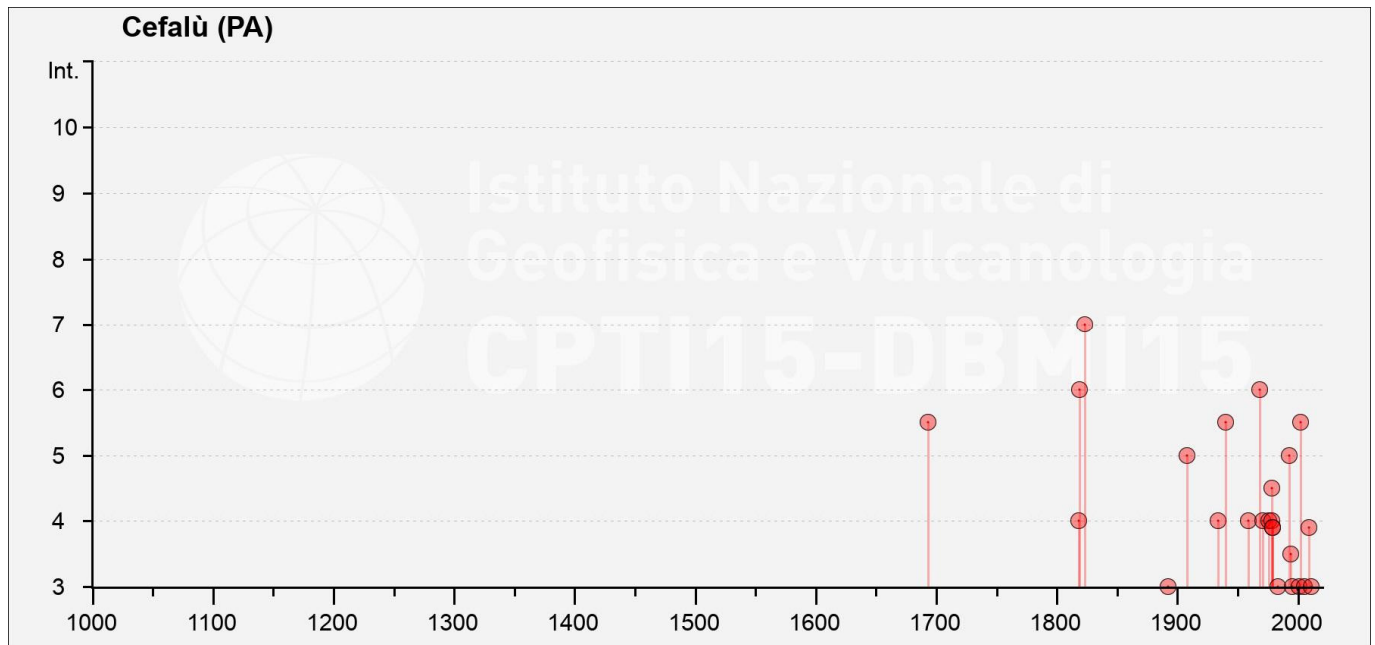


Figura 24– Grafico illustrante la storia sismica di Cefalù. Sulle ascisse sono riportati i riferimenti temporali espressi in anni, sulle ordinate le intensità sismiche (I) degli eventi rilevati (da <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>).

10.4 Sorgenti sismogenetiche

La consultazione del database DISS (vers. 3.3.0., 2021), relativo alle potenziali sorgenti sismogenetiche con magnitudo maggiore di 5.5, mostra che il settore di progetto è ubicato fuori da una fascia interessata direttamente dalla presenza di potenziali faglie sismogenetiche (Figura 25). Infatti, l'area di studio ricade a circa 35 km a sud della fascia di sorgenti composite ITCS222 Southern Tyrrhenian S (profondità stimata 3.0-16.0 km, magnitudo massima 7.0, *Slip rate* 0.1-0.5 mm/anno), che include la sorgente individuale ITIS056 Southern Tyrrhenian (profondità stimata 10.2-15.0 km, magnitudo massima 5.9, ultimo evento 8 settembre 2002) e ad oltre 45 km dalle fasce di sorgenti composite ITCS014 Southern Tyrrhenian e ITCS042 Milazzo-Eolie. La tratta in progetto è, inoltre, ubicata a circa 65 km a SW dalla zona di subduzione ITSD001 Calabrian Arc.

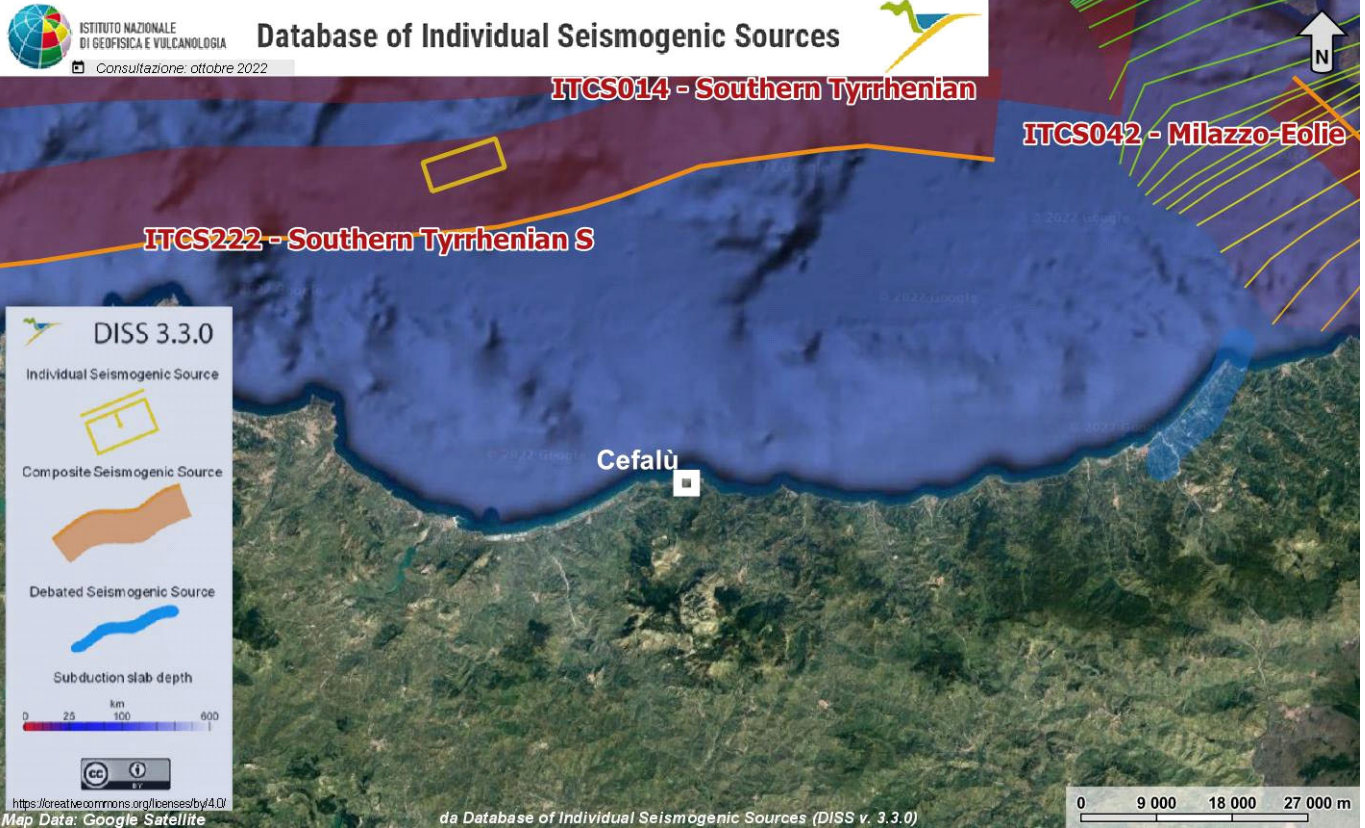


Figura 25 - Localizzazione delle potenziali sorgenti di terremoti con $M > 5.5$ nell'area di studio, in scala 1:900000, (da DISS Working group 2021, *Database of Individual Seismogenic Sources* (DISS), versione 3.3.0., <https://diss.ingv.it/diss330/dissmap.html>).

Parameter	Quality	Evidence
Min depth	<i>km</i> 3.0 EJ	Inferred from regional tectonic considerations.
Max depth	<i>km</i> 16.0 EJ	Inferred from regional tectonic and seismological considerations.
Strike min - max	<i>deg</i> 200 ÷ 280 EJ	Inferred from regional tectonic and seismological considerations.
Dip min - max	<i>deg</i> 40 ÷ 60 EJ	Inferred from regional tectonic and seismological considerations.
Rake min - max	<i>deg</i> 80 ÷ 120 EJ	Inferred from regional geological, seismological and geodynamic considerations.
Slip Rate min - max	<i>mm/y</i> 0.1 ÷ 0.5 EJ	Inferred from regional geodynamic considerations.
Max Magnitude	<i>M_w</i> 7.0 ER	Estimated from Leonard's (2014) scaling relations.

Tabella 16 – Quadro riassuntivo della sorgente sismogenetica composta ITCS0222 “Southern Tyrrhenian S”. Legenda LD=literature data, OD=original data, ER=empirical relationship, AR=analytical relationship, EJ=expert judgement.

Parameter	Quality	Evidence
Min depth	<i>km</i> 2.0 EJ	Inferred from regional tectonic considerations.
Max depth	<i>km</i> 18.0 EJ	Inferred from regional geological and seismological data.
Strike min - max	<i>deg</i> 40 ÷ 100 EJ	Inferred from regional geologic and seismological data.
Dip min - max	<i>deg</i> 15 ÷ 40 EJ	Inferred from regional geologic and seismological data.

Parameter			Quality	Evidence
Rake min - max	<i>deg</i>	60 ÷ 120	EJ	Inferred from regional seismological data.
Slip Rate min - max	<i>mm/y</i>	0.1 ÷ 1.4	EJ	Inferred from regional geodynamic considerations.
Max Magnitude	<i>Mw</i>	8.2	ER	Estimated from Leonard’s (2014) scaling relations.

Tabella 17 – Quadro riassuntivo della sorgente sismogenetica composita ITCS014 “Southern Tyrrhenian”. Legenda LD=literature data, OD=original data, ER=empirical relationship, AR=analytical relationship, EJ=expert judgement.

Parameter			Quality	Evidence
Min depth	<i>km</i>	1.0	EJ	Inferred from regional tectonic considerations.
Max depth	<i>km</i>	25.0	EJ	Inferred from regional tectonic considerations.
Strike min - max	<i>deg</i>	120 ÷ 140	EJ	Inferred from regional geological data.
Dip min - max	<i>deg</i>	70 ÷ 85	EJ	Inferred from regional geological data.
Rake min - max	<i>deg</i>	180 ÷ 220	EJ	Inferred from regional geological and seismological data.
Slip Rate min - max	<i>mm/y</i>	0.10 ÷ 0.50	EJ	Unknown, values assumed from geodynamic constraints.
Max Magnitude	<i>Mw</i>	6.9	ER	Estimated from Leonard’s (2014) scaling relations.

Tabella 18 – Quadro riassuntivo della sorgente sismogenetica composita ITCS042 “Milazzo-Eolie”. Legenda LD=literature data, OD=original data, ER=empirical relationship, AR=analytical relationship, EJ=expert judgement.

Parameter			Quality	Evidence
Min depth	<i>km</i>	10.0	LD	Based on 150 degrees C isotherm from literature data (Gutscher et al., 2006)
Max depth	<i>km</i>	34.0	LD	Based on Moho position and 350-450 degrees C isotherm from literature data
Dip direction	-	NW	LD	Based on geophysical data from various authors.
Convergence azimuth min - max	<i>Deg CW from North</i>	95 ÷ 130	LD	Based on geodetic data from various authors.
Convergence rate min - max	<i>mm/y</i>	2.7 ÷ 3.0	LD	Based on geodetic data from various authors.
Max Magnitude	<i>Mw</i>	8.3	ER	Estimated from the scaling relation by Allen & Hayes (2017) applied to the area of the largest rupture area that fits inside the seismic interface.

Tabella 19 – Quadro riassuntivo della sorgente di subduzione ITSD001 “Calabrian Arc”. Legenda LD=literature data, OD=original data, ER=empirical relationship, AR=analytical relationship, EJ=expert judgement.

10.5 Magnitudo di riferimento

Relativamente alla vigente zonazione sismogenetica del territorio nazionale ZS9 (Meletti & Valensise 2004), l’opera in progetto ricade nella **Zona 933 “Sicilia settentrionale”** (Figura 26), all’interno della quale ricadono eventi di bassa magnitudo. Sulla base degli studi sismologici più aggiornati, in questa zona sono attesi terremoti di profondità medio-elevata ($P = 8-12$ km) e di medio-bassa magnitudo ($M_{max} = 6.14$), riconducibili a meccanismi di fagliazione prevalentemente inversa.

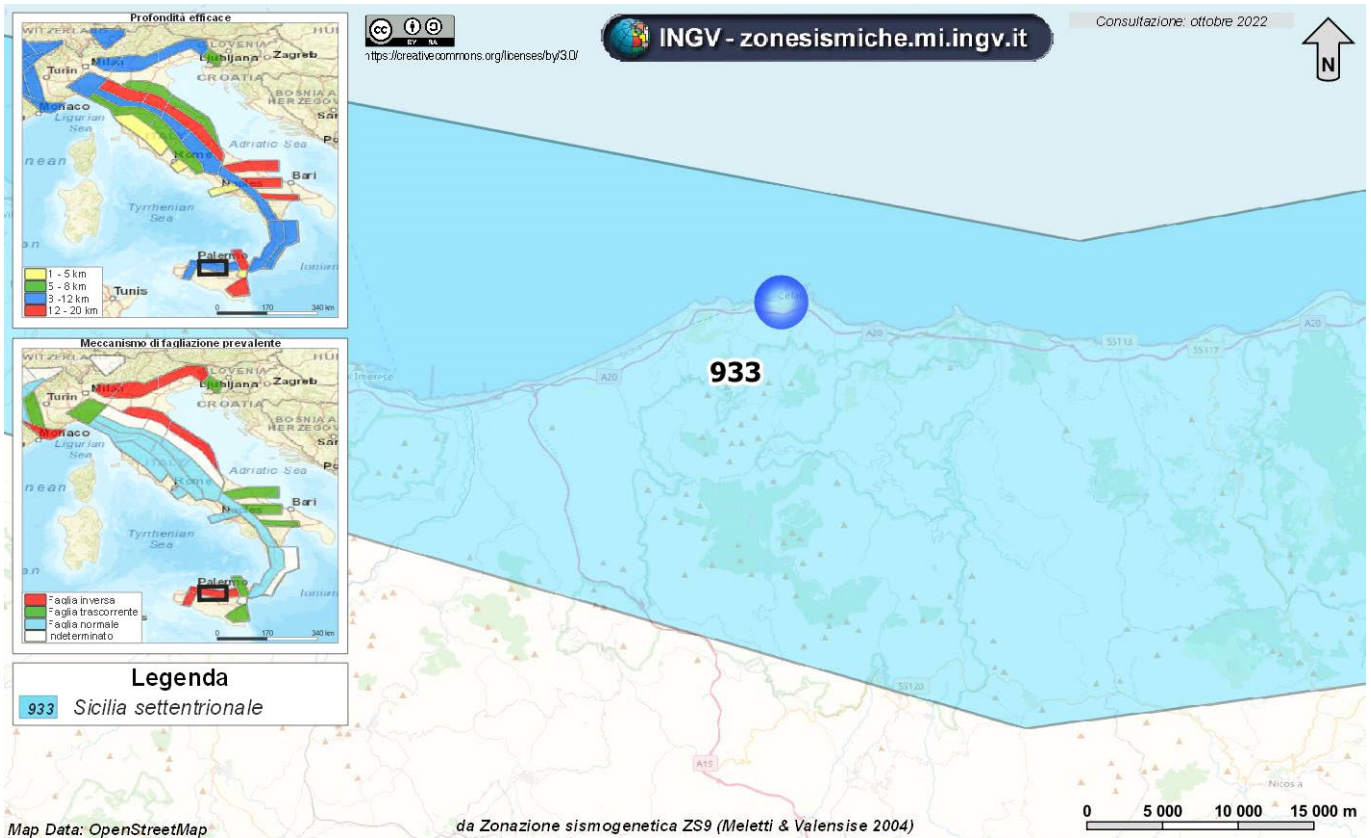


Figura 26 – Stralcio della Zonazione sismogenetica ZS9 dell'area di studio, riprodotto in scala 1:500000 con individuazione dell'area di studio (blu).

10.6 Faglie capaci

Il database del progetto ITHACA (*Italy Hazard from Capable faults*) non mostra, in prossimità nell'area progettuale, l'esistenza di faglie capaci, definite come lineamenti tettonici attivi che potenzialmente possono creare deformazioni in superficie e produrre fenomeni dagli effetti distruttivi per le opere antropiche (Figura 27).

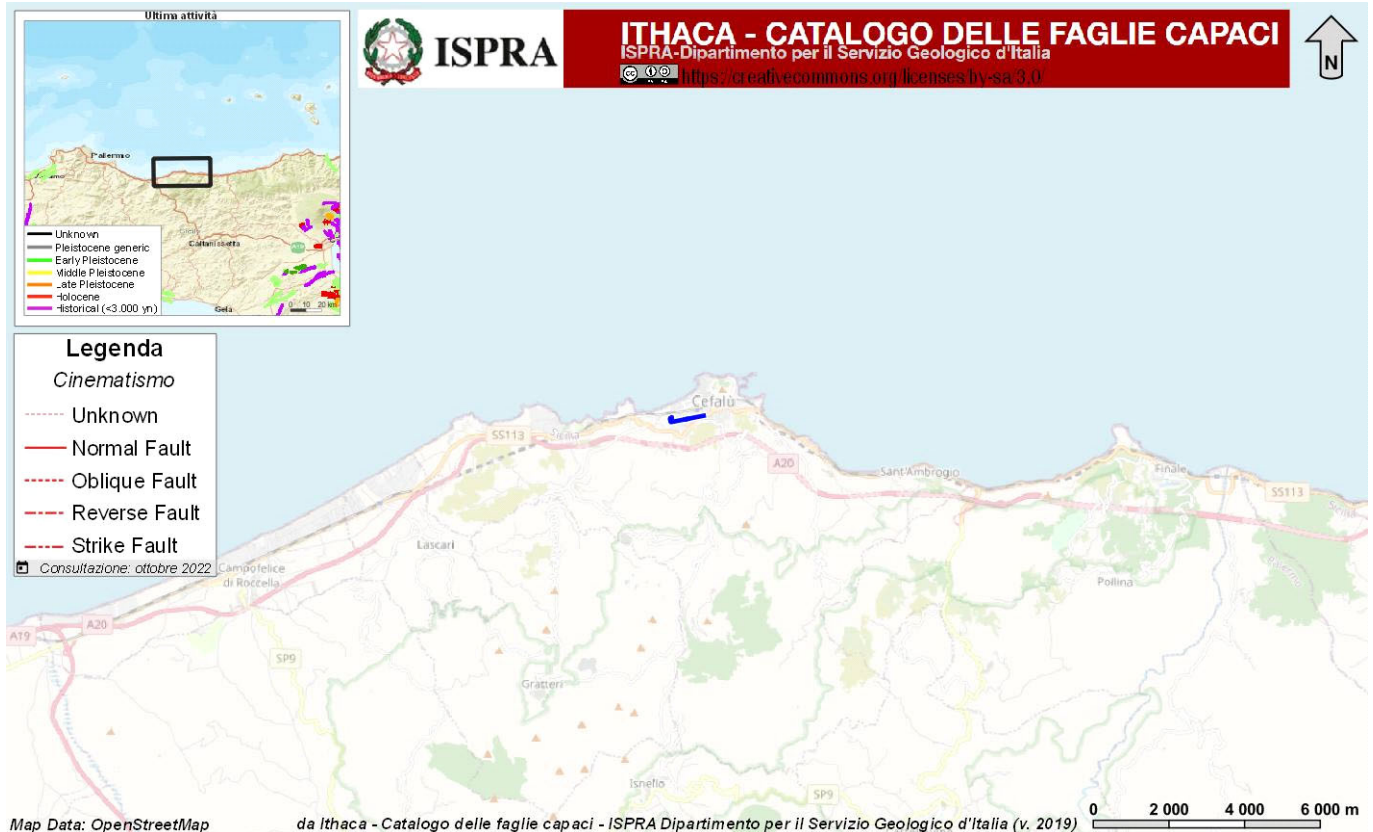


Figura 27 – Stralcio cartografico dell'area di interesse, riprodotto in scala 1:200000, con indicazione schematica dell'opera in progetto (in blu).

10.7 Parametri per la determinazione dell'azione sismica di riferimento

Di seguito si riportano le categorie di sottosuolo individuate da due prove Down-Hole eseguite durante la CI2001.

10.7.1 Categoria di sottosuolo

I parametri forniti, in funzione di quanto previsto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018, possono essere direttamente utilizzati per la ricostruzione degli spettri di risposta del sito e, quindi, per la progettazione di tutte le opere previste in conformità con le vigenti normative a livello nazionale. La normativa citata prevede, relativamente alla caratterizzazione sismica di un sito (D.M. 17/01/2018 – G.U. Serie Generale n. 42 del 20-2-2018), la determinazione dei valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio $V_{s,eq}$ (in m/s). Tale velocità per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m è definita dal parametro $V_{s,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

I valori di V_s sono ottenuti mediante specifiche prove oppure, con giustificata motivazione e limitatamente all'approccio semplificato, sono valutati tramite relazioni empiriche di comprovata affidabilità con i risultati di altre prove in sito, quali ad esempio le prove penetrometriche dinamiche per i terreni a grana grossa e le prove penetrometriche statiche.

Sulla scorta dei dati a disposizione, tale determinazione è stata effettuata attraverso indagini di tipo geofisico, quali prove *down-hole* e prospezioni sismiche MASW, che forniscono indicazioni dirette relativamente al valore di $V_{s,eq}$. Si riportano nel seguito le categorie di sottosuolo previste dalla normativa vigente:

- **A:** *ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi* caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m;
- **B:** *rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti*, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s;
- **C:** *depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti* con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s;
- **D:** *depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti*, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s;
- **E:** *terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D*, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

In Tabella 20 si riporta una sintesi delle prove effettuate, contenente i valori di $V_{s,eq}$ determinati. Tali dati sono utili al Progettista per la definizione delle categorie di sottosuolo nel sito di progetto. Per quest’ultimo aspetto si rimanda a quanto riportato negli elaborati progettuali.

sigla	tipologia	prof./lungh. m	$V_{s,eq}$ m/s	H m
S18	Down-Hole	50.0	385	30
S24	Down-Hole	55.0	404	30

Tabella 20 - Sintesi dei risultati delle prove sismiche realizzate nell’ambito della campagna indagini CI2001.

10.8 Considerazioni preliminari del rischio di liquefazione

La liquefazione è un particolare processo che causa la temporanea perdita di resistenza di un sedimento che si trova al di sotto del livello di falda, portandolo a comportarsi come un fluido viscoso a causa di un aumento della pressione neutra e di una riduzione della pressione efficace (Riga 2007). Tale fenomeno avviene, cioè, quando la pressione dei pori aumenta fino ad eguagliare la pressione inter-granulare.

L’incremento di pressione neutra è causato, principalmente, dalla progressiva diminuzione di volume che si registra in un materiale granulare poco addensato soggetto alle azioni cicliche di un sisma. Ovviamente, per quanto detto in precedenza, sono suscettibili di liquefazione terreni granulari, da poco a mediamente addensati, aventi granulometria compresa tra le sabbie ed i limi, con contenuto in fine piuttosto basso. Tali terreni devono essere altresì posti al di sotto del livello di falda e a profondità relativamente basse, generalmente inferiori ai 15 m dal p.c..

Al fine di verificare la possibile suscettività a liquefazione dei terreni interessati dalle opere in progetto sono state condotte una serie di analisi qualitative basate sulle procedure dettate dalle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018. L’attuale normativa vigente in materia di costruzioni edilizie (NTC2018 - par. 7.11.3.4.2) prevede che la verifica alla liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti condizioni:

- 1) accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0.1 g;
- 2) profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal p.c., per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
- 3) depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60} > 30$ oppure $q_{c1N} > 180$, dove $(N_1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (*Standard Penetration Test*) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e q_{c1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (*Cone Penetration Test*) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
- 4) distribuzione granulometriche esterna ai fusi granulometrici indicati da normativa, distinti in funzione del coefficiente di uniformità U_c .

In particolare, se la condizione 1 non risulta soddisfatta, le indagini geotecniche devono essere finalizzate almeno alla determinazione dei parametri necessari per la verifica delle condizioni 2, 3 e 4. Pertanto, in relazione a quanto previsto dall'NTC 2018, sono state condotte una serie di analisi puntuali volte a verificare tutte le condizioni predisponenti elencate in precedenza, al fine di determinare la possibile suscettività a liquefazione dei terreni interessati dalle opere in progetto.

Per quanto detto in precedenza, le verifiche sono state condotte unicamente per i terreni marini posti a profondità inferiori ai 15-20 m dal p.c., in quanto al di sotto non è possibile che si verifichino tali fenomeni. Ovviamente le suddette analisi hanno un carattere generale e, pertanto, andranno puntualmente dettagliate attraverso verifiche geotecniche basate sulla resistenza dinamica e sull'effettivo stato di addensamento dei terreni investigati.

Le fonti bibliografiche a disposizione e lo studio relativo alla sismicità storica e alla pericolosità sismica condotto hanno evidenziato che, nell'area di intervento, si sono verificati diversi terremoti con magnitudo M superiore a 5. In particolare, il massimo terremoto atteso nell'area presenta una M pari a 5.91, in quanto riferibili alla **Zona 933** "Sicilia settentrionale" (Figura 26).

Le accelerazioni massime attese al piano campagna, in condizioni di campo libero, sono risultate essere generalmente superiori al limite definito da normativa, in quanto variabili tra 0.150-0.200 a_g (Figura 21). In relazione a quanto detto e considerata la presenza delle condizioni predisponenti espone nel punto 1 dell'NTC 2018, si è quindi proceduto alla verifica dei punti 2, 3 e 4 del paragrafo "7.11.3.4.2 – Esclusione della verifica a liquefazione", in modo da rispondere puntualmente a tutti i quesiti posti da norma. Per quanto concerne la falda, viste le condizioni geomorfologiche e la presenza di un monitoraggio piezometrico, eseguito tra maggio e giugno 2004, e una misura in fase di perforazione eseguita ad ottobre 2022 (cfr. 8.3 - Livelli piezometrici), è possibile ipotizzare un livello piezometrico costante entro 15 m da p.c.. Tale falda risulta quindi al di sopra del limite di 15 m previsto da normativa.

Dal punto di vista granulometrico e tessiturale, infine, i dati geologici a disposizione hanno mostrato la presenza di terreni con caratteristiche variabili ed eterogenee. In generale, i terreni attraversati sono caratterizzati da granulometrie sabbiose e sabbioso-limose con locali ghiaie. In termini qualitativi i terreni sabbiosi e sabbioso-limosi con locali ghiaie dei depositi marini terrazzati (**tm** – *Pleistocene medio - Pleistocene superiore*) e dei depositi di detrito di falda (**dt** – *Olocene – Attuale*) sono caratterizzati da una suscettività al fenomeno della liquefazione moderata.

Si specifica che le successive analisi qui espone sono state effettuate considerando le indagini eseguite nell'area di stretto interesse progettuale, coerentemente con il contesto geologico.

Di seguito si riportano le curve granulometriche dei campioni di terreno disponibili ed analizzati, ricadenti negli orizzonti marini dell'unità **tm**, nonché la rappresentazione schematica dei fusi critici indicati da normativa.

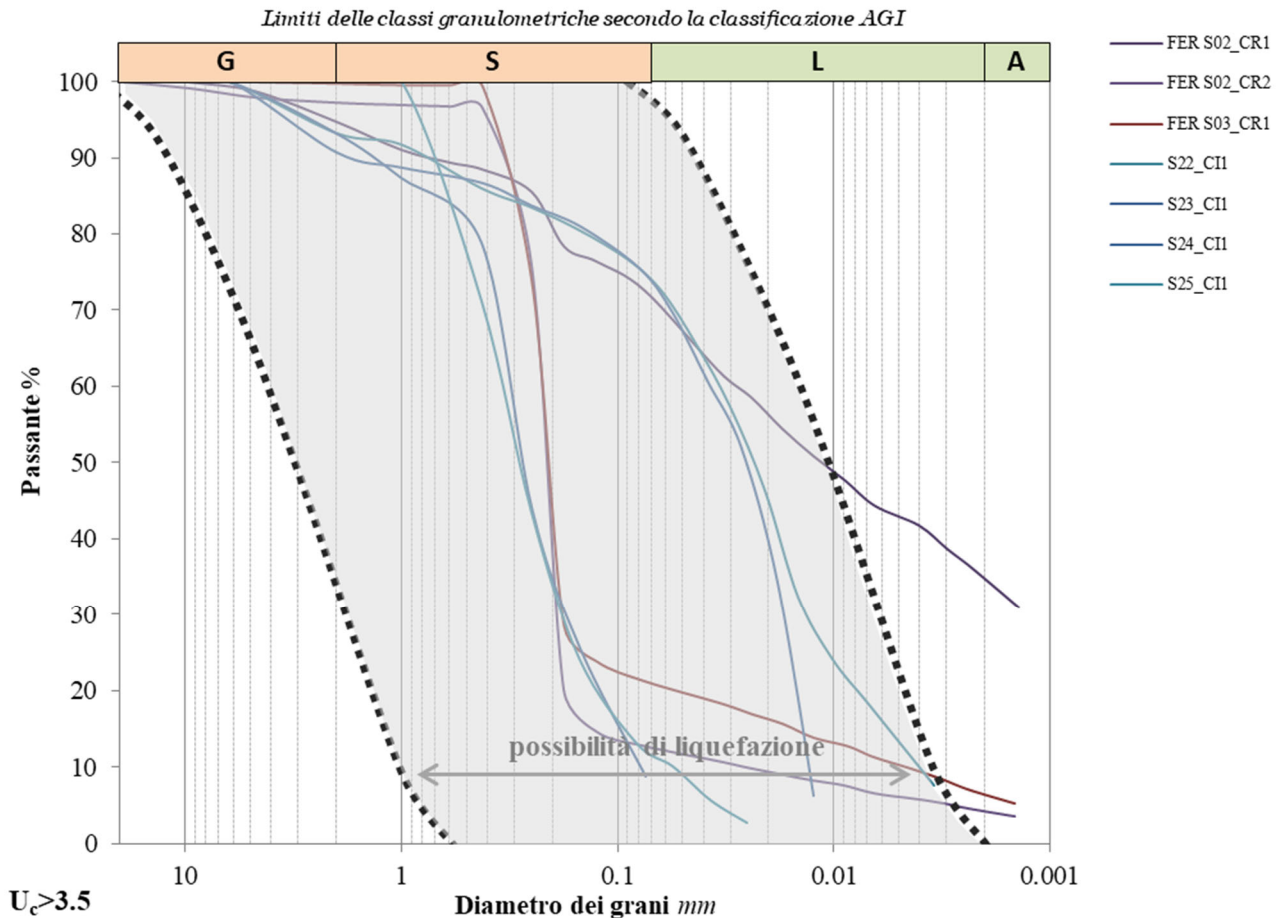


Figura 28 - Curve granulometriche dei campioni disponibili. In nero, a tratteggio, è riportato il fuso granulometrico critico per suoli - $U_c > 3.5$ (NTC 2018).

Le curve granulometriche dei campioni di terreno disponibili ed analizzati, nonché la rappresentazione schematica dei fusi critici indicati da normativa sono riportate nella Figura 28. A tal riguardo, si sottolinea che i limiti dimensionali delle varie classi granulometriche, riportati nella parte alta del grafico, sono indicati seguendo gli *standard* metodologici proposti dall'Associazione Geotecnica Italiana (AGI).

In generale, le verifiche condotte hanno evidenziato che una parte dei campioni di terreno analizzati (FER S02_CR1, FER S02_CR2, FER S03_CR1) ricade fuori dal fuso granulometrico critico indicato da normativa e quindi non sono potenzialmente suscettibili di liquefazione. Tali campioni, infatti, presentano un contenuto in limi-argille e/o ghiaie sempre piuttosto alto e pertanto sono caratterizzati da una bassa probabilità di liquefazione. Invece, l'altra parte dei campioni (S22_C11, S23_C11, S24_C11, S25_C11) presenta curve granulometriche che ricadono all'interno del fuso granulometrico critico indicato da normativa. Tali campioni, pertanto, sono potenzialmente suscettibili di liquefazione.

In conclusione, i risultati delle analisi di suscettibilità a liquefazione appositamente condotte hanno evidenziato che i terreni impegnati dalla realizzazione delle opere in progetto rientrano, in alcuni casi, nei fusi granulometrici potenzialmente suscettibili a liquefazione a seguito dei terremoti attesi. Si specifica che, in assenza di monitoraggio piezometrico in corrispondenza dei sondaggi in asse al tracciato in progetto, non è stato possibile verificare la terza condizione indicata da normativa (NTC2018 - par. 7.11.3.4.2). Pertanto, per quanto riguarda le analisi quantitative per definire i possibili effetti di eventuali fenomeni di liquefazione sulle opere in progetto, si rimanda agli elaborati specifici.

11 CONCLUSIONI

La presente relazione è stata redatta nell'ambito del Progetto Definitivo per l'esecuzione dello studio "*Fermata Cefalù –Rampa di accesso alla galleria di sfollamento*" sono stati effettuati i rilievi e gli approfondimenti propedeutici alla redazione degli elaborati di sintesi previsti dal progetto stesso. In particolare, sono stati effettuati i rilievi e gli approfondimenti propedeutici alla redazione degli elaborati di sintesi previsti dal progetto stesso. L'area di studio si colloca nel settore costiero tirrenico della Sicilia settentrionale in corrispondenza della tratta ferroviaria Palermo-Messina, nei pressi del centro abitato di Cefalù.

Dal punto di vista morfologico, l'area di studio si colloca su un versante caratterizzato da valori medio bassi di pendenza, alla base di alcuni rilievi collinari da mediamente a molto acclivi. Tali rilievi rappresentano la propaggine più settentrionale della catena montuosa delle Madonie, a ridosso della costa tirrenica. Infatti, il versante oggetto di studi, costituito da depositi marini terrazzati e detritici di versante, è delimitato immediatamente a nord da un'area pianeggiante riferibile al settore litoraneo/di spiaggia della costa tirrenica. Il tracciato di progetto impegna settori di territorio posti a quote comprese tra 38 m s.l.m. e 63 m s.l.m. circa, mentre le quote progettuali variano da 13 m s.l.m. a 36 m s.l.m. circa.

Il sistema idrografico dell'area di studio è poco sviluppato. Gli elementi idrici che caratterizzano l'area di studio sono il Vallone Pisciotto, che interseca l'opera in progetto e scorre in direzione circa S-N, il Vallone Gallizza, che scorre in direzione circa SSW-NNE a circa 350 m a W dall'opera in progetto, e il Vallone S. Elia, che scorre in direzione circa SSW-NNE a circa 730 m a E dall'opera in progetto. Essi sfociano nel Mar Tirreno e hanno un carattere prevalentemente torrentizio stagionale.

Gli approfondimenti condotti hanno consentito di definire i principali aspetti geologici, geomorfologici e idrogeologici dell'area, il tutto in misura commisurata alla loro incidenza specifica sul terreno e sul contesto ambientale complessivo.

L'area di studio è caratterizzata da un substrato piuttosto regolare riconducibile ai depositi del Flysch Numidico, con spessore maggiore di 30 m, si tratta di depositi di scarpata-bacino oligocenici-miocenici in facies prevalentemente pelitico-arenacea e siltitica. Sotto il profilo idrogeologico è possibile ipotizzare la presenza di falde idriche sotterranee di modesta rilevanza nel Complesso dei depositi detritici e terrazzati e di falde idriche di ridotta rilevanza confinate all'interno delle porzioni più fratturate ed alterate del Complesso argillitico-siltitico e del Complesso pelitico-arenaceo.

In relazione agli esiti dello studio condotto, secondo quanto riportato dalle cartografie tematiche del Piano stralcio di Assetto Idrogeologico della Regione Sicilia, la porzione più occidentale della tratta di intervento presenta interferenza con un areale a pericolosità geomorfologica bassa, il quale, secondo quanto riportato dall'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia, corrisponde a una frana complessa con stato di attività stabilizzato (id frana: 0825897500). Nella porzione medio-alta di questo fenomeno, però, si imposta un ulteriore movimento franoso complesso quiescente, posto a circa 100 m a sud-ovest dalla tratta in oggetto e, allo stato attuale, non interferisce con il tracciato in progetto.

Per quanto riguarda il fenomeno della liquefazione, trattato nel paragrafo 10.8 - Considerazioni preliminari del rischio di liquefazione, le verifiche condotte hanno evidenziato che una parte dei campioni di terreno analizzati ricade fuori dal fuso granulometrico critico indicato da normativa e quindi non sono potenzialmente suscettibili di liquefazione. L'altra parte dei campioni, invece, presenta curve granulometriche che ricadono all'interno del fuso granulometrico critico indicato da normativa. Tali campioni, pertanto, sono potenzialmente suscettibili di

liquefazione. Per quanto riguarda le analisi quantitative per definire i possibili effetti di eventuali fenomeni di liquefazione sulle opere in progetto, si rimanda agli elaborati specifici.

Dal punto di vista sismico, invece, il livello di pericolosità presente nell'area è connesso con l'attività sismica della costa siciliana settentrionale. Per una trattazione completa della tematica si rimanda allo specifico paragrafo contenuto nelle presenti note (10 - Sismicità dell'area).

12 BIBLIOGRAFIA

- Agate M., Beranzoli L., Braun T., Catalano R., Favali P., Frugoni F., Pepe F., Smriglio G., Sulli A., 2000. The 1998 offshore NW Sicily earthquakes in the tectonics framework of the southern border of the Tyrrhenian Sea. *Memorie della Società Geologica Italiana* 55: 103-114.
- Ambrosetti P., Bosi C., Carraro F., Ciaranfi N., Panizza M., Papani G., Vezzani L., Zanferrari A., 1987. Neotectonic Map of Italy, scale 1:500000. C.N.R.-P.F.G., Sottoprogetto Neotettonica: Fogli 1-6.
- Amodio-Morelli L., Bonari G., Colonna V., Dietrich D., Giunta G., Ippoliti F., Liguori V., Lorenzini S., Paglionico A., Perrone V., Piccarreta G., Russo M., Scandone P., Zanettin Lorenzini E., Zuppata A., 1976. L'arco Calabro-Peloritano nell'orogene Appenninico-Maghrebide. *Memorie della Società Geologica Italiana* 17: 1-60.
- APAT, 2007. Rapporto sulle frane in Italia: il Progetto IFFI. Metodologia, risultati e rapporti regionali. Rapporti Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici 78: 681.
- Autorità di Bacino del Distretto Idrografico della Sicilia, 2005. Piano stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico UoM Regione Siciliana (ITR191). Aggiornamento 2021. Assessorato Territorio e Ambiente, Dipartimento Territorio e Ambiente.
- Basili R., Valensise G., Vannoli P., Burrato P., Fracassi U., Mariano S., Tiberti M.M., Boschi E., 2008. The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology. *Tectonophysics*.
- Basilone L., 2012. Litostratigrafia della Sicilia. Arti Grafiche Palermitane s.r.l..
- Bello M., Franchino A., Merlini S., 2000. Structural model of Eastern Sicily. *Memorie della Società Geologica Italiana* 55: 61-70.
- Bianchi F., Carbone S., Grasso M., Invernizzi G., Lentini F., Longaretti G., Merlini S., Monstardini F., 1987. Sicilia orientale: profilo geologico Nebrodi-Iblei. *Memorie della Società Geologica Italiana* 38: 429-458.
- Bigi S., Cosentino D., Parotto M., Sartori R., Scandone P., 1992. Structural model of Italy. Scale 1:500000 (fogli 1-6). CNR - Progetto Finalizzato Geodinamica 114.
- Billi A., Minelli L., Orecchio B., Presti D., 2009. Run up distribution for the 1908 Messina Tsunami, Italy: observed data versus expected curves. *Bulletin of the Seismological Society of America* 99: 3502-3509.
- Boenzi F., De Marco A., Loiacono F., Balenzano F., 1986. Osservazioni sugli ambienti fluviali Olocenici della media e bassa valle di alcuni fiumi Lucani. *Memorie della Società Geologica Italiana* 42: 191-196.
- Bonardi G., Cello G., Perrone V., Tortorici L., Turco E., Zuppata A., 1982. The evolution of the northern sector of the Calabria-Peloritani arc in a semiquantitative palynospastic restoration. *Bollettino della Società Geologica Italiana* 101: 259-284.
- Bonardi G., Giunta G., Liguori V., Perrone V., Russo M., Zuppata A., 1976. Schema geologico dei Monti Peloritani. *Bollettino della Società Geologica Italiana* 95: 49-74.
- Boschi E., Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Valensise L., Gasperini P., 2000. Catalogue of strong Italian Earthquakes from 461 B.C. to 1997. *Annali di Geofisica* 43: 609-868.

Bosellini A., Mutti E., Ricci Lucchi F., 1989. Rocce e successioni sedimentarie. Unione Tipografico-Editrice Torinese, Torino.

Broquet P., 2016. Sicily in its Mediterranean geological frame. *Boletìn Geològico y Minero* 127: 547-562.

Butler B.C.M., Bell J.D., 1996. Lettura e interpretazione delle carte geologiche. Zanichelli Editore, Bologna.

Butler R.W.H., Grasso M., 1993. Tectonic controls on base-level variations and depositional sequences within thrust-top and foredeep basins: examples from the Neogene thrust belt of central Sicily. *Basin Research* : 137-151.

Canuti P., Esu F., 1995. Glossario Internazionale per le frane. *Rivista Italiana di Geotecnica* 2: 143-150.

Carbone S., 2011. Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000. Foglio 641, Augusta. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.

Carbone S., Grasso M., 2012. Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000. Fogli 597 e 610, Cefalù e Castelbuono. Servizio geologico d'Italia, Roma: 200 pp.

Carbone S., Lentini F., Branca S., 2010. Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000. Foglio 633, Paternò. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma.

Carraro F., 2012. Geologia del Quaternario. L'evoluzione geologica degli ambienti superficiali. Dario Flaccovio Editore, Palermo.

Casadio M., Elmi C., 1999. Il manuale del geologo. Pitagora Editrice, Bologna.

Casati P., 1991. Scienze della terra. Città Studi Edizioni.

Castiglioni G.B., 1991. Geomorfologia (seconda edizione). Unione Tipografico-Editrice Torinese, Torino.

Catalano R., 2004. Geology of Sicily: an introduction. *Bocconea* 17: 33-46.

Catalano R., Di Stefano P., Sulli A., Vitale F.P., 1995. Ipotesi sulla prosecuzione settentrionale delle Unità Sicane nell'area di Rocca Busambra. In: *Atti del 79° Congresso Nazionale della Società Geologica Italiana*, Palermo, 21-23 settembre: 268-271.

Catalano R., Di Stefano P., Sulli A., Vitale F.P., 1996. Paleogeography and structure of the central Mediterranean: Sicily and its offshore area. *Tectonophysics* 260: 291-323.

Catalano S., Avellone G., Basilone L., Contino A., Agate M., 2011. Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000. Foglio 609-596 (Termini Imerese – Capo Plaia). Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma.

Catalano S., Avellone G., Basilone L., Contino A., Agate M., 2013. Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000. Foglio 595, Palermo. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma.

Celico P., 1986. Prospezioni idrogeologiche - Volume primo. Liguori Editore, Napoli.

Cello G., Tortorici L., Martini N., Paltrinieri W., 1989. Structural styles in the frontal zones of the Southern Apennines, Italy: an example from the Molise district. *Tectonics* 8: 753-768.

Channell J.E.T., Catalano R., D'Argenio B., 1980. Paleomagnetism and deformation of the Mesozoic continental margin in Sicily. *Tectonophysics* 61: 391-407.

Channell J.E.T., Oldow J., Catalano R., D'Argenio B., 1990. Paleomagnetically Determined Rotations in the Western Sicilian Fold and Thrust Belt. *Tectonics* 9: 641-660.

Civita M., 1972. Schematizzazione idrogeologica delle sorgenti normali e delle relative opere di captazione. *Memorie e note dell'Istituto di Geologia Applicata e Arte mineraria* 12.

CNR-PFG, 1985. Catalogo dei terremoti italiani dall'anno 1000 al 1980. In: Postpischl D. (ed), CNR-PFG V. 2B, Bologna.

Contino A., 2002. Geologia e geomorfologia della bassa valle del Fiume Imera settentrionale. In: Belvedere O., Bertini A., Boschian G., Burgio A., Contino A., Cucco R.M., Lauro D., Himera III, *Prospezione archeologica nella valle dell'Imera. Dipartimento di Beni Culturali Storico-Archeologici, Socio-Antropologici e Geografici, Sezione Archeologia, Università degli studi di Palermo*: 22-48.

Cremonini G., 1994. Rilevamento geologico. Realizzazione e interpretazione delle carte geologiche. Pitagora Editrice, Bologna.

Cruden D.M., Varnes D.J., 1993. Landslides: investigation and mitigation chapter 3: landslide type and process. National Academy of sciences.

Cruden D.M., Varnes D.J., 1996. Landslide types and processes. In: Turner A.K., Schuste R.L. (eds) *Landslide investigation and mitigation, special report 247, National Academy of Sciences*: 36-75.

Decima A., Wezel F.C., 1971. Osservazioni sulle evaporiti messiniane della Sicilia centro-meridionale. *Rivista Mineraria Siciliana* 130-132: 172-187.

Di Geronimo I., Ghisetti F., Lentini F., Vezzani L., 1978. Lineamenti neotettonici della Sicilia orientale. *Memorie della Società Geologica Italiana* 19: 543-549.

Di Grande A., Grasso M., Lentini F., Scamarda G., 1976. Facies e stratigrafia dei depositi pliocenici tra Leoforte e Centuripe (Sicilia centro-orientale). *Bollettino della Società Geologica Italiana* 95: 1319-1345.

DISS Working Group, 2021. Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.3.0.: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. <https://doi.org/10.13127/diss3.3.0>. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Dramis F., Bisci C., 1997. Cartografia geomorfologica. Pitagora Editrice, Bologna.

Fabbri M., Garbin F., Lanzini M., Scarapazzi M., 2007. Interpretazione dei parametri geotecnici di laboratorio. Di Virgilio Editore, Roma.

Finetti I., Lentini F., Carbone S., Catalano S., Del Ben A., 1996. Il Sistema Appennino Meridionale - Arco Calabro - Sicilia nel Mediterraneo Centrale: Studio Geologico-Geofisico. *Bollettino della Società Geologica Italiana* 115: 529-559.

Finetti I., Lentini F., Carbone S., Del Ben A., Di Stefano A., Forlin E., Guarnieri P., Pipan M., Prizzon A., 2005. Geological outline of Sicily and lithospheric tectono-dynamics of its Tyrrhenian Margin from new CROP seismic

data. In: Finetti I.R. (ed), CROP Deep Seismic exploration of the Mediterranean Region Spec. Vol. Elsevier 1: 319-376.

Ghisetti F., Vezzani L., 1984. Thin-skinned deformations of the western Sicily thrust belt and relationships with crustal shortening: Mesostructural data on the Mt. Kumeta-Alcantara Fault Zone and relates structurea. Bollettino della Società Geologica Italiana 103: 129-157.

Giunta G., Luzio D., Agosta F., Calò M., Di Trapani F., Giorgianni A., Oliveri E., Orioli S., Perniciaro M., Vitale M., Chiodi M., Adelfio G., 2009. An integrated approach to investigate the seismotectonics of northern Sicily and southern Tyrrhenian. Tectonophysics 476: 13-21.

Hallam A., 1985. Interpretazione delle facies e stratigrafia. Pitagora Editrice, Bologna.

Hungr O., Leroueil S., Picarelli L., 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. Landslides 11: 167-194.

Hutchinson J.N., 1985. Mass movements. In: Fair Bridge R.W. (ed): Encyclopedia of Geomorphology: 688-695.

Hutchinson J.N., 1988. Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. Proceedings of 5th International Symposium on Landslide: 10-15.

Iraci C., 2019. Carta idrogeologica - Fase A1. Piano Regolatore Generale Comune di Cefalù.

ISIDe Working Group, 2007. Italian Seismological Instrumental and Parametric Database (ISIDe). Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).

ISPRA – Regione Sicilia, 2016. Inventario dei Fenomeni Fransi in Italia – IFFI (consultazione 2022). progettoiffi.isprambiente.it.

ISPRA, 2011. Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000. Foglio 597-610, Cefalù-Castelbuono. Servizio Geologico d'Italia.

ISPRA, 2018. Rapporto dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio - rapporto 2018.

Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia, 2022. Modello di pericolosità sismica MPS04-S1. <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>.

ITHACA Working Group, 2019. ITHACA (ITaly HAZard from CApable faulting), A database of active capable faults of the Italian territory. Version December 2019. Web Portal <http://sgi2.isprambiente.it/ithacaweb/Mappatura.aspx>. ISPRA Geological Survey of Italy.

Lavecchia G., Ferrarini F., De Nardis R., Visini F., Barbano M.S., 2007. Seismogenic evidence of ongoing compression in eastern-central Italy and mainland Sicily: a comparison. Bollettino della Società Geologica Italiana 126: 209-222.

Lentini F., 1982. The geology of the Mt. Etna basement. Memorie della Società Geologica Italiana 23: 7-25.

Lentini F., Carbone S., 2014. Geologia della Sicilia. Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia 95: 7-414.

Lentini F., Carbone S., Catalano S., 1994. Main structural domains of the Central Mediterranean Region and their Neogene tectonic evolution. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata 36(141): 103-125.

Lentini F., Carbone S., Catalano S., Grasso M., 1995. Principali lineamenti strutturali della Sicilia nord-orientale. Studi Geologici Camerti vol. spec. 2: 319-329.

Lentini F., Carbone S., Catalano S., Grasso M., 1996. Elementi per la ricostruzione del quadro strutturale della Sicilia Orientale. Memorie della Società Geologica Italiana 51: 179-195.

Lentini F., Carbone S., Catalano S., Grasso M., Monaco C., 1991. Presentazione della Carta Geologica della Sicilia Centro-Orientale. Memorie della Società Geologica Italiana 47: 145-156.

Lentini F., Carbone S., Catalano S., Monaco C., 1990. Tettonica a thrust neogenica nella catena appenninico-maghrebide: esempi dalla Lucania e dalla Sicilia. Studi Geologici Camerti vol. suppl. 1990: 19-26.

Lentini F., Carbone S., Grasso M., Di Geronimo I., Scamarda G., Bommarito S., Sciuto F., 1984. Carta geologica della Sicilia sud-orientale, scala 1:100000. S.EL.CA., Firenze.

Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Antonucci A., 2022. Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 4.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).

Meletti C., Montaldo V., 2007. Stime di pericolosità sismica per diverse probabilità di superamento in 50 anni: valori di ag. Progetto DPC-INGV S1.

Meletti C., Montaldo V., Stucchi M., Martinelli F., 2006. Database della pericolosità sismica MPS04. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).

Meletti C., Valensise G., 2004. Zonazione sismogenetica ZS9 - App.2 al Rapporto Conclusivo. Gruppo di Lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Monaco C., Bianca M., Catalano S., De Guidi G., Tortorici L., 2002. Sudden change in the Late Quaternary tectonic regime in eastern Sicily: evidences from geological and geomorphological features. Bollettino della Società Geologica Italiana vol. spec. 1: 901-913.

Monaco C., De Guidi G., 2006. Structural evidence for Neogene rotations in the eastern Sicilian fold and thrust belt. Journal of Structural Geology 28: 561-574.

Monaco C., Tortorici L., Catalano S., 2000. Tectonic escape in the Sicilian mountains (western Sicily). Memorie della Società Geologica Italiana 55: 17-25.

Monaco C., Tortorici L., Paltrinieri W., 1998. Structural Evolution of the Lucanian Apennines, Southern Italy. Journal of Structural Geology 20: 617-638.

Montanari L., 2000. Paleogeography of Sicily: Importance of Stratigraphy. Memorie della Società Geologica Italiana 55: 211-217.

Mostardini F., Merlini S., 1986. Appennino centro-meridionale. Sezioni geologiche e proposta di un modello strutturale. Memorie della Società Geologica Italiana 35: 177-202.

Ogniben L., 1969. Schema introduttivo alla geologia del confine calabro-lucano. Memorie della Società Geologica Italiana 8: 453-763.

Ogniben L., 1973. Carta del modello strutturale d'Italia. Fogli Sud n. 1-2, scala 1:1000000, Roma.

Oldow J.S., Channel J.E.T., Catalano R., D'Argenio B., 1990. Contemporaneous thrusting and large-scale rotations in the western Sicilian fold and thrust belt. *Tectonics* 9: 661-681.

Pánek T., 2020. Landslides and Related Sediments. *Earth Systems and Environmental Sciences*: 1-22.

Parotto M., Praturlon A., 1975. Geological summary of Central Apennines. In: Ogniben L., Parotto M., Praturlon A. (eds), *Structural Model of Italy. Quaderni della Ricerca Scientifica* 90: 257-306.

Pasquarè G., Abbate E., Castiglioni G.B., Merenda M., Mutti E., Ortolani F., Parotto M., Pignone R., Polino R., Sassi F.P., 1992. Carta geologica d'Italia 1:50000, Guida al Rilevamento. *Quaderni serie III* 1: 203.

Patacca E., Scandone P., Giunta G., Liguori V., 1979. Mesozoic Paleotectonic Evolution of the Ragusa Zone (Southeastern Sicily). *Geologica Romana* 18: 331-369.

Pondrelli S., Boschi E., Dziewonski A.M., Ekstrom G., Mazza S., Morelli A., Piromallo C., 1998. Regional Centroid Moment Tensor of the Mediterranean area and their tectonic implications. *IUGG99 Abstract Book* A169.

Pondrelli S., Salimbeni S., Ekstrom G., Morelli A., Gasperini P., Vannucci G., 2006. The Italian CMT dataset from 1977 to the present. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 159: 286-303.

Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della protezione civile, 2021. Classificazione sismica al 30 aprile 2021. <https://rischi.protezionecivile.gov.it/it/sismico/attivita/classificazione-sismica>.

Rauch A.F., 1998. Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using Cone Penetration Test. *Canadian Geotechnical Journal* 35: 442-459.

Regione Siciliana, 2002. Carte tematiche delle linee guida del Piano territoriale paesistico regionale. Assessorato dei Beni culturali e dell'Identità siciliana.

Regione Siciliana, 2007. Piano di tutela delle acque della regione Sicilia.

Ricci Lucchi F., 1980. *Sedimentologia*. Cooperativa Libreria Universitaria Editrice, Bologna.

Riga G., 2007. *La liquefazione dei terreni. Analisi, valutazione, calcolo*. Dario Flaccovio Editore, Palermo.

Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P., Antonucci A., 2022. *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15)*, versione 4.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).

Scandone P., Giunta G., Liguori V., 1974. The connection between the Apulia and Sahara continental margins in the Southern Apennines and in Sicily. *Memorie della Società Geologica Italiana* 13: 317-323.

Servizio Geologico d'Italia, 1885. *Carta Geologica d'Italia*, in scala 1:100000. Foglio 251, Cefalù. Servizio geologico d'Italia, Roma.

Speranza F., Maniscalco R., Mattei M., Di Stefano A., Butler R.W.H., Funicello R., 1999. Timing and magnitude of rotations in the frontal thrust systems of south-western Sicily. *Tectonics* 18: 1178-1197.

Stucchi M., Meletti C., Montaldo V., Akinci A., Faccioli E., Gasperini P., Malagnini L., Valensise G., 2004. *Pericolosità sismica di riferimento per il territorio nazionale MPS04 [Data set]*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).

Stucchi M., Meletti C., Montaldo V., Crowley H., Calvi G.M., Boschi E., 2011. Seismic Hazard Assessment (2003-2009) for the Italian Building Code. Bulletin of the Seismological Society of America 101(4): 1885-1911.

Tansi C., Muto F., Critelli S., Iovine G., 2007. Neogene-Quaternary strike-slip tectonics in the central Calabrian Arc (southern Italy). Journal of Geodynamics 43: 393-414.

Tanzini M., 2001. Fenomeni franosi e opere di stabilizzazione. Dario Flaccovio Editore, Palermo.

Terzaghi K., 1950. Mechanism of Landslides. Geological Society of America Bulletin (Berkeley): 83-123.

Torelli L., Grasso M., Mazzoldi G., Peis D., 1998. Plio-Quaternary tectonic evolution and structure of the Catania foredeep, the northern Hyblean Plateau and the Ionian shelf (SE Sicily). Tectonophysics 298: 209-221.

Vallario A., 1992. Frane e territorio. Le frane nella morfogenesi dei versanti e nell'uso del territorio. Liguori Editore, Napoli.

Varnes D.J., 1978. Slope movement types and processes. Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington.

Zaruba Q., Mencl V., 1982. Landslides and their control. Elsevier, Amsterdam, Academia-Praha, 2nd ed..