

# PROGETTO SPOT - SISMICITÀ POTENZIALMENTE INNESCABILE OFFSHORE E TSUNAMI

## Report integrato di fine progetto

Una collaborazione del MiSE, con il supporto tecnico del DPC, con CNR-ISMAR, INGV, EUCENTRE e ReLUIs



Ministero dello Sviluppo Economico

Antoncecchi I., Ciccone F., Dialuce G., Grandi S., Terlizzese F.

DGISSEG



PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

Di Bucci D., Dolce M.



Argnani A., Mercorella A., Pellegrini C., Rovere M., *con la partecipazione dell'Università di Bologna*: Armigliato A., Pagnoni, G., Paparo M.A., Tinti, S., Zaniboni F.



Basili R., Cavallaro D., Coltelli M., Firetto Carlino M., Lipparini L., Lorito S., Maesano F.E., Romano F., Scarfì L., Tiberti M.M., Volpe M., *con la partecipazione dell'Università di Pavia*: Fedorik J., Toscani G.



Borzi B., Faravelli M., Bozzoni F., Pascale V., Quaroni D., Germagnoli F.



Belliazi S., Del Zoppo M., Di Ludovico M., Lignola G.P., Prota A.



I contenuti di questo report sono tutelati dalla licenza Creative Commons 4.0 International (CC BY 4.0). Il permesso di utilizzare tali contenuti viene concesso con il pieno riconoscimento della fonte, utilizzando la seguente citazione raccomandata:

Antoncecchi I., Ciccone F., Dialuce G., Grandi S., Terlizzese F., Di Bucci D., Dolce M., Argnani A., Mercorella A., Pellegrini C., Rovere M., Armigliato A., Pagnoni, G., Paparo M.A., Tinti, S., Zaniboni F., Basili R., Cavallaro D., Coltelli M., Firetto Carlino M., Lipparini L., Lorito S., Maesano F.E., Romano F., Scarfì L., Tiberti M.M., Volpe M., Fedorik J., Toscani G., Borzi B., Faravelli M., Bozzoni F., Pascale V., Quaroni D., Germagnoli F., Belliazi S., Del Zoppo M., Di Ludovico M., Lignola G.P., Prota A. (2020) - Progetto SPOT - Sismicità Potenzialmente innescabile Offshore e Tsunami. Report integrato di fine progetto.

DOI: 10.5281/zenodo.3732887 ISBN 9788894366945

31 marzo 2020

**Ministero dello sviluppo economico**

Direzione generale per la sicurezza anche ambientale delle attività minerarie ed energetiche  
Ufficio nazionale minerario per gli idrocarburi e le georisorse  
Palazzo Piacentini - Via Veneto, 33 - 00187 Roma  
Tel. (+39) 06 4705 2859 Fax. (+39) 06 4788 7802 Email: [dgsunmig.segreteria@mise.gov.it](mailto:dgsunmig.segreteria@mise.gov.it)  
PEC: [dgsunmig.dg@pec.mise.gov.it](mailto:dgsunmig.dg@pec.mise.gov.it)

Nome	Affiliazione	ORCID	e-mail
Antoncecchi Ilaria	1,9*	0000-0002-3164-0794	ilaria.antoncecchi.ext@mise.gov.it
Ciccione Francesco	1,3*	0000-0002-6770-880X	f.ciccione.ext@mise.gov.it
Dialuce Gilberto	1		gilberto.dialuce@mise.gov.it
Grandi Silvia	1	0000-0002-2583-885X	silvia.grandi@mise.gov.it
Terlizese Franco	1		franco.terlizese2@gmail.com
Di Bucci Daniela	2	0000-0003-1290-4456	daniela.dibucci@protezionecivile.it
Dolce Mauro	2	0000-0002-1589-1446	mauro.dolce@protezionecivile.it
Argnani Andrea	3	0000-0003-0729-2782	andrea.agnani@ismar.cnr.it
Mercorella Alessandra	3	0000-0003-4120-6964	alessandra.mercorella@bo.ismar.cnr.it
Pellegrini Claudio	3	0000-0003-2453-3998	claudio.pellegrini@bo.ismar.cnr.it
Rovere Marzia	3	0000-0002-1397-7086	marzia.rovere@bo.ismar.cnr.it
Armigliato Alberto	4	0000-0002-8058-0361	alberto.armigliato@unibo.it
Pagnoni Gianluca	4	0000-0003-0901-5471	gianluca.pagnoni3@unibo.it
Paparo Maria Ausilia	4	0000-0001-6661-7829	mariaausilia.paparo2@unibo.it
Tinti Stefano	4	0000-0002-5750-1258	stefano.tinti@unibo.it
Zaniboni Filippo	4	0000-0003-2107-9865	filippo.zaniboni@unibo.it
Basili Roberto	5	0000-0002-1213-0828	roberto.basili@ingv.it
Cavallaro Danilo	5	0000-0001-9173-3725	danillo.cavallaro@ingv.it
Coltelli Mauro	5	0000-0001-7868-3946	mauro.coltelli@ingv.it
Firetto Carlino Marco	5	0000-0002-4651-9639	marco.firettocarolino@ingv.it
Lipparini Lorenzo	5	0000-0001-7456-0260	lorenzo.lipparini@ingv.it
Lorito Stefano	5	0000-0002-1458-2131	stefano.lorito@ingv.it
Maesano Francesco Emanuele	5	0000-0002-5652-1548	francesco.maesano@ingv.it
Romano Fabrizio	5	0000-0003-2725-3596	fabrizio.romano@ingv.it
Scarfi Luciano	5	0000-0002-5995-3880	Luciano.scarfi@ingv.it
Tiberti Mara Monica	5	0000-0003-2504-853X	mara.tiberti@ingv.it
Volpe Manuela	5	0000-0003-4551-3339	manuela.volpe@ingv.it
Fedorik Jakub	6	0000-0001-6345-1552	j.fedorik@gmail.com
Toscani Giovanni	6	0000-0002-3278-3287	giovanni.toscani@unipv.it
Borzi Barbara	7		barbara.borzi@eucentre.it
Faravelli Marta	7	0000-0001-8996-5404	marta.faravelli@eucentre.it
Bozzoni Francesca	7	0000-0002-3770-5157	francesca.bozzoni@eucentre.it
Pascale Venanzio	7		venanzio.pascale@eucentre.it
Quaroni Davide	7		davide.quaroni@eucentre.it
Germagnoli Fabio	7		fabio.germagnoli@eucentre.it
Belliazzi Stefano	8	0000-0002-0471-3601	stefano.belliazzi@unina.it
Del Zoppo Marta	8	0000-0002-3396-9825	marta.delzoppo@unina.it
Di Ludovico Marco	8	0000-0003-3697-3923	marco.diludovico@unina.it
Lignola Gian Piero	8	0000-0001-6027-9291	gianpiero.lignola@unina.it
Prota Andrea	8	0000-0003-3820-663X	andrea.prota@unina.it

1. Ministero dello Sviluppo Economico – DGISSEG
2. Presidenza del Consiglio dei Ministri – Dipartimento della Protezione Civile
3. Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di Scienze Marine
4. Università di Bologna – Dipartimento di Fisica e Astronomia
5. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
6. Università di Pavia – Dipartimento di Scienze della Terra e dell’Ambiente
7. EUCENTRE Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica
8. Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica
9. Ricerca sul Sistema Energetico S.p.A.

\* Affiliazione secondaria

*Attività svolta nell'ambito del programma CLYPEA - Innovation Network for Future Energy, finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico su fondi per la "sicurezza offshore" ai sensi dell'art.35 D.L. 83/2012*

## Introduzione

Il progetto SPOT (Sismicità Potenzialmente innescabile Offshore e Tsunami) è stato sviluppato con lo scopo di supportare le Autorità italiane nell'applicazione della Direttiva Europea sulla sicurezza delle operazioni in mare nel settore degli idrocarburi (2013/30/EU), su fondi di cui art. 35 del Decreto Legge 83/2012, e dei decreti italiani che ne derivano (Antoncecchi et al., 2019). Il progetto, della durata di 21 mesi, è stato ideato e finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico italiano – Direzione Generale per la sicurezza delle attività minerarie ed energetiche (DGS-UNMIG) nell'ambito della rete di ricerca CLYPEA, con il supporto tecnico del Dipartimento della Protezione Civile nazionale.

## Finalità

Il progetto ha avuto come obiettivo generale l'implementazione di alcuni degli approfondimenti suggeriti dalla Commissione Grandi Rischi dopo il terremoto dell'Emilia del 2012. È stata condotta un'ampia analisi delle strutture geologiche presenti nell'offshore delle coste italiane, volta a valutare l'esistenza di faglie potenzialmente sismogeniche in prossimità delle piattaforme di estrazione olio e gas in produzione, e di corpi sedimentari potenzialmente instabili dal punto di vista gravitativo e suscettibili di (ri-) attivazione a seguito di terremoti generati dalle suddette faglie. A questa analisi ha fatto seguito una valutazione generale, alla scala nazionale, del potenziale impatto e delle conseguenti perdite causate da terremoti e tsunami generati dalle strutture riconosciute, sia tettoniche sia gravitative. Il progetto, dunque, riguarda alcune pericolosità naturali, e deve essere considerato come una fase propedeutica a un'eventuale valutazione, successiva, della sismicità potenzialmente innescata connessa a operazioni svolte sulle piattaforme.

## Enti di ricerca coinvolti

Sono stati coinvolti i seguenti quattro enti di ricerca, in possesso di competenze riconosciute sulle tematiche trattate: l'Istituto di Scienze Marine del Consiglio Nazionale delle Ricerche (ISMAR), con la collaborazione dell'Università di Bologna (Dipartimento di Fisica ed Astronomia); l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV); il Centro Europeo per la Formazione e la Ricerca nell'Ingegneria dei Terremoti (EUCENTRE); la Rete Universitaria dei Laboratori di Ingegneria Sismica (ReLUIS).

## Linee di ricerca

Le linee di ricerca (L) sviluppate nel corso del progetto sono le seguenti:

1. identificazione di faglie potenzialmente attive nei pressi delle piattaforme offshore in produzione;
2. identificazione di faglie potenzialmente sismogeniche nei pressi delle piattaforme offshore in produzione e caratterizzazione della loro attività;
3. identificazione di frane sottomarine e instabilità di sedimenti lungo i margini continentali, che possano essere attivati da scuotimento sismico generato dalle faglie potenzialmente sismogeniche;
4. modellazione dell'onda di maremoto potenzialmente prodotta dalle frane sottomarine;
5. modellazione dell'onda di maremoto potenzialmente prodotta dall'attivazione delle faglie selezionate per gli scenari di danno;
6. modellazione di scenari di danno su strutture e infrastrutture costiere, e conseguenti perdite dovute ai terremoti generati dalle faglie di scenario (incluso webGIS dedicato);
7. caratterizzazione della vulnerabilità delle strutture residenziali costiere rispetto all'impatto di un'onda di maremoto;
8. modellazione di scenari di danno, dovuti ai maremoti sopra menzionati, su strutture residenziali costiere, e conseguenti perdite.

Le indagini relative alle diverse linee di ricerca sono riferite alla linea di costa italiana che fronteggia, in senso lato, le piattaforme offshore in produzione considerate. Tale linea di costa è stata opportunamente

divisa in cinque diverse aree di studio: Adriatico Settentrionale, Adriatico Centrale, Adriatico Meridionale, Mar Ionio (offshore della Calabria ionica), Canale di Sicilia (Figura 1).

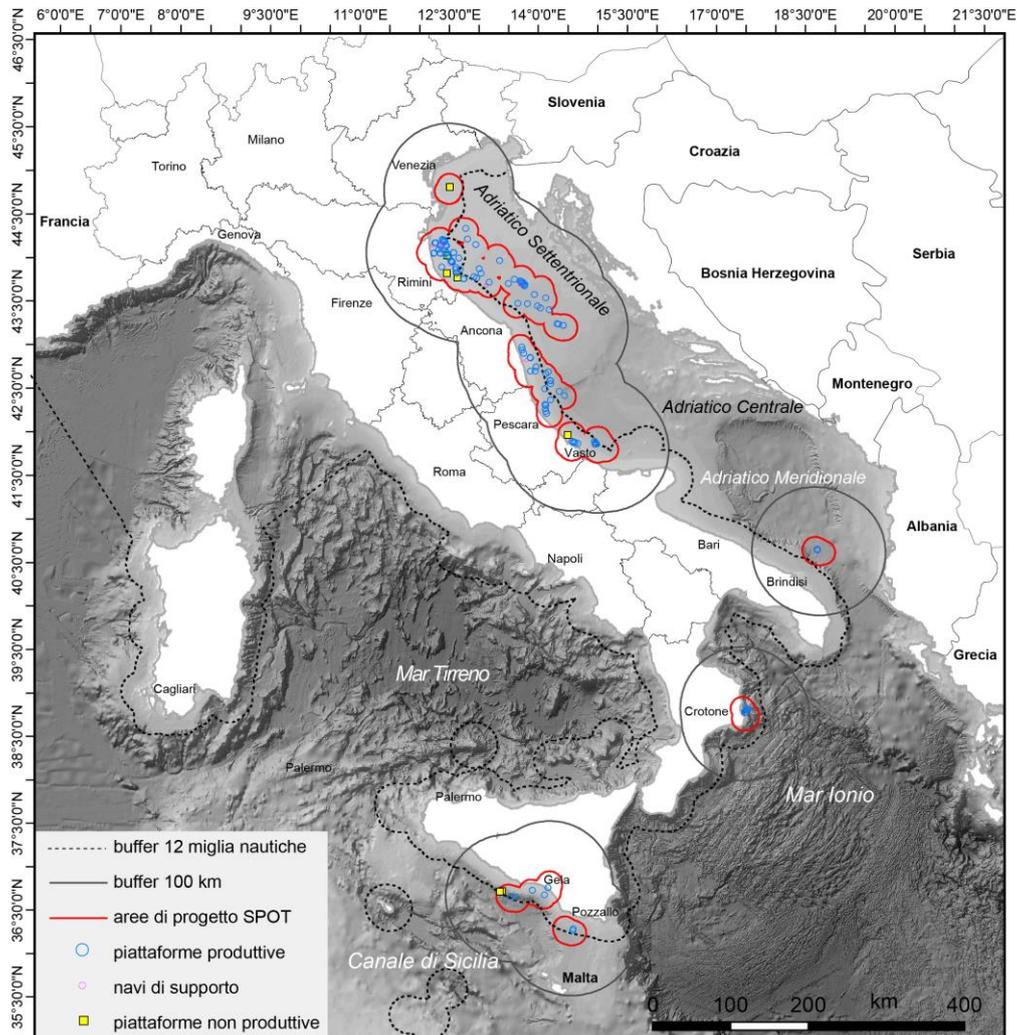


Fig. 1 – Aree di studio del progetto: Adriatico Settentrionale, Adriatico Centrale, Adriatico Meridionale, Mar Ionio (offshore della Calabria ionica), Canale di Sicilia.

## Risultati raggiunti

### **Linea di ricerca 1. Identificazione di faglie potenzialmente attive nei pressi delle piattaforme offshore in produzione**

Nell'ambito di questa linea di ricerca, al fine di ricostruire l'assetto stratigrafico-strutturale del sottofondo marino, il CNR-ISMAR ha analizzato circa: i) 90.000 km di profili di sismica a riflessione monocanale di tipo CHIRP (penetrazione 30–50 m e risoluzione verticale decimetrica); ii) circa 45.000 km<sup>2</sup> di dati batimetrici da ecoscandagli multifascio ad alta risoluzione (risoluzione spaziale variabile da pochi metri a 90 m); iii) circa 25.000 km di sismica a riflessione multicanale provenienti da acquisizioni ministeriali, progetto CROP e proprie (penetrazione 1–4 km e risoluzione verticale metrica o decametrica); iv) svariati campioni di sedimento (disponibili solo lungo la scarpata del Bacino di Gela e nell'Adriatico Centrale) e pozzi per l'esplorazione petrolifera, disponibili sul database ViDEPI accessibile alla pagina web <https://www.videpi.com/videpi/videpi.asp#>) migliaia di chilometri di sismica multicanale messi a disposizione da Eni S.p.A. durante due sessioni di lavoro in *data room* presso gli uffici di San Donato

Milanese (MI). Sono state considerate tutte le eventuali faglie attive, le deformazioni del fondo mare e le evidenze di instabilità di scarpata nelle aree di progetto.

L'area attorno ai pozzi Gela-Panda, nell'area di studio del Canale di Sicilia, ospita parzialmente la Falda di Gela (Argnani, 1987), il più esterno e giovane sovrascorrimento del sistema di catena appenninico in Sicilia, che si è imbricato sopra l'avampaese pelagiano tra il tardo Miocene e il Pleistocene (Figura L1-1A). Le faglie più importanti nell'area delimiterebbero dei bacini estensionali del tardo Miocene, e sarebbero state riattivate in compressione durante il Pliocene-Pleistocene (Ghisetti et al., 2009). Tale sistema di faglie è ben evidente in Figura L1-1B, ma non risulta visibile nei profili CHIRP CNR-ISMAR, che mostrano la parte recente successione sedimentaria e il fondo mare (Figura L1-1C). Nella parte orientale del bacino, in prossimità della scarpata che lo borda e dove sono ubicate le frane gemelle (Minisini et al., 2007; Twin Slides in Figura L1-1A), è stata individuata una faglia del sistema flessurale che risulta interessare il fondo mare con una piccola scarpata. Va tuttavia notato che nicchie di frana di dimensioni simili sono distribuite lungo tutta la scarpata del bacino, anche lontano dall'emersione delle faglie (Figura L1-2B), e non risultano dunque rappresentare una condizione necessaria alla destabilizzazione.

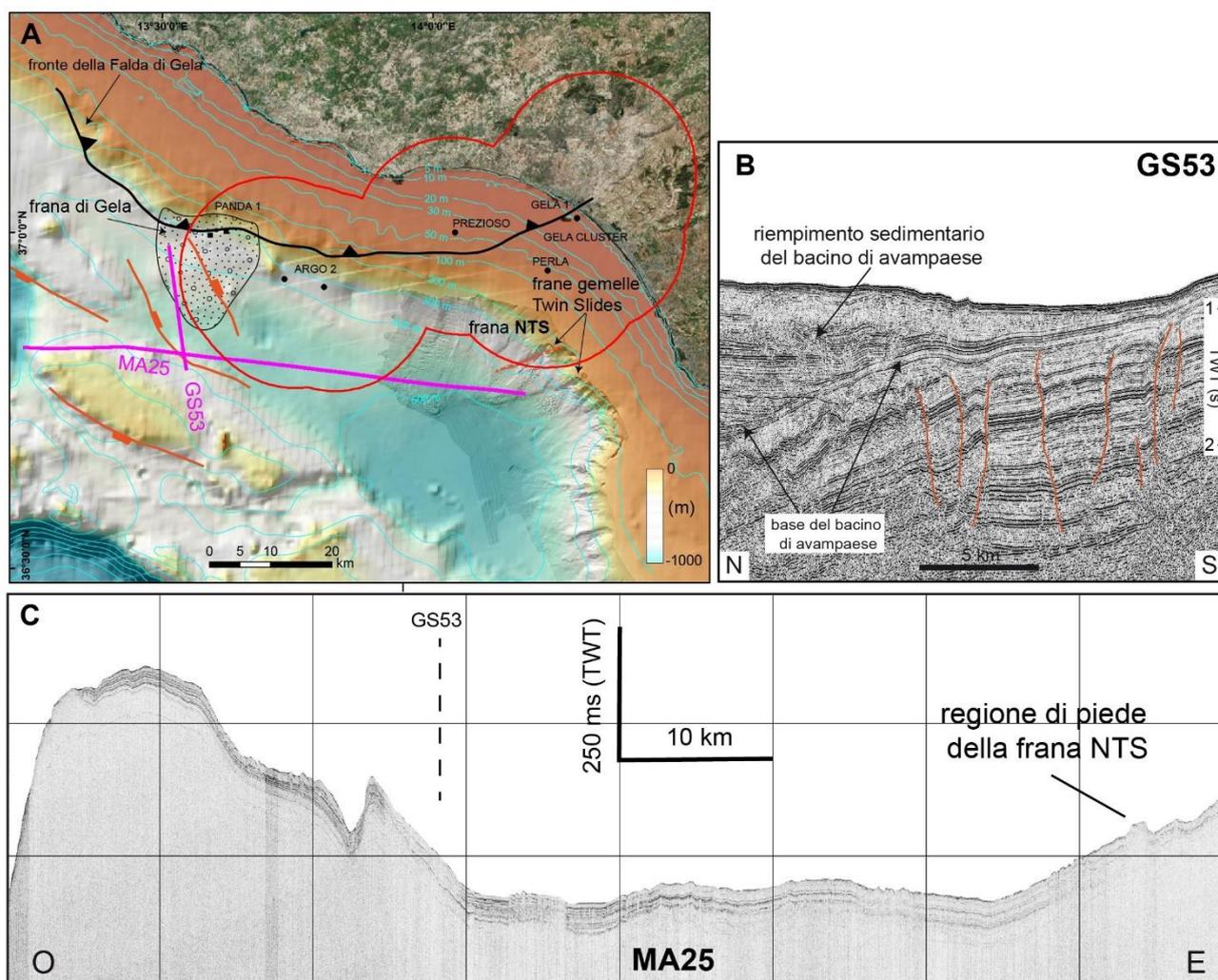


Figura L1-1 – A: mappa batimetrica e strutturale dell'area di studio attorno ai pozzi Gela-Panda. Sono indicate le tracce dei profili mostrati in B e C. I cerchi rossi indicano l'area di interesse attorno ai pozzi. B: profilo sismico a riflessione multicanale GS53 acquisito nel 1990 dal CNR-ISMAR, che mostra il sistema di faglie principale che caratterizza l'area. C: profilo sismico a riflessione monocanale CHIRP, che attraversa tutta l'area di studio e mette in evidenza l'assenza di dislocazioni del fondo mare. TWT = Two Way Time, indica i tempi di andata e ritorno del segnale acustico dalla sorgente al sottofondo e viceversa.

L'area di studio nel Canale di Sicilia, che include l'impianto Vega, si trova nell'immediato offshore di un sistema di faglie denominato Scicli-Ragusa (Figura L1-2A), prevalentemente considerate trascorrenti destre (Grasso et al., 2000), con una possibile riattivazione tardo quaternaria in trascorrenza sinistra (Catalano et al., 2008). La successione plio-quaternaria della piattaforma continentale, che è presente con spessori molto ridotti e talora è assente, non sembra essere interessata da deformazioni importanti, nemmeno sulla prosecuzione a mare delle strutture di Scicli-Ragusa e di Comiso, mentre mostra una complessa relazione fra erosione e sedimentazione (Figura L1-2B). In nessuno dei profili sismici CHIRP di CNR-ISMAR è stato possibile rintracciare evidenza a fondo mare della prosecuzione a mare delle strutture di Scicli-Ragusa (Fig. L1-2B a titolo esemplificativo) e del sistema Comiso-Chiaramonte. Il substrato carbonatico mostra invece la presenza di ampie pieghe chilometriche ad asse subverticale che hanno direzione da N-S a NNE-SSO, che sono probabilmente il risultato di un'inversione paleogenica e che non mostrano attività successiva (Argnani e Torelli, 2001).

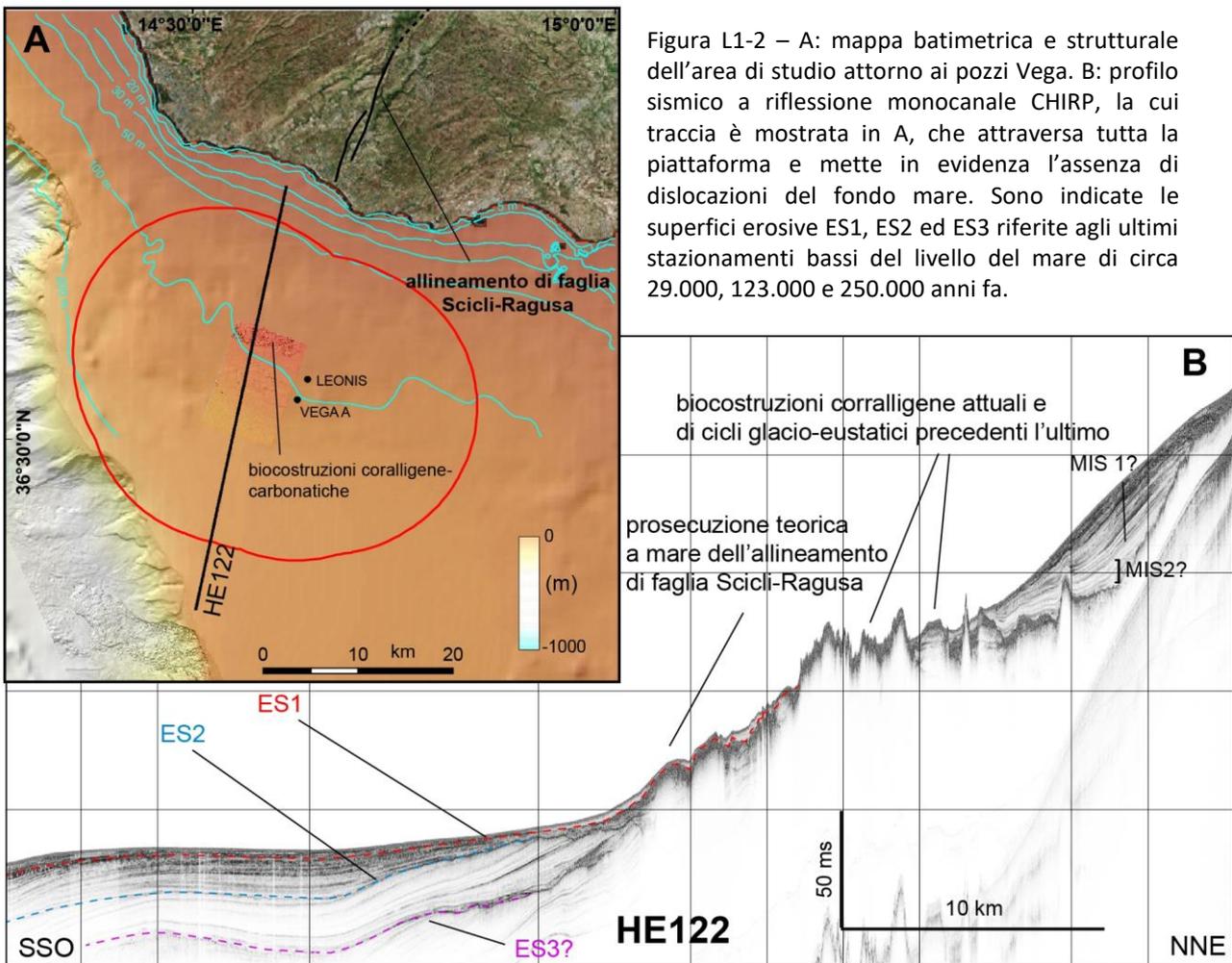


Figura L1-2 – A: mappa batimetrica e strutturale dell'area di studio attorno ai pozzi Vega. B: profilo sismico a riflessione monocanale CHIRP, la cui traccia è mostrata in A, che attraversa tutta la piattaforma e mette in evidenza l'assenza di dislocazioni del fondo mare. Sono indicate le superfici erosive ES1, ES2 ed ES3 riferite agli ultimi stazionamenti bassi del livello del mare di circa 29.000, 123.000 e 250.000 anni fa.

L'area attorno ai campi Luna, nell'offshore crotonese, è piuttosto complessa da un punto di vista morfo-batimetrico e strutturale. La piattaforma continentale è larga al massimo 7 km, la scarpata superiore ha una pendenza molto accentuata che può raggiungere localmente 20°, ed è caratterizzata dalla fitta presenza di canyon e canalizzazioni erosive (Figura L1-3A). La scarpata intermedia è caratterizzata dalla presenza a fondo mare di numerose evidenze di espulsioni di fluidi (*pockmark*; Figura L1-3A), che sono collegate a numerose faglie estensionali, presenti nella successione plio-quaternaria; queste ultime hanno favorito la migrazione di gas verso il fondo mare a partire dalla successione miocenica, che rappresenta la roccia serbatoio ed è posta a 1262 m di profondità sotto il livello del mare (Figura L1-3B). Sono abbondanti le

frane (Figura L1-3C), probabilmente favorite nel loro innesco dalla presenza di fluidi, dagli alti gradienti di scarpata e da una morfologia caratterizzata da zone maggiormente rilevate e, quindi, più facilmente soggette a scivolamento gravitativo. L'analisi dei profili dell'Eni S.p.A. ha consentito di individuare strutture con direzione NNO-SSE parallele ad allineamenti di scarpate che hanno espressione morfologica (Figura L1-3A) e hanno confermato la presenza di una diffusa deformazione dovuta a faglie normali, di probabile origine gravitativa, che spesso sembrano raccordarsi alla base della successione pliocenico-quadernaria e talvolta a quella pre-pliocenica.

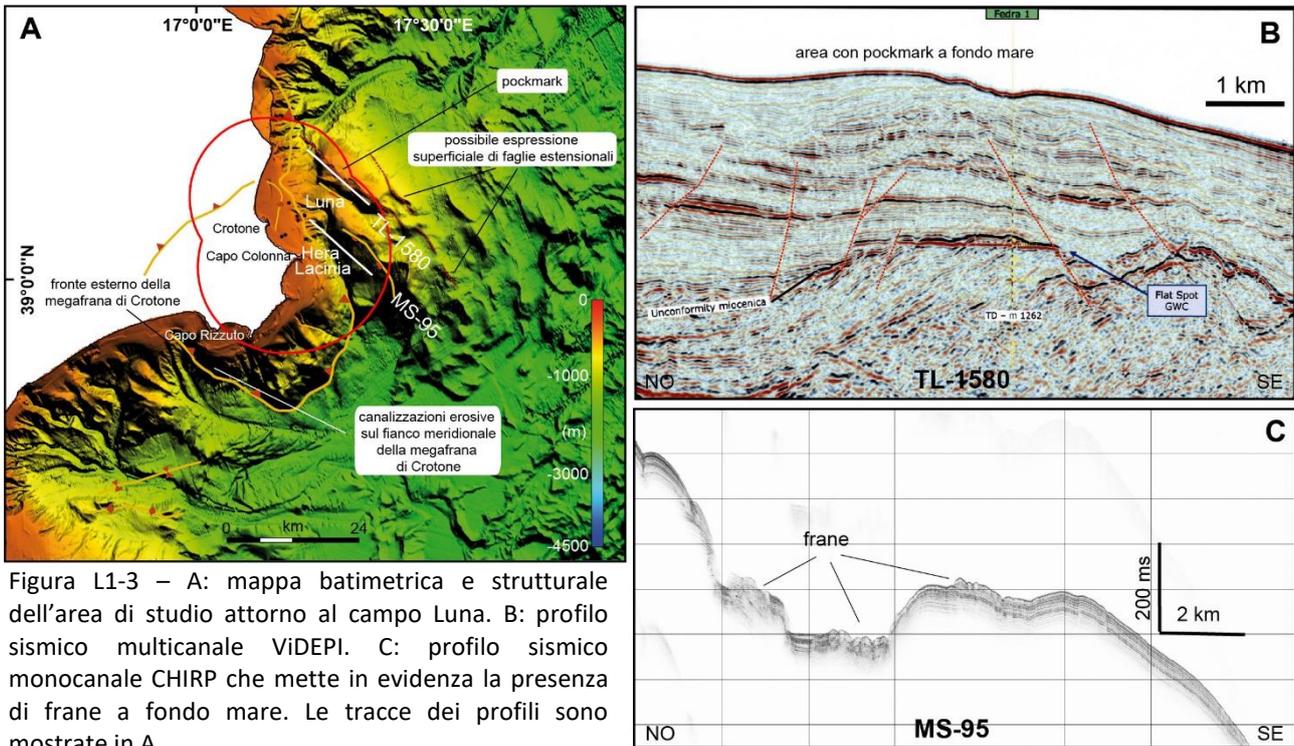


Figura L1-3 – A: mappa batimetrica e strutturale dell'area di studio attorno al campo Luna. B: profilo sismico multicanale ViDEPI. C: profilo sismico monocanale CHIRP che mette in evidenza la presenza di frane a fondo mare. Le tracce dei profili sono mostrate in A.

Gli impianti del pozzo Aquila sono ubicati al piede della ripida scarpata erosionale che caratterizza il margine orientale della Piattaforma Apula (Figura L1-4A), nell'area di studio dell'Adriatico Meridionale. Nell'area non sono presenti strutture tettoniche importanti di età neogenica (Figura L1-4B, C). Al margine della Piattaforma Apula si evidenziano fenomeni di instabilità gravitativa nei sedimenti sovrastanti (Figura L1-4C), legati a compattazione differenziale fra i sedimenti clastici di spessore ridotto, posti sopra ai carbonati mesozoici di piattaforma, e la spessa successione clastica terziaria, presente sopra all'adiacente bacino pelagico mesozoico (Figura L1-4B). Nella parte più orientale dell'area sono presenti strutture di inversione che interessano faglie estensionali, probabilmente originatesi per la flessurazione dell'avampaese, sottoposto al carico della catena ellenico-albanese (Figura L1-4B). Tali strutture di inversione deformano la superficie di erosione messiniana, ma non interessano i sedimenti quadernari, come suggerisce la mappa (non mostrata) computata per il riflettore corrispondente allo stazionamento basso di 800.000 anni fa (800 ka in Figura L1-4B), che conferma l'assenza di strutture tettoniche attive nel Quaternario.

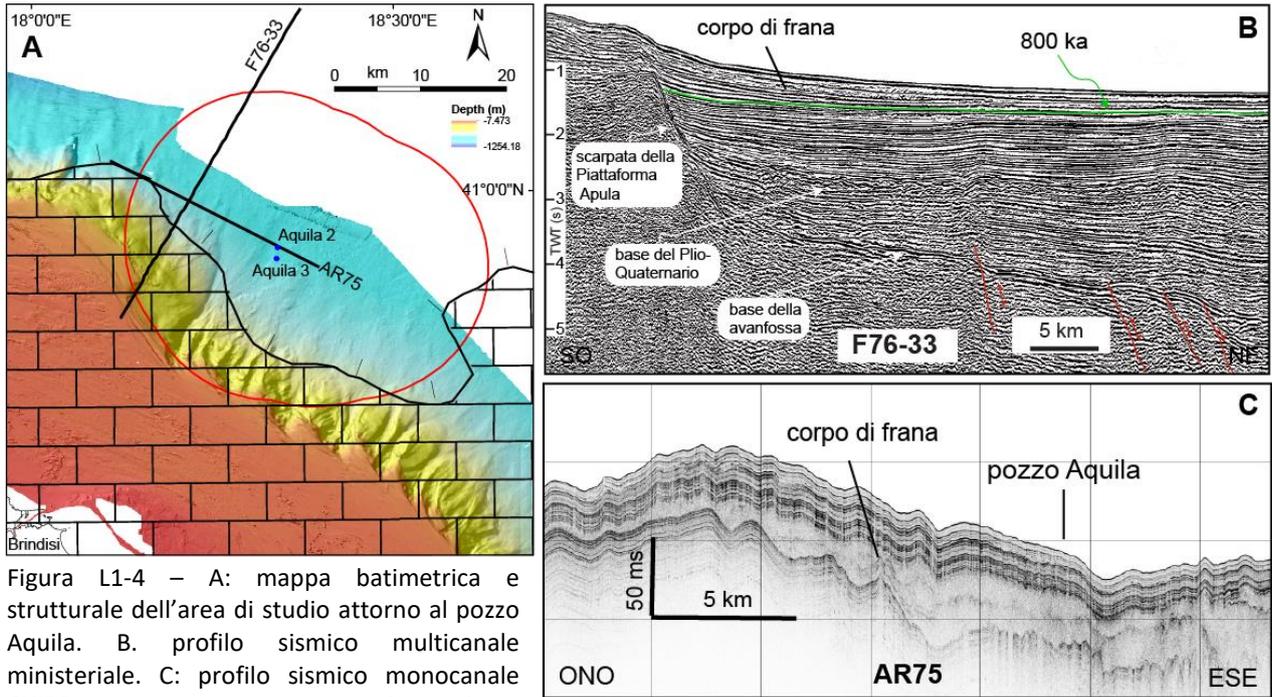
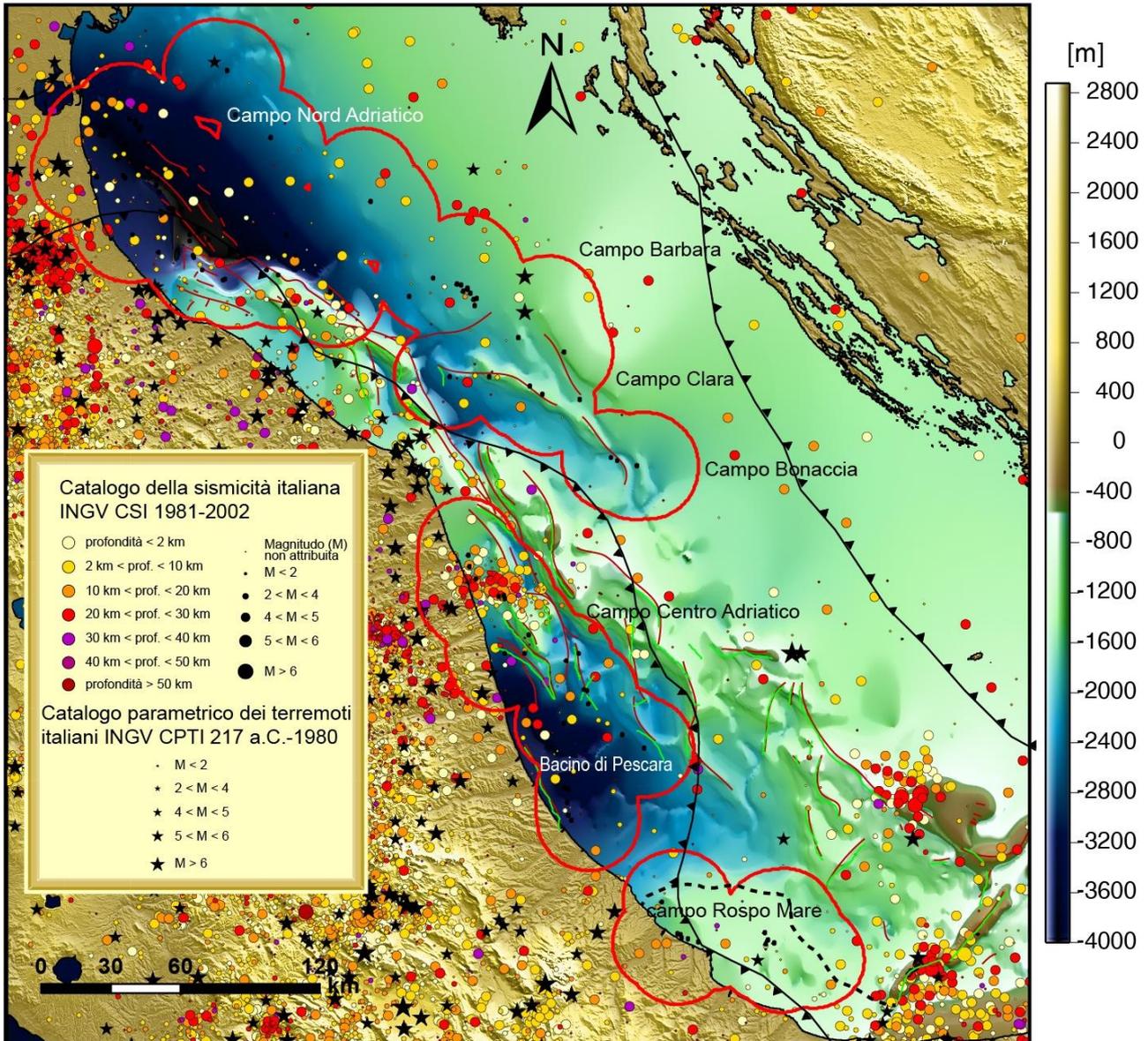


Figura L1-4 – A: mappa batimetrica e strutturale dell’area di studio attorno al pozzo Aquila. B. profilo sismico multicanale ministeriale. C: profilo sismico monocanale CHIRP che mostra la presenza di una frana sepolta da circa 50 m di sedimento.

Nell’area di studio dell’Adriatico Centrale, gli impianti di produzione attorno al pozzo Rospo Mare sono ubicati sopra la Piattaforma Apula di età mesozoica, la quale rappresenta l’antico margine passivo del dominio adriatico, che si estende sulla maggior parte dell’area (Figura L1-5). Qui il fronte appenninico si trova a terra e i sedimenti dell’avanfossa plio-quadernaria hanno uno spessore ridotto. Al margine della Piattaforma Apula si osserva una limitata instabilità gravitativa dovuta a compattazione differenziale, che talora si manifesta con faglie estensionali a limitato rigetto che si radicano al ciglio della piattaforma. Nell’insieme, non sono state rilevate strutture significative che risultino attive durante il Quaternario e che interessino il fondo mare.



- Strutture attive alla base del Quaternario (CARTOGRAFIA DEI MARI ITALIANI ALLA SCALA 1:250.000, 2011)
- Strutture attive alla base del Plio-Quaternario (CARTOGRAFIA DEI MARI ITALIANI ALLA SCALA 1:250.000, 2011)
- - - - Margine della Piattaforma Apula (CARTOGRAFIA DEI MARI ITALIANI ALLA SCALA 1:250.000, 2011)
- ▲▲ Fronti Appenninico e Dinarico

Figura L1-5 – profondità della superficie di base del Pliocene mappata nell’Adriatico Centrale e Settentrionale, con sovrainposte le strutture tettoniche principali ritenute attive alla base del Pliocene (in rosso) e alla base del Quaternario (in verde).

Nell'area di studio dell’Adriatico Centrale sono presenti varie strutture tettoniche neogeniche (Figura L1-5). Nella parte meridionale dell’area, il fronte appenninico è ubicato all’incirca sulla costa (campo Rospo Mare in Figura L1-5), per poi spostarsi verso mare nel settore settentrionale. Uno spesso bacino plio-quaternario di avanfossa (Bacino di Pescara, Figura L1-5) è presente nella parte meridionale, mentre si osserva una forte riduzione degli spessori dei sedimenti plio-quaternari verso nord (Figura L1-5). I fronti di sovrascorrimento esterni appaiono sigillati dalla sedimentazione quaternaria. Nel complesso, non si rilevano nell'area marina importanti strutture tettoniche che mostrino attività dal tardo Pleistocene a oggi, con la possibile eccezione della struttura costiera, che risulta però difficile da valutare con i soli dati disponibili a mare.

Una caratteristica particolarmente rilevante nell'Adriatico centro-settentrionale è data dalla presenza di sistemi di progradazione plio-quadernari estesi su tutta l'area, che rappresentano un utile elemento stratigrafico per stimare l'attività recente delle strutture tettoniche. La mappatura della base e del tetto dell'involuppo di questi sistemi progradazionali, che hanno la geometria di clinoforimi, è stata utilizzata proprio per evidenziare lo stile di sedimentazione, ed eventuale deformazione o dislocazione indotta da attività tettonica, in un intervallo temporale compreso tra Pleistocene inferiore (base) e superiore (tetto). La superficie di base delle unità mostra limitate evidenze di attività deformativa o dislocativa (Figura L1-6A), mentre sulla superficie di tetto non sono visibili perturbazioni imputabili ad attività tettonica (Figura L1-6B).

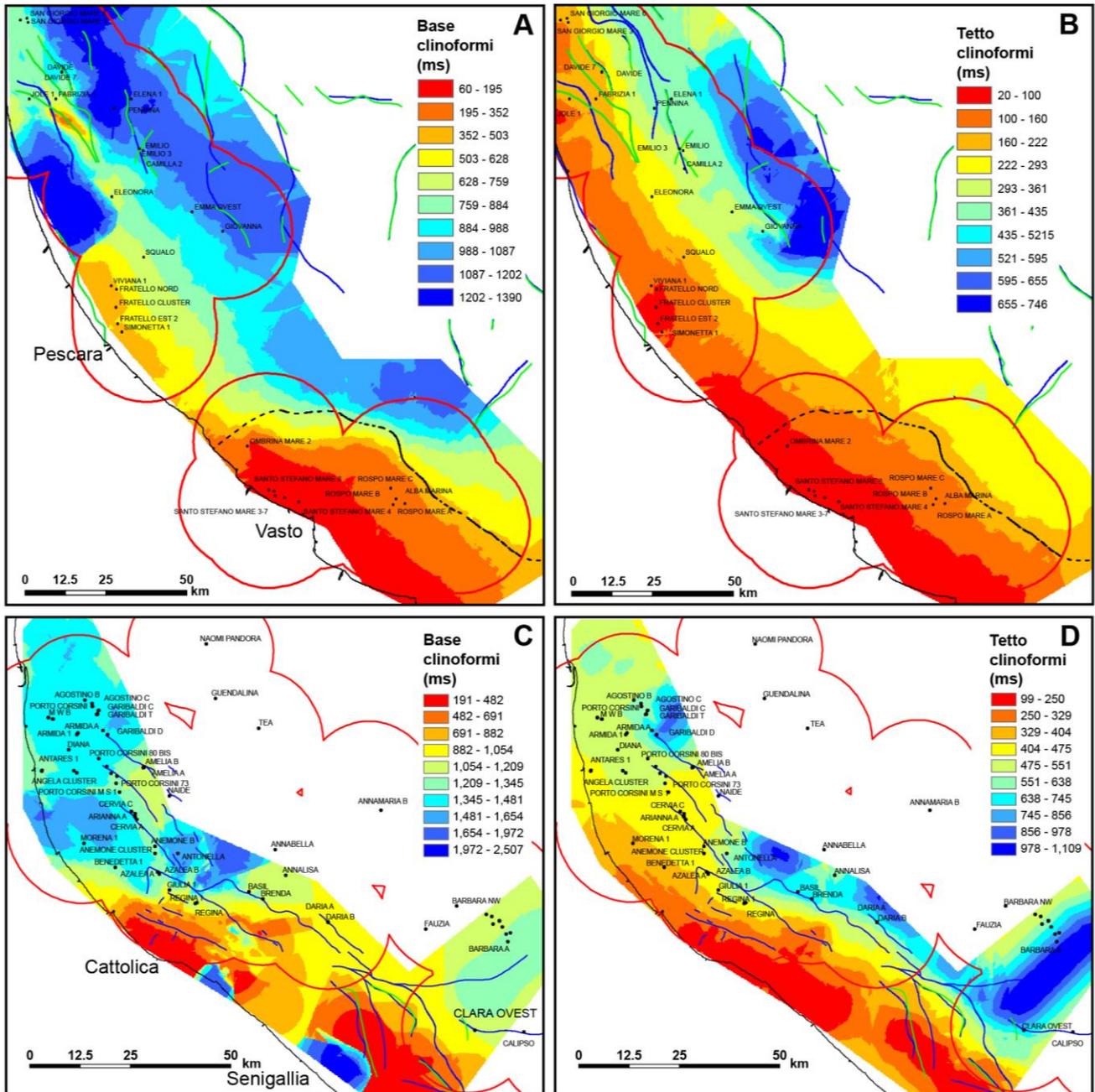


Figura L1-6 – A: mappatura della base dell'involuppo dei clinoforimi quaternari. B: tetto dei clinoforimi (profondità in millisecondi). In blu sono rappresentate le strutture tettoniche ritenute attive fino alla base del Pliocene, in verde quelle attive fino alla base del Quaternario. I cerchi rossi indicano le aree di progetto SPOT.

Nell'area di studio dell'Adriatico Settentrionale sono presenti varie strutture neogeniche (Figura L1-5). Nella parte più settentrionale dell'area, in prossimità della costa, sono presenti i sovrascorrimenti esterni appenninici (Fantoni e Franciosi, 2010), che appaiono sigillati dal sistema di progradazione quaternaria (es.: Ghielmi et al., 2013). Nel settore adiacente la costa di Cattolica (Figura L1-6C), i sistemi progradanti e le sovrastanti unità in aggradazione mostrano, a grande scala, superfici progressivamente inclinate verso est, che indicano una possibile crescita delle strutture ubicate in prossimità della costa, in maniera simile a quanto già osservato in precedenza nell'Adriatico Centrale. Nella parte sud-orientale dell'area di studio (attorno ai pozzi del campo Clara) sono presenti blande pieghe che interessano l'avampaese e sono assimilabili al sistema deformativo presente nell'Adriatico Centrale (es.: Argnani e Frugoni, 1987). In questo caso, tuttavia, i sedimenti quaternari non sono interessati da deformazione, e questo si vede sia nei dati di sismica multicanale (es.: Pace, 2018), sia nei dati di sismica monocanale ad alta risoluzione di CNR-ISMAR. Inoltre, anche nell'Adriatico Settentrionale sono stati mappati la base e il tetto dei clinoforimi (Figura L1-6C e D) e, nel complesso, non sono presenti nell'area strutture tettoniche che mostrino attività nel Pleistocene.

***Linea di ricerca 2. Identificazione di faglie potenzialmente sismogeniche nei pressi delle piattaforme offshore in produzione e caratterizzazione della loro attività***

*Identificazione di potenziali faglie sismogeniche*

Le cinque Aree di Studio riportate nella Figura 1 sono state oggetto di uno studio approfondito, condotto dall'INGV, finalizzato all'individuazione di faglie potenzialmente sismogeniche (Figura L2-1). Le aree sono caratterizzate da regimi tettonici e stili strutturali molto diversi tra di loro, come emerso anche dall'analisi di dettaglio della letteratura scientifica disponibile; tale analisi è iniziata con uno studio bibliografico approfondito, a cui ha fatto seguito la consultazione di log di pozzo e dati geologici ricavabili da relazioni redatte nell'ambito di permessi di ricerca e concessioni di coltivazione, disponibili sul database ViDEPI. Sono state, inoltre, interpretate diverse migliaia di km di profili di sismica a riflessione, disponibili in formato SEG Y nel database SNAP (Seismic data Network Access Point; Diviacco et al., 2018), sotto licenza dell'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS, Trieste). Quanto emerso dallo studio effettuato è stato ulteriormente vincolato attraverso la consultazione di dati confidenziali (linee sismiche ad elevata risoluzione e log di pozzo), avvenuta durante due sessioni di *data room* presso gli uffici di ENI S.p.A. di San Donato Milanese (MI).

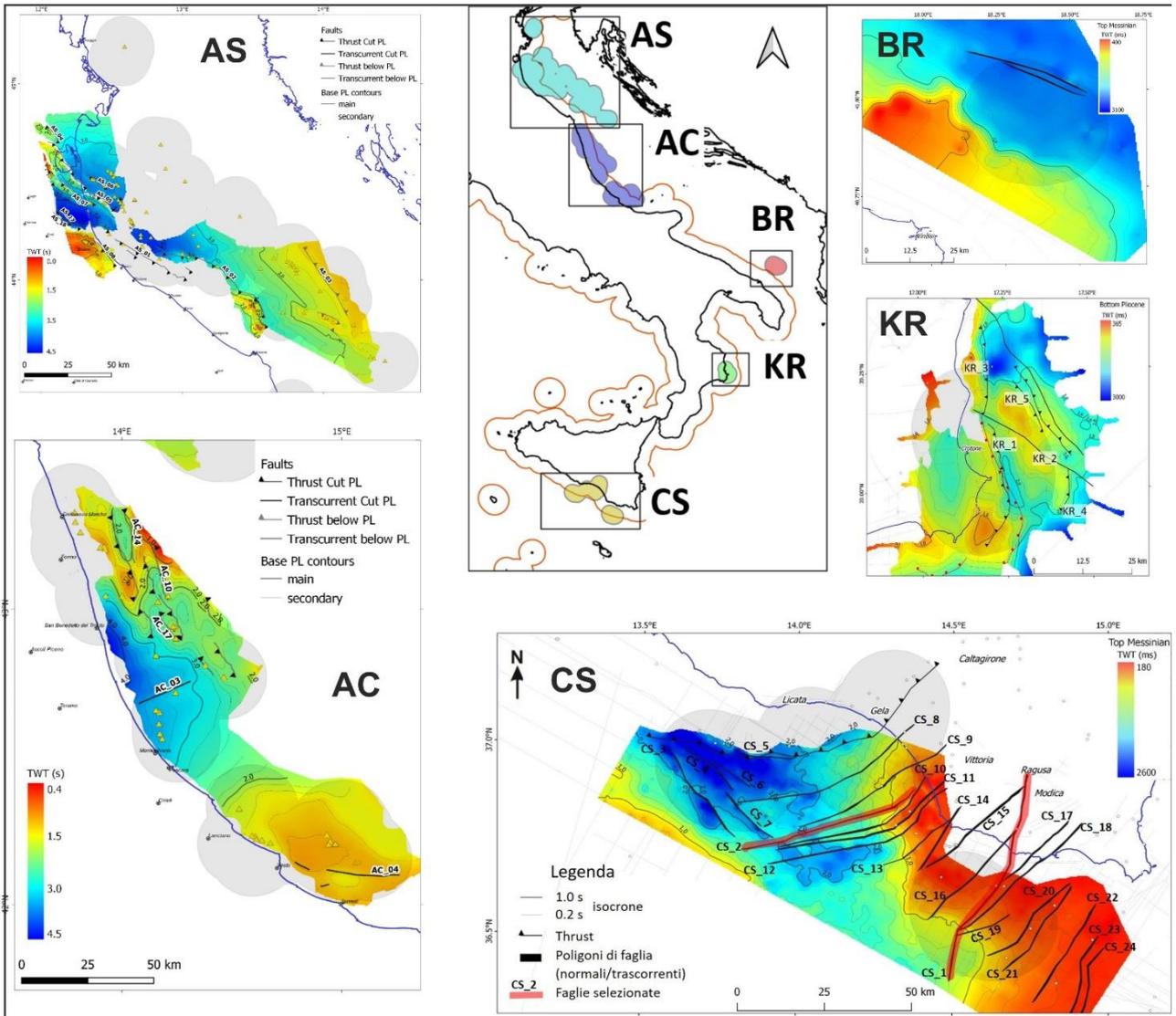


Figura L2-1 – Mappe dei maggiori lineamenti strutturali riferiti alla Base del Pliocene/tetto del Messiniano identificati nelle cinque aree di studio: AS Adriatico Settentrionale, AC Adriatico Centrale, BR Adriatico Meridionale, KR Mar Ionio (offshore della Calabria ionica), CS Canale di Sicilia.

Sono stati individuati e caratterizzati da un punto di vista geometrico e, ove possibile, cinematico, i principali piani di faglia riconosciuti all'interno delle aree di studio, e mappati alcuni orizzonti stratigrafici di importanza regionale; in particolare, la base del Pliocene/tetto del Messiniano è stata individuata su tutte le aree e a tale orizzonte sono state riferite le carte strutturali relative alle faglie principali (Figura L2-1). I piani di faglia, inizialmente individuati nei profili sismici in tempi doppi (TWT, si veda ad esempio la Figura L1-1B), sono stati convertiti in profondità utilizzando modelli di velocità derivati dai log di pozzo e dai profili sismici multicanale, o ricavati dalla letteratura scientifica. Sono stati infine analizzati la sismicità storica (CPT15, Rovida et al., 2016; Guidoboni et al., 2018) e strumentale, consultabili nei principali database INGV, e i dati batimetrici disponibili sul portale "EMODnet Bathymetry" (<http://www.emodnet-bathymetry.eu>; EMODnet Bathymetry Consortium, 2018).

L'Adriatico Settentrionale (AS in Figura L2-1) include i fronti esterni della catena Nord-Appenninica, caratterizzati da uno stile strutturale a pieghe e faglie noto in letteratura. Sono stati ricostruiti 19 piani di faglia principali per una lunghezza complessiva di 389 km e, su gran parte dell'area di studio, l'orizzonte stratigrafico relativo alla base del Pliocene, rispetto al quale sono stati stimati i rigetti. In generale, le faglie ricostruite si radicano all'interno di livelli stratigrafici pre-pleiocenici, raggiungendo, in alcuni casi, i livelli evaporitici triassici, ad eccezione di due piani di faglia minori scollati alla base della successione pliocenica.

Tutte le faglie mappate mostrano una cinematica inversa (*thrust*), sono sepolte e confinate all'interno della successione pliocenico-quadernaria e, ad eccezione di una, dislocano la base del Pliocene.

La sismicità strumentale registrata nell'area tra il 2005 ed il 2015 è maggiormente concentrata a ridosso della linea di costa, e presenta magnitudo comprese tra 1.2 e 4.5, con una preponderanza di eventi di magnitudo 1.6–1.7. La profondità degli eventi varia tra 0 e 40 km, ma la maggior parte è confinata nei primi 20 km. L'evento di magnitudo più alta è stato registrato nel giugno 2012, è localizzato nell'immediato offshore di Ravenna a una profondità di 26 km e mostra un meccanismo focale con cinematica trascorrente (<http://cnt.rm.ingv.it/event/925601>).

L'Adriatico Centrale (AC in Figura L2-1) mostra uno stile strutturale paragonabile a quello dell'Adriatico Settentrionale. L'analisi delle linee sismiche ha evidenziato 25 strutture compressive, per una lunghezza complessiva di 366 km, che si scollano su due differenti livelli stratigrafici: uno superficiale, localizzato alla base della successione pliocenica, e uno più profondo, all'interno della successione evaporitica triassica. Sono state inoltre riconosciute 4 strutture con cinematica trascorrente e geometria del piano di faglia sub-verticale, per una lunghezza di 56 km. Tutte le strutture compressive sono *blind thrust* (sovrascorrimenti ciechi), in quanto la loro terminazione superficiale si colloca all'interno della successione pliocenica e non raggiunge il fondo mare. Tuttavia, gli orizzonti pliocenici e la base del Quaternario mostrano deformazioni a pieghe legate all'attività delle strutture compressive sottostanti. Le strutture compressive sono state quindi suddivise in due categorie: quelle che scollano alla base delle successioni silicoclastiche e quelle che si radicano nei carbonati. I *thrust* radicati nei carbonati mesozoici mostrano occasionalmente l'associazione con strutture tipo *back-thrust* (retroscorrimenti) a vergenza occidentale.

La sismicità strumentale registrata nell'area tra il 2005 ed il 2015 è sparsa e mostra magnitudo < 3.4. Le profondità variano tra 0 e 46 km; tuttavia, oltre il 30% della sismicità è collocato nei primi 10 km, mentre una seconda distribuzione importante (circa il 20%) si rinvia a circa 30 km di profondità.

L'Adriatico Meridionale (BR in Figura L2-1) si colloca all'interno di un'area di avampaese (Piattaforma Apula) del sistema orogenico appenninico. Sono stati interpretati e mappati l'orizzonte del tetto del Messiniano e quello al tetto dei depositi carbonatici cretacei; quest'ultimo rappresenta l'orizzonte più profondo individuabile dai dati sismici a disposizione. I rigetti che dislocano questo orizzonte rappresentano elementi di natura tettonica o paleo-morfologica legati all'evoluzione mesozoica della stessa formazione, del tutto suturati dalla sedimentazione successiva e, ad oggi, non attivi nell'attuale contesto di avampaese. Pertanto, il margine della Piattaforma Apula appare come elemento passivo già a partire dal Giurassico medio. L'orizzonte tetto del Messiniano mostra una generale continuità su tutta l'area di interesse ed è dislocato da due faglie dirette coniugate, orientate ONO-ESE, a cui è associato un rigetto minimo. Non sono pertanto state riconosciute faglie potenzialmente sismogeniche all'interno di tale area di studio.

Inoltre, dall'analisi della sismicità storica e strumentale è emersa l'assenza di eventi rilevanti.

La Calabria Ionica (KR in Figura L2-1) si colloca in un settore dell'orogene appenninico caratterizzato dal passaggio tra la zona di subduzione calabrese e le aree di collisione continentale con il margine apulo. L'area risulta interessata da una tettonica polifasica, che riflette i vari stadi di evoluzione della subduzione della crosta ionica e la successiva collisione continentale con il margine apulo. L'elemento strutturale dominante consiste in un cuneo di accrezione che si estende nel Mar Ionio fino alla latitudine di Malta. L'analisi delle linee sismiche interpretate ha permesso di riconoscere strutture compressive databili al Miocene e al Pliocene, e distensive/transensive ascrivibili al Pleistocene. Le strutture compressive sono sia legate all'impilamento delle unità tettoniche del cuneo di accrezione (sovrascorrimenti) sia a strutture di tipo *pop-up* (combinazione di scorrimenti e retroscorrimenti), probabilmente connesse alle fasi tettoniche transpressive. Le strutture principali consistono in *thrust* che non dislocano la discordanza zancleana (Pliocene inferiore). Tali strutture si inseriscono in un contesto più generale in cui si evidenziano sollevamenti attivi durante il Pleistocene superiore e l'Olocene. Le strutture che mostrano evidenze di attività nel Plio-Pleistocene sono legate ad elementi estensionali/transensivi che tagliano i precedenti elementi compressivi. Complessivamente, le strutture di maggior interesse che sono state mappate sono: 2 *thrust* superficiali, per una lunghezza totale di 53 km, 5 *thrust* al di sotto della discordanza zancleana, per una lunghezza totale di 102 km, e un elemento trascorrente di 35 km di lunghezza.

L'analisi della sismicità, basata sui dati offshore dal 2005 al 2015 rilocalizzati da Anselmi et al. (2018), ha permesso l'identificazione di pochi eventi (23) con magnitudo compresa tra 1.3 e 3.6, con un picco per eventi di magnitudo 3, e profondità che varia tra 6 e 30 km. Complessivamente il 40% della sismicità è collocato tra 5 e 10 km di profondità, mentre il restante 60% è collocato tra i 20 ed i 30 km.

Il Canale di Sicilia (CS in Figura L2-1) ricade, nel quadro geodinamico del Mediterraneo Centrale, all'interno della porzione più settentrionale dell'avampaese africano, il cui assetto strutturale attuale è dominato dal processo di collisione continentale neogenica con la placca europea. All'interno di questa area di studio sono state mappate 24 faglie principali, per una lunghezza complessiva di 844 km.

In particolare, il settore più orientale (offshore di Pozzallo) è dominato dalla prosecuzione offshore della Linea di Scicli, qui caratterizzata a terra da diversi segmenti di faglia con cinematica di tipo trascorrente (Grasso et al., 2000; Figura L1-2A); complessivamente, essa si estende in direzione NNE-SSO per oltre 65 km ed è stata indentificata fino a oltre 10 km di profondità, producendo strutture a fiore che si estendono lateralmente anche per oltre 10 km. Alcuni segmenti di faglia orientati NE-SO, lunghi poche decine di km e identificati fino a profondità di circa 8 km, convergono verso la prosecuzione offshore della Linea di Scicli e si estendono nelle aree emerse, dove sono stati definiti come probabili sorgenti sismogeniche (Azzaro e Barbano, 2000).

Il settore occidentale (offshore di Gela) è invece contraddistinto dal fronte più avanzato della Falda di Gela e da un sistema di faglie generalmente distensive, localmente riattivate in compressione. Queste sono orientate circa NO-SE nelle porzioni occidentali e ENE-OSO in quelle orientali, e interessano l'intera successione mesozoico-miocenica fino all'orizzonte corrispondente al tetto del Messiniano. La successione plio-quadernaria non mostra, in genere, evidenze di tettonica attiva ascrivibile alle suddette faglie, ma solo rare strutture superficiali di minore entità. Le uniche deformazioni a fondo mare, oltre a quelle legate a locali fenomeni franosi e/o erosivo-deposizionali, sono riconducibili a fenomeni di compattazione differenziale dei sedimenti in corrispondenza dei rigetti maggiori dell'orizzonte tetto del Messiniano.

L'analisi della sismicità locale, relativa al periodo 1981-2017, ha permesso di identificare circa 1600 eventi con magnitudo compresa tra 0.4 e 4.5. La sismicità risulta confinata nei primi 30 km di profondità, con pochi eventi localizzati al di sotto di tale limite. In particolare, sono state evidenziate due sequenze sismiche che hanno interessato l'offshore di Pozzallo nell'ottobre del 1990 e nel dicembre del 2017, che indicano movimenti prevalentemente di tipo trascorrente sinistro lungo piani sub-paralleli alla prosecuzione offshore della Linea di Scicli. Il Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (Guidoboni et al., 2018) non riporta alcun evento nell'intera area di studio.

#### *Caratterizzazione dell'attività delle faglie potenzialmente sismogeniche identificate*

La caratterizzazione della possibile attività delle strutture tettoniche identificate è stata condotta dall'INGV utilizzando tre diversi metodi: calcolo della propensione al movimento (*slip tendency*; Morris et al., 1996; Neves et al., 2009), calcolo dei tassi di movimento di lungo termine, calcolo dei tassi di sismicità.

La propensione al movimento delle faglie all'interno dei campi di sforzi a cui sono sottoposte attualmente è rappresentata da un valore compreso tra 0 e 1; al crescere di tale valore aumenta la probabilità che si abbia movimento lungo la struttura. L'inizio del movimento avviene in genere per valori di *slip tendency* uguali o superiori al coefficiente di attrito statico della roccia (mediamente pari a 0.6; Byerlee, 1978).

Il calcolo di *slip tendency* è fortemente influenzato dal regime tettonico in cui si trova la faglia, dai valori degli assi degli sforzi e dal loro rapporto reciproco. Considerata l'estensione dell'area mappata, il calcolo di *slip tendency* è stato applicato in maniera semplificata a scala regionale, adottando delle assunzioni che permettessero un confronto dei risultati per tutte le aree di studio. I risultati ottenuti costituiscono, quindi, un livello base di conoscenze che rende possibile valutare quali strutture possano essere di interesse per ulteriori approfondimenti e studi specifici. Le aree di studio sono state suddivise in settori più piccoli, all'interno dei quali si può assumere che il regime tettonico e l'orientazione degli sforzi agenti sia omogenea. Per ogni faglia ricadente in ogni settore sono stati calcolati i valori di *slip tendency* al variare del

rapporto dei valori tra i tre assi degli sforzi. Nella Tabella L2-1 vengono elencati i risultati di sintesi in cui è riportato il valore medio di *slip tendency* per ogni settore.

Tabella L2-1 – Sintesi dei risultati dei valori di *slip tendency* media.

Area	Adriatico Settentrionale			Adriatico Centrale			Calabria Ionica		Canale di Sicilia	
Settori	1 - Nord	2 - Centro	3 - Sud	1 - Nord	2 - Centro	3 - Sud	1		1 - Gela	2 - Scicli
Regime tettonico	C	C	C	C	C	T	C	T	C	T
Slip tendency	0.56	0.55	0.59	0.54	0.45	0.50	0.36	0.38	0.29	0.43
Deviazione standard	0.114	0.130	0.088	0.106	0.132	0.124	0.190	0.221	0.067	0.155

C – regime compressivo, T – regime trascorrente

Il calcolo dei tassi di movimento di lungo termine è stato fatto per una singola struttura nell'ambito del progetto SPOT, per la quale le elaborazioni congiunte dei gruppi di lavoro INGV e CNR-ISMAR lo rendevano possibile. La struttura scelta come esempio si colloca all'interno dell'Adriatico Centrale, a largo di San Benedetto del Tronto; si tratta di una piega anticlinale ben evidente negli orizzonti di sottosuolo mappati sul dato sismico. Sono state studiate le deformazioni registrate da un orizzonte stratigrafico datato con metodi stratigrafici e radiometrici a 800.000 fa (equivalente a quello mostrato in Figura L1-4B), e si è preventivamente tenuto conto dell'effetto della compattazione dei depositi sottostanti. Una volta eliminato l'effetto di compattazione, infatti, la deformazione tettonica residua può essere imputata alle strutture tettoniche presenti nell'area. La procedura di retro-deformazione permette di calcolare l'entità di movimento delle faglie per produrre la deformazione tettonica osservata. Tenendo conto che tale deformazione è successiva alla deposizione dell'orizzonte stesso, si può calcolare il tasso medio di movimento della faglia (o delle faglie) studiate. Nel caso d'esempio sono state analizzate separatamente due strutture, una più superficiale ed una più profonda, che potrebbero aver causato la deformazione osservata, ottenendo un valore di slip rate medio di 0.3 mm/a riferito alla struttura più profonda e 0.4 mm/a per la struttura superficiale negli ultimi 800.000 anni. Tuttavia, non è possibile escludere che entrambe le strutture abbiano contribuito, in parte e con tassi di movimento inferiori, a produrre le deformazioni osservate.

Il terzo metodo utilizzato per la caratterizzazione delle strutture tettoniche è la valutazione dei tassi di sismicità nelle varie aree di studio. A tale scopo è stato utilizzato come dato di partenza il Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15; Rovida et al., 2016), con copertura temporale dal 1000 al 2014 e comprendente un totale di 4584 terremoti con stima della magnitudo momento (Figura L4-2, mappa di sinistra). Il tasso di sismicità è rappresentato da una distribuzione frequenza-magnitudo secondo due modelli, quello Gutenberg–Richter caratteristico e quello Gutenberg–Richter con decadimento graduale, detto *tapered* (Kagan, 2002). Per ottenere delle stime robuste con tale metodo è necessario avere un elevato numero di eventi distribuito su un ampio intervallo di magnitudo nel catalogo dei terremoti. A questo scopo abbiamo definito delle macro-regioni, alla scala di tutta la penisola italiana, per raggruppare la sismicità relativa al medesimo contesto tettonico. Assumendo che la sismicità di lungo termine possa avere una distribuzione circa uniforme in tutta l'area su cui si è basato il calcolo, si può ottenere il tasso annuale di sismicità ancorando le distribuzioni modellate alla distribuzione di sismicità osservata nella singola area di studio. Le aree di studio che si trovano a cavallo tra regioni caratterizzate da strutture tettoniche diverse sono state suddivise e trattate separatamente. Le distribuzioni frequenza-magnitudo così ottenute sono mostrate nei grafici di destra della Figura L2-2.

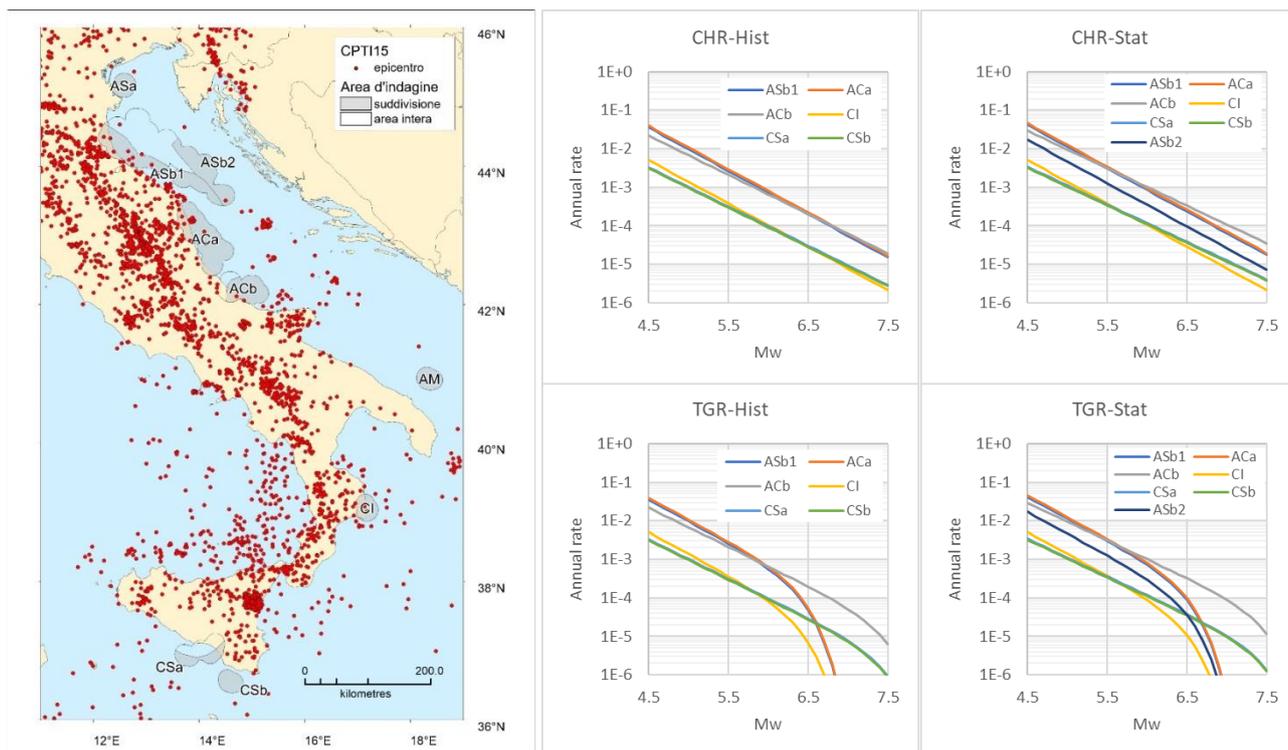


Figura L2-2 – A sinistra, mappa della sismicità dal catalogo CPT115 (Rovida et al., 2016) con l’indicazione delle aree di indagine. Le aree di studio sono identificate con le seguenti sigle: AS, Adriatico Settentrionale; AC, Adriatico Centrale; AM, Adriatico Meridionale; CI, Calabria Ionica, CS, Canale di Sicilia. Le suddivisioni ulteriori, mostrate in mappa in grigio, sono identificate con lettere minuscole e numeri. A destra, diagrammi della distribuzione frequenza-magnitudo cumulativa, per magnitudo uguale o maggiore a 4.5, nelle varie aree di studio, o loro suddivisioni, nelle sue varianti caratteristica (CHR) e tapered (TGR), ottenute per l’analisi di completezza storica (Hist) e statistica (Stat). La distribuzione ASb2 viene mostrata solo per la versione con completezza statistica. Nei grafici, le distribuzioni CSa e CSb sono quasi completamente coincidenti.

### Scenari e loro caratteristiche

Nelle analisi di pericolosità, l’utilizzo degli scenari è molto diffuso come strumento complementare alle analisi probabilistiche. Queste ultime cercano di esplorare completamente il campo di variabilità di un fenomeno, mentre gli scenari esplorano alcuni aspetti particolari di un fenomeno in condizioni specificate.

In questo progetto si è convenuto di realizzare undici scenari (Figura L2-3) che si ritiene possano rappresentare eventi “tipo” della sismicità naturale in prossimità dei pozzi produttivi oggetto di questo studio (Figura 1). Tali scenari sono distribuiti su tutte le aree di studio, comprendendo sia casi nel campo vicino, sia casi nel campo lontano rispetto ai siti di interesse posti sulla costa. Essi sono stati inoltre individuati per rappresentare la variabilità dei contesti tettonici interessati e dei possibili meccanismi di rottura, coerentemente con i meccanismi delle faglie studiate nel progetto. Viceversa, la magnitudo momento ( $M_w$ ) del terremoto di scenario è stata prefissata e posta pari a 6.5 per tutti gli scenari, al fine di poter effettuare dei confronti tra scenari a partire dallo stesso quantitativo di energia rilasciata. Le dimensioni delle rotture (lunghezza, larghezza e spostamento), sono state fissate sulla base dei valori attesi da relazioni di scala in ragione della magnitudo prefissata, del contesto tettonico e del meccanismo di rottura (Leonard, 2014). I parametri così ottenuti costituiscono il dato di ingresso per stimare lo scuotimento utilizzando delle leggi di attenuazione e per effettuare le simulazioni numeriche per gli tsunami.

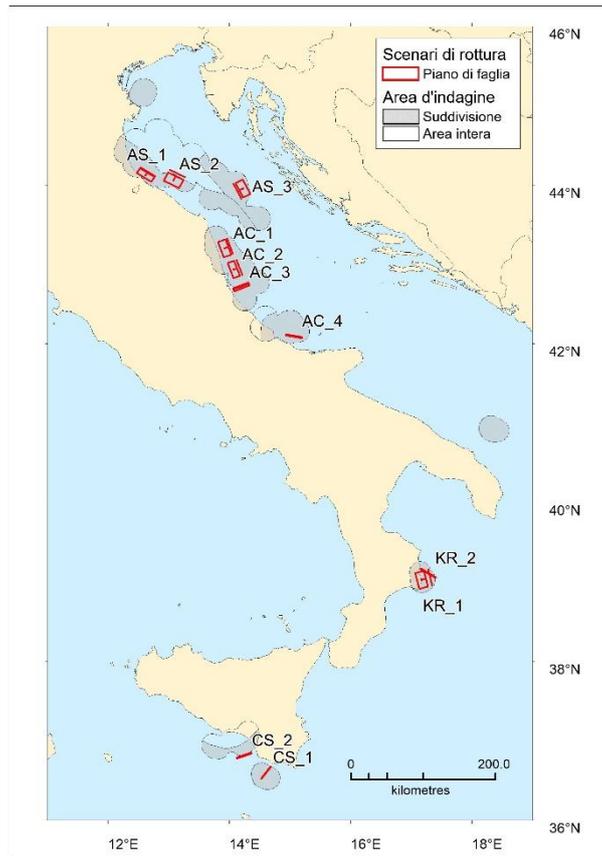


Figura L2-3 – Mappa generale delle rotture (faglie a geometria planare rettangolare) per gli scenari di scuotimento e di tsunami in relazione alle aree d’indagine. I parametri dei singoli scenari sono riportati in Tabella L2-2.

La Tabella L2-2 mostra i valori dei parametri dei piani di rottura cosismica (Figura L2-3) che costituiscono il dato d’ingresso per gli scenari. Per ogni piano di rottura sono anche mostrate le stime di *slip tendency* medie, ottenute campionando i valori dell’area di rottura sulla faglia a cui essa è associata. Questi valori non determinano in assoluto la possibilità che uno scenario possa verificarsi, ma misurano la propensione di ogni singola faglia a riattivarsi. Essi quindi rappresentano la stima di una delle cause che concorrono alla riattivazione. Valori bassi di *slip tendency* non significano che il verificarsi dello scenario sia impossibile, ma solo che il contributo di tale fattore è più basso rispetto agli altri casi analizzati. Viceversa, un valore di *slip tendency* alto consente ragionevolmente di ritenere che la riattivazione possa avvenire con un contributo inferiore di altri fattori.

La scelta di una singola magnitudo prefissata comporta che ci si possa attendere una diversa frequenza di accadimento degli scenari nelle diverse aree. Il tasso di sismicità di lungo termine, assunto come stazionario, è rappresentato dalla distribuzione frequenza-magnitudo nelle varie aree d’indagine (Figura L2-2) ed è la base su cui abbiamo stimato la frequenza relativa degli scenari secondo due alternative (Tabella L2-2): (i) che la magnitudo dello scenario venga superata; (ii) che la magnitudo dello scenario sia compresa tra quella prefissata e una appena superiore. Questi valori consentono di valutare la possibilità di accadimento di uno scenario, o gruppi di scenari, rispetto agli altri.

Tabella L2-2 – Parametri dei piani di rottura per gli scenari di scuotimento e tsunami (le sigle sono le medesime di Figura L2-3). I valori di latitudine (Lat), longitudine (Lon) e profondità (*depth*) sono riferiti al baricentro del piano di rottura. L: lunghezza, W: larghezza, D: spostamento. Sl. T.: *slip tendency*. Stress R e T: campo di sforzo rispettivamente per meccanismo inverso e trascorrente. I valori riportati nelle sei colonne di destra rappresentano la frequenza annuale normalizzata degli scenari considerati per due casi: magnitudo momento uguale o maggiore a 6.5, e per magnitudo momento compresa tra 6.5 e 6.6, ricavate sulla base di due modelli di distribuzione frequenza-magnitudo, CHR: Gutenberg-Richter caratteristica, TGR: Gutenberg-Richter *tapered*, adottando due stime di completezza, Hist:

storica, Stat: statistica. Si tratta quindi di una misura relativa di quanto frequentemente potrebbe verificarsi uno scenario in un'area di studio rispetto a uno scenario in un'altra.

Name	Lat	Lon	Depth (km)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	L (km)	W (km)	D (m)	SI. T. Stress R	SI. T. Stress T	Mw≥6.5				6.5≤Mw≤6.6			
												CHR Hist	CHR Stat	TGR Hist	TGR Stat	CHR Hist	CHR Stat	TGR Hist	TGR Stat
AS_1	44.126	12.618	7.9	123	56	90	22.7	14.1	0.68	0.59	n.d.	0.28	0.23	0.14	0.14	0.29	0.24	0.24	0.22
AS_2	44.059	13.078	5.0	117	25	90	22.7	14.1	0.68	0.53	n.d.								
AS_3	43.933	14.164	7.1	333	40	90	22.7	14.1	0.68	0.57	n.d.	0.00	0.09	0.00	0.06	0.00	0.10	0.00	0.09
AC_1	43.202	13.919	6.6	160	40	90	22.7	14.1	0.68	0.51	n.d.								
AC_2	42.936	14.070	9.9	160	50	90	22.7	14.1	0.68	0.50	n.d.	0.31	0.25	0.15	0.15	0.32	0.27	0.26	0.24
AC_3	42.710	14.199	8.4	68	70	150	22.4	8.2	1.04	0.48	n.d.								
AC_4	42.095	15.065	5.4	100	80	180	22.4	8.2	1.04	n.d.	0.68	0.28	0.32	0.54	0.52	0.27	0.30	0.36	0.35
KR_1	39.028	17.169	6.0	165	25	90	22.7	14.1	0.68	0.26	0.43	0.04	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03
KR_2	39.111	17.280	6.6	120	85	0	25.0	11.2	0.67	0.49	0.31								
CS_1	36.599	14.604	4.2	40	85	350	22.4	8.2	1.04	n.d.	0.29	0.04	0.04	0.08	0.06	0.04	0.03	0.05	0.04
CS_2	36.814	14.244	4.8	72	80	220	22.4	8.2	1.04	0.30	n.d.	0.04	0.04	0.08	0.06	0.04	0.03	0.05	0.04

**Linea di ricerca 3. Identificazione di frane sottomarine e instabilità di sedimenti lungo i margini continentali, che possano essere attivati da scuotimento sismico generato dalle faglie sismogeniche**

Attraverso l'analisi dei dati morfobatimetrici e di sismica a riflessione ad alta risoluzione, sono state riconosciute diverse evidenze di trasporto di massa lungo le scarpate continentali, ma solo su due aree si è concentrato lo studio della pericolosità legata a frane sottomarine capaci di generare maremoti, e cioè il Bacino di Gela (area di studio del Canale di Sicilia) e la zona a mare di Capo Rizzuto (area di studio nell'immediato offshore della Calabria ionica; Figura L3-1). Queste due aree coincidono con quelle dove si è riscontrata la presenza sia di frane sottomarine sia di faglie potenzialmente sismogeniche. Per ciascuno dei casi in esame è stata infatti calcolata la soglia di accelerazione di picco sufficiente ad attivare la frana ed è stata confrontata con l'accelerazione calcolata sulla base degli scenari di rottura sismica identificati nel progetto.

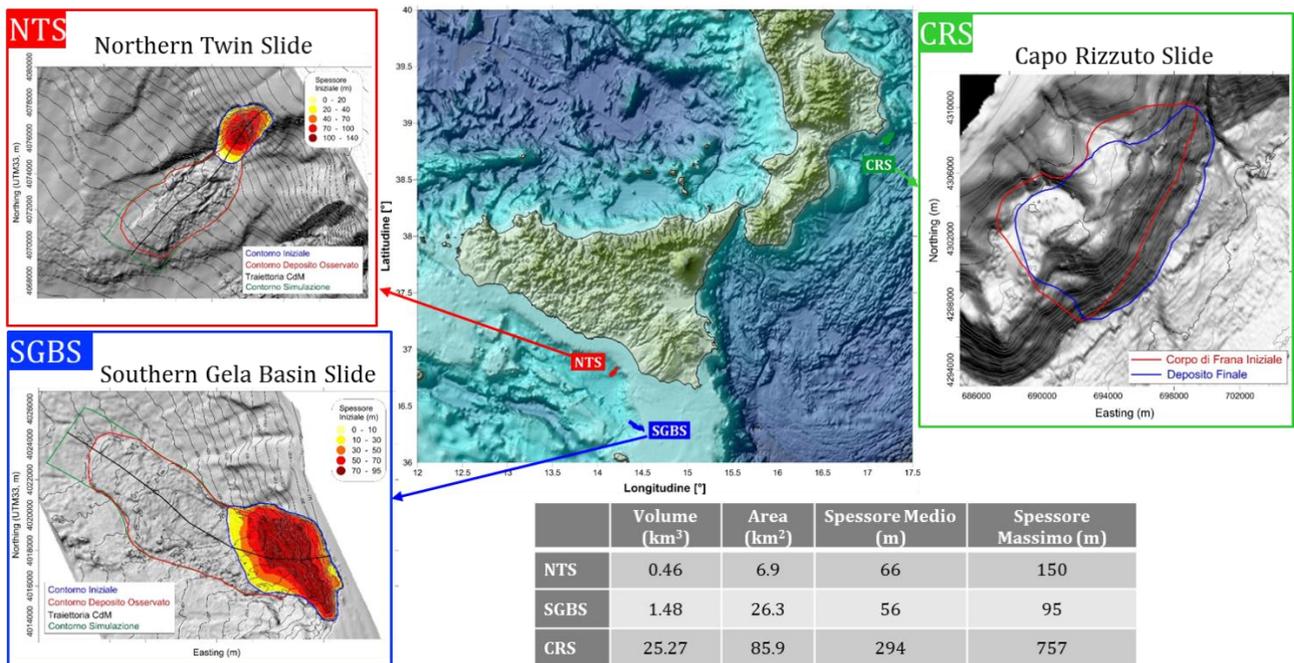


Figura L3-1 – Mappe di ubicazione e parametri dimensionali di ciascuna delle tre frane studiate e modellate per la loro capacità di generare onde di maremoto.

Nel Bacino di Gela, in parte sul fronte della Falda di Gela e circa a sud del pozzo Panda, è presente una grande frana messa in posto nel tardo Pleistocene e non più attiva, con una nicchia di distacco lunga più di 50 km e uno spessore di sedimenti di circa 700 m (Trincardi e Argnani, 1990; Figura L1-1A). La scarpata continentale del Bacino di Gela, invece, presenta numerosi e più recenti corpi di frana. La Northern Twin Slide (NTS) è la più grande di due frane adiacenti, verificatesi nelle ultime migliaia di anni (Minisini et al., 2007; Minisini e Trincardi, 2009), ultimi episodi di una sequenza il cui inizio viene datato circa 87.000 anni fa (Kuhlmann et al., 2017). Nel settore sud-orientale del Bacino di Gela, sono stati identificati 16 depositi di trasporto di massa esposti al fondo mare e 5 sepolti, con una superficie media di 30 km<sup>2</sup>. I 16 depositi esposti a fondo mare (con superficie variabile da 2 a 94 km<sup>2</sup>) sono stati mappati insieme alle loro nicchie di frana, che variano da 1 a 13 km di lunghezza, con una lunghezza media di 5 km. La più grande di queste frane è la Southern Gela Basin Slide, SGBS (Figura L3-2). Le cause di instabilità di pendio non sono necessariamente riconducibili alla sismicità dell'area; si ritiene, infatti, che l'instabilità sia favorita dalla presenza di livelli vulcano-clastici con resistenza al taglio diversa rispetto ai sedimenti circostanti (Kuhlmann et al., 2017) e di corpi sedimentari depositati dalle correnti di fondo, che aumentano il gradiente al ciglio della piattaforma continentale (Gauchery et al., 2019).

Nell'offshore di Capo Rizzuto, Mar Ionio, è stata individuata una possibile frana di grandi dimensioni (Capo Rizzuto Slide-CRS). Sebbene la documentazione della frana resti incompleta a causa della lacunosa copertura dei dati sismici, le sue grandi dimensioni (25 km<sup>3</sup>) la rendono di interesse per la modellazione tsunamigenica.

Per queste due aree, il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna ha elaborato complessivamente tre scenari di maremoto, due per la prima area (-NTS e -SGBS) e uno per la seconda (CRS).

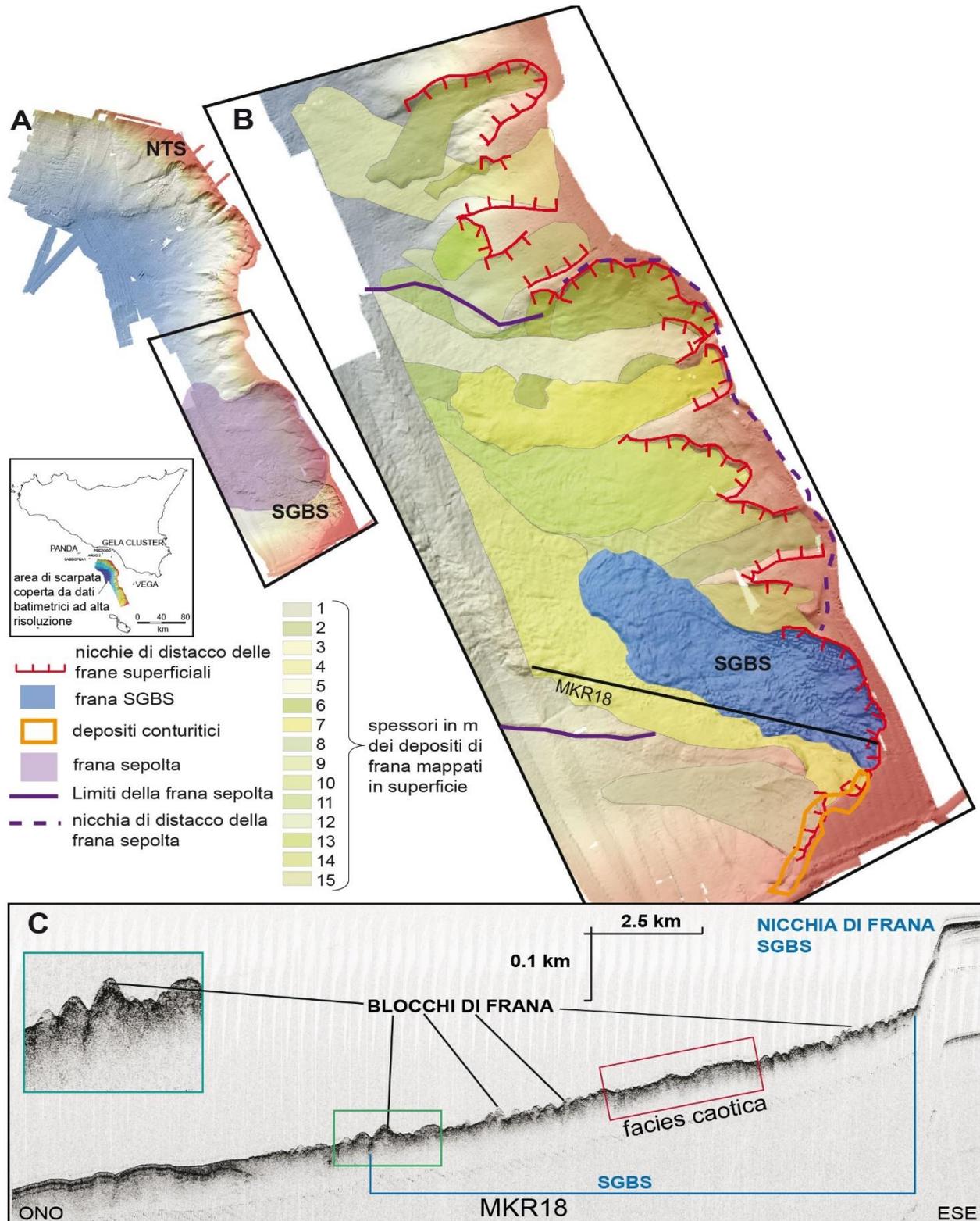


Figura L3-2 – A: area della scarpata del Bacino di Gela interessata da frane sottomarine individuabili grazie ai dati batimetrici multibeam ad alta risoluzione. B: mappatura delle frane nel settore SE della scarpata. C: profilo sismico a riflessione CHIRP attraverso la frana SGBS.

Per l'analisi di stabilità del pendio, senza carico sismico, è stato usato il metodo dell'equilibrio limite, modificato utilizzando il criterio della Minima Deviazione Litostatica (MDL) (Tinti e Manucci, 2006; Paparo e Tinti, 2017). Per l'analisi della stabilità di un pendio sotto carico sismico, le accelerazioni sismiche sono inserite nel modello in modo statico mediante i valori di PGA (*Peak Ground Acceleration*, Accelerazione di Picco al Suolo). Per quanto riguarda la scelta dei valori di PGA, in questo studio si è tenuto conto sia delle

accelerazioni definite nelle Mappe di Pericolosità Sismica italiana (MPS; Meletti e Montaldo, 2007) che delle accelerazioni fornite da EUCENTRE e generate da 4 scenari di rottura identificati da INGV (CS\_01, CS\_02, KR\_01, KR\_02), che si trovano in prossimità dei corpi di frana: NTS, SGBS e CRS. Per ognuno degli scenari è stata quindi analizzata la stabilità con e senza carico sismico (Tabella L3-1).

Tabella L3-1 – Riepilogo delle PGA usate per l’analisi di stabilità delle frane individuate in prossimità della scarpata del Bacino di Gela e al largo di Capo Rizzuto, per gli scenari di rottura associati ad un terremoto di  $M_w = 6.5$ . I valori medi di PGA sono calcolati sul baricentro del corpo di frana prima del crollo.

	PGA		
	NTS	SGBS	CRS
Carico sismico dedotto dalle Mappe di Pericolosità Sismica			
Probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (periodo di ritorno di 475 anni)	0.05	0.05	0.15
Probabilità di eccedenza del 2% in 50 anni (periodo di ritorno di 2475 anni)	0.15	0.10	0.25
Carico sismico definito nel progetto			
Faglia <b>CS_01</b> con $M_w=6.5$	<b>0.05</b>	<b>0.08</b>	
Faglia <b>CS_02</b> con $M_w=6.5$	<b>0.34</b>	<b>0.04</b>	
Faglia <b>KR_01</b> con $M_w=6.5$			<b>0.17</b>
Faglia <b>KR_02</b> con $M_w=6.5$			<b>0.06</b>

Riassumendo, nel caso della frana NTS si ha instabilità solo nel caso di rottura della faglia CS\_02, ma la frana ha possibilità di innesco da carico sismico, anche in base ai valori riportati nella MPS. Nel caso SGBS, le PGA definite nelle MPS e quelle calcolate da EUCENTRE dall’ipotesi di terremoto di  $M_w = 6.5$  lungo la faglia CS\_01, non sono sufficienti a destabilizzare il corpo di frana. Ciò significa che l’innesco della frana potrebbe risiedere in un’altra causa, che non sia quella sismica. Per la frana CRS invece non si ha instabilità per le PGA identificate nel progetto, la sua mobilitazione potrebbe avvenire per un carico sismico maggiore di 6.5.

**Linea di ricerca 4. Modellazione dell’onda di maremoto potenzialmente prodotta dalle frane sottomarine**

L’approccio utilizzato per sviluppare gli scenari di maremoto prevede differenti fasi, che comprendono la generazione della frana, la sua evoluzione, la generazione dell’onda di tsunami o maremoto e la propagazione del maremoto stesso. Nei casi in esame, in primo luogo si è proceduto alla ricostruzione del corpo di frana e della morfologia pre-evento, utilizzando le evidenze batimetriche (nicchie di frana) e i depositi lungo scarpata. Si è poi studiata la stabilità del pendio mediante una variante del metodo dell’Equilibrio Limite (Paparo e Tinti, 2017) e si è ricavata la soglia di PGA sufficiente ad attivare la frana. Nella fase successiva è stato simulato il moto della frana mediante il modello numerico UBO-BLOCK1. Il codice UBO-BLOCK1 calcola il moto della frana, vista come un insieme di blocchi interagenti che si possono deformare conservando tuttavia il volume complessivo (Tinti et al., 1997). Infine, la propagazione del maremoto è stata calcolata con il modello numerico UBO-TSUFDF (metodo alle differenze finite per la risoluzione delle equazioni di Navier-Stokes non lineari in approssimazione di acqua bassa (Tinti e Tonini, 2013), che consente la produzione di mappe di pericolosità sulla base delle altezze massime raggiunte dalle onde lungo la costa.

La modellazione indica che un maremoto ipoteticamente generato dalla frana NTS si propaga e colpisce prima di tutto la costa, in prossimità della città di Santa Croce Camerina, dopo circa 12 minuti dall'innesco della frana; e che, dopo 30 minuti, tutta la costa del Bacino di Gela viene raggiunta dallo tsunami. I valori massimi di elevazione dell'onda a costa indicano che il Golfo di Gela, tra le località di Licata e Santa Croce Camerina, è caratterizzato da valori sempre superiori a 1 m, che si riducono velocemente fino a meno di 0.5 m nel tratto di costa a ovest di Licata, mentre rimangono costanti tra 0.5 m ed 1 m fino a Capo Passero (Figura L4-1A).

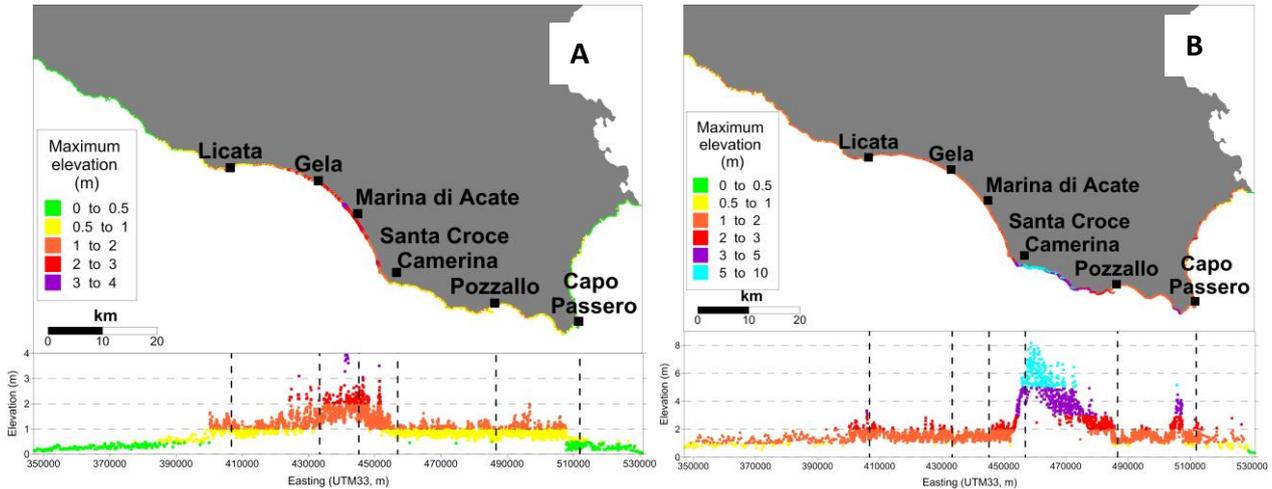


Figura L4-1 – A: massimi valori di elevazione del mare lungo la costa causati dalla messa in posto della frana NTS; e B: della frana SGBS. Le località sono proiettate nel grafico sottostante, dove i valori massimi sono mostrati in funzione della longitudine in coordinate UTM.

La frana SGBS genera un maremoto che colpisce dopo circa 10 minuti l'isola di Gozo nell'arcipelago di Malta, e arriva dopo 20 minuti sulle coste della Sicilia. Dopo circa 30 minuti, tutte le coste dell'arcipelago di Malta sono state colpite mentre le coste siciliane lo sono solo in minima parte. La costa tra Santa Croce Camerina e Pozzallo è quella maggiormente colpita, con valori superiori ai 4 m presso il primo dei due insediamenti (Figura L4-1B). Il Golfo di Gela presenta valori generalmente compresi nella fascia tra 1 e 2 m, con solo alcuni valori superiori, in particolare vicino a Licata.

Il maremoto generato dalla frana CRS (Figura L4-2) colpisce prima di tutto la costa di Capo Rizzuto con un primo fronte negativo e, dopo circa 12 minuti dall'innesco della frana, raggiunge Botricello e Crotona. Il grafico a destra nella Figura L4-2 mostra i valori massimi di elevazione delle onde di maremoto lungo la costa, nel tratto di costa tra le città di Capo Rizzuto e Capo Colonna, i cui picchi raggiungono valori superiori a 25 m. In generale, un tratto di costa calabrese di oltre 250 km è mediamente interessato da onde con elevazione massima che si pone nell'intervallo tra 1 e 3 m.

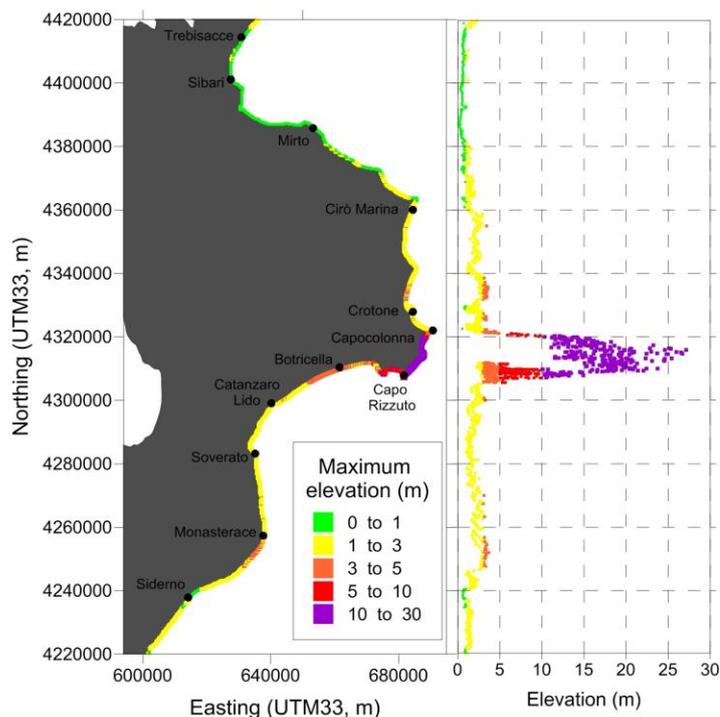


Figura L4-2 – Massimi valori di elevazione del mare lungo la costa causati dalla messa in posto della frana CRS. Il grafico a destra mostra la curva con i valori delle massime elevazioni raggiunte lungo la costa.

**Linea di ricerca 5. Modellazione dell’onda di maremoto potenzialmente prodotta dall’attivazione delle faglie di scenario**

*Modellazione dell’onda di maremoto*

L’INGV ha effettuato simulazioni numeriche relative a 11 scenari di tsunami sismicamente indotti. La modellazione è stata eseguita utilizzando il codice multi-GPU Tsunami-HySEA sviluppato dal gruppo EDANYA (Università di Malaga), che risolve le equazioni di acque basse nella loro approssimazione non-lineare.

I dati di input richiesti dalla simulazione sono la griglia batimetrica e la condizione iniziale per la propagazione dello tsunami, cioè la componente verticale in mare della deformazione cosismica dello scenario.

I dati batimetrici provengono da EMODnet (EMODnet Bathymetry Consortium, 2018) e hanno una risoluzione spaziale di ~ 90 m. Le simulazioni sono state eseguite utilizzando la riflessione pura come condizione al contorno per la parte di griglia corrispondente alla terra; questa condizione viene implementata fissando tutti i valori topografici positivi a un valore significativamente più grande. Le simulazioni degli scenari sono state eseguite considerando due diverse condizioni per la profondità minima del mare (cioè 5 e 10 m).

Per ogni simulazione sono stati estratti i valori delle altezze massime lungo le coste italiane applicando la legge di Green:

$$\frac{\eta_1}{\eta_D} = \left(\frac{H_D}{H_1}\right)^{1/4}$$

dove  $\eta_1$  e  $\eta_D$  sono l’altezza dell’onda di tsunami alle profondità  $H_1 = 1\text{ m}$  e  $H_D$  (5 o 10 m), rispettivamente.

I risultati ottenuti relativamente a questi scenari sono stati utilizzati dal gruppo di ricerca del Consorzio ReLUIS per la stima dell’impatto dell’onda sul costruito. Una stima accurata dell’impatto di uno tsunami necessiterebbe di modellare numericamente la fase di inondazione ad una scala spaziale dell’ordine dei

metri (o poche decine di metri). In assenza di dati topo-batimetrici accurati e con risoluzione sufficiente, di concerto con i colleghi dell'Università di Bologna, si è deciso di applicare il metodo dell'Energy Grade Line (EGL; Kriebel et al., 2017) per la trasformazione dell'altezza dello tsunami sulla linea di costa ( $\eta_1$ ) in altezza (approssimata) della colonna d'acqua alle varie posizioni necessarie per la stima dell'impatto dell'onda sul costruito.

Il metodo dell'EGL prevede l'estrapolazione dell'altezza della colonna d'acqua lungo una serie di profili topografici 1D (da Trieste a San Vito Lo Capo, con una spaziatura di circa 20 m), senza tenere conto, tra le altre cose, di eventuali effetti di amplificazione che potrebbero derivare dalla propagazione 2D. Per considerare in modo speditivo i possibili effetti di focalizzazione dell'energia dello tsunami a terra, i valori di  $\eta_1$  per questa analisi sono stati quindi ulteriormente amplificati, moltiplicandoli per un fattore 2 (es.: Figura L5-1).

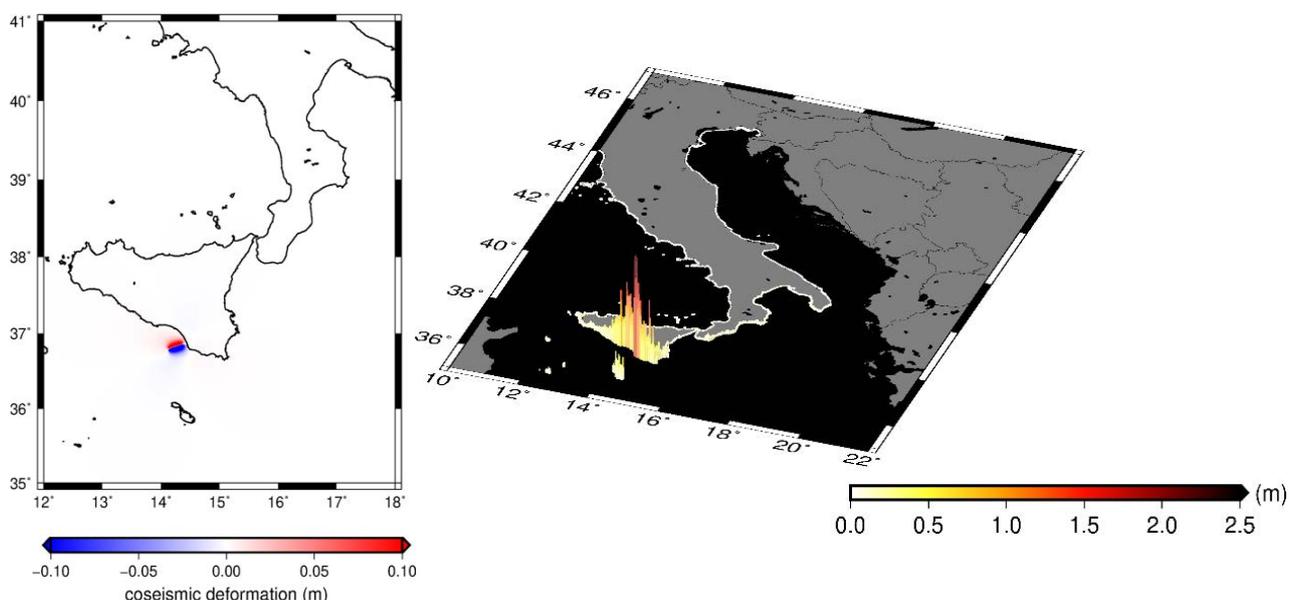


Figura L5-1 – Deformazione cosismica del fondo del mare e altezze massime dello tsunami stimate lungo le coste italiane associate allo scenario CS\_2 (Fig. L4-1, Tabella L2-2). La profondità minima del mare adottata in questo scenario è 5 m.

**Linea di ricerca 6. Modellazione di scenari di danno su strutture e infrastrutture costiere, e conseguenti perdite, dovute ai terremoti generati dalle faglie di scenario (incluso webGIS dedicato)**

La fondazione EUCENTRE si è occupata di definire gli scenari di danno sulle strutture e infrastrutture della costa derivanti dall'innesco di faglie nelle aree di estrazione. Gli scenari sono stati generati per aree della costa che ricadono entro un raggio di 100 km dalle piattaforme produttive, così come riportato in Figura 1. Il raggio di 100 km è considerato come il massimo raggio di impatto di terremoti anche di magnitudo importante. Una volta identificate le strutture e infrastrutture per le quali calcolare lo scenario di danno ricadenti all'interno dell'area indicata, ne è stata quantificata la vulnerabilità sismica, cioè la loro propensione a danneggiarsi se soggette a scuotimento sismico. Tale obiettivo è stato raggiunto assegnando ad ogni struttura/infrastruttura un set di curve di fragilità. Nota la vulnerabilità, è stato necessario quantificare lo scenario di scuotimento rappresentativo per gli eventi innescati. Sono state poi selezionate le relazioni di attenuazione del moto sismico da implementare ed è stato sviluppato un tool per il calcolo dell'accelerazione al sito risentita dalle strutture/infrastrutture in seguito all'attivazione delle faglie identificate da INGV. Infine, è stato creato un WebGIS che consente di georeferenziare i dati delle strutture/infrastrutture esposte, le sorgenti degli eventi e visualizzare su mappa e in tabelle gli scenari di

danno calcolati. In Figura L6-1 è mostrato lo schema seguito per il calcolo dello scenario di danno e per la pubblicazione dei dati di input e di output sul WebGIS.

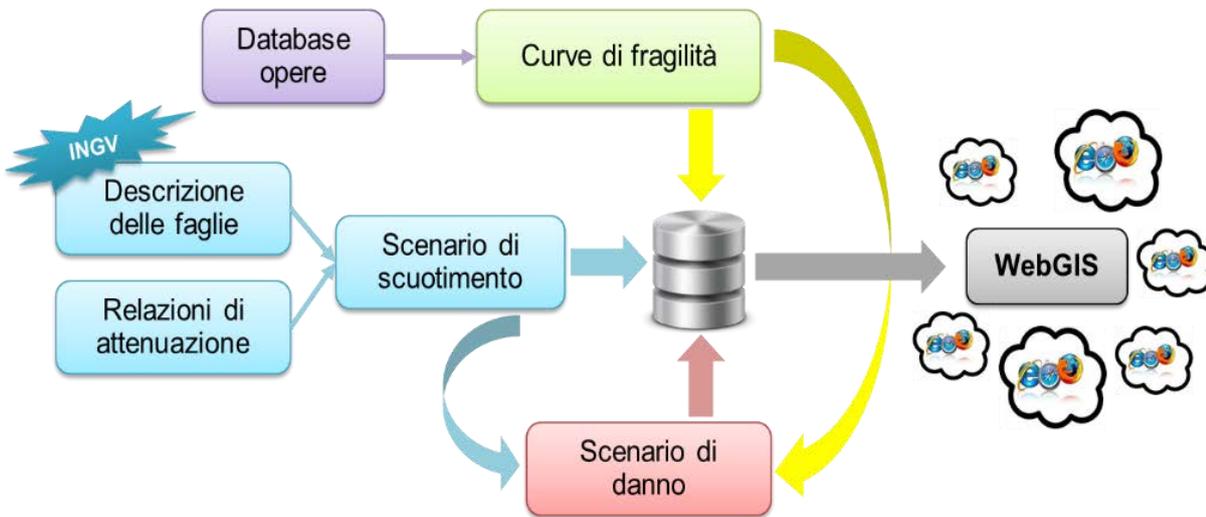


Figura L6-1 – Schema per il calcolo dello scenario di danno.

#### Descrizione della base dati

La base dati è composta dalle strutture e infrastrutture identificate all'interno dell'area di studio. Sono stati presi in considerazione innanzi tutto gli edifici residenziali presenti in 1563 comuni. Le informazioni su numero di edifici, numero di abitazioni, popolazione e superficie abitativa per ogni comune sono fornite dal database ISTAT 2001. In secondo luogo, sono state prese in considerazione le scuole. Sono stati identificati 11167 edifici scolastici dal Censimento Anagrafe dell'Edilizia Scolastica reperito tramite il MIUR; per 418 scuole sono disponibili anche le schede di verifica sismica di livello 1 e 2. Inoltre, per quanto riguarda le infrastrutture della rete viabilistica, sono stati presi in considerazione 4837 ponti, 11514 opere di sostegno e 286 gallerie. Le informazioni relative ai ponti derivano da ANAS e dalle Schede di verifica sismica di livello 1 e 2 disponibili presso il DPC. Il database sulle opere di sostegno contiene dati parziali di geometria derivanti dalla scheda di accatastamento ANAS. Per le gallerie è nota da ANAS e Autostrade per l'Italia la georeferenziazione e alcune caratteristiche geometriche, mentre la profondità è stata stabilita utilizzando il DEM (*Digital Elevation Model*). Infine le informazioni relative alle opere portuali (banchine, gru, ecc.) derivano dal MIT e dalle autorità portuali. I porti presi in esame sono 55, di cui 47 con livello di conoscenza limitato e 8 per i quali sono disponibili maggiori informazioni.

#### Curve di fragilità adottate

Le curve di fragilità sono relazioni che indicano il danno atteso in una costruzione in funzione di un parametro di intensità sismica (accelerazione di picco, intensità spettrale, intensità macrosismiche), ovvero sono rappresentative della probabilità di superamento di un certo livello di danno al variare dell'input sismico (Whitman et al., 1973). In ascissa esse riportano l'accelerazione di picco al suolo (PGA) al sito in cui si trova la struttura, e in ordinata la probabilità di raggiungere le condizioni che identificano il livello di danno, ad esempio il collasso. Sono state pertanto definite le curve di fragilità da assegnare alle opere prese in considerazione; per alcune opere le curve di fragilità sono state selezionate tra quelle presenti in letteratura, per altre sono state sviluppate dai ricercatori di EUCENTRE. In Tabella L6-1 sono riportate le curve adottate e i relativi livelli di danno.

Tabella L6-1 – Curve di fragilità implementate.

<b>Opera</b>	<b>Livelli di danno</b>	<b>Origine delle curve</b>
Edilizia residenziale	D1, D2, D3, D4, D5	Curve sviluppate da EUCENTRE con la metodologia SP-BELA (Simplified Pushover-Based Earthquake Loss Assessment; Borzi et al., 2008a, 2008b)
Scuole	D1, D2, D3, D4, D5	Curve sviluppate da EUCENTRE con la metodologia SP-BELA (Simplified Pushover-Based Earthquake Loss Assessment; Borzi et al., 2008a, 2008b)
Ponti	Danno, collasso	Curve sviluppate da EUCENTRE in funzione del livello di dettaglio delle informazioni disponibili
Gallerie	Danno lieve, danno moderato, danno grave	Curve sviluppate dall'American Lifelines Alliance (ALA, 2001)
Opere di sostegno	Collasso	Curve sviluppate da EUCENTRE
Banchine	Danno lieve, danno moderato, danno esteso, danno completo	Curve sviluppate da EUCENTRE (Calabrese e Lai, 2013; 2016)
Gru - Carico/Scarico Merci	Danno lieve, danno moderato, danno esteso/completo	HAZUS (NIBS, 2004)
Rifornimento carburante	Danno lieve, danno moderato, danno esteso, danno completo	SRM-LIFE (2007)
Cabine elettriche	Danno lieve, danno moderato, danno esteso, danno completo	HAZUS (NIBS, 2004)
Linee elettriche	Danno lieve, danno moderato, danno esteso, danno completo	HAZUS (NIBS, 2004)

### *Input sismico*

Gli scenari di danno sono stati elaborati considerando come input sismico le faglie identificate e descritte nella 'Linea di ricerca 2'. Le faglie selezionate, riproposte in Figura L6-2, sono 11, situate in 4 Aree di Studio: 3 faglie nell'Adriatico Settentrionale (AS), 4 faglie nell'Adriatico Centrale (AC), 2 faglie nel Crotonese (KR) e 2 faglie nel Canale di Sicilia (CS). La magnitudo momento ( $M_w$ ) assegnata a tutte le faglie, come già detto, è pari a 6.5.

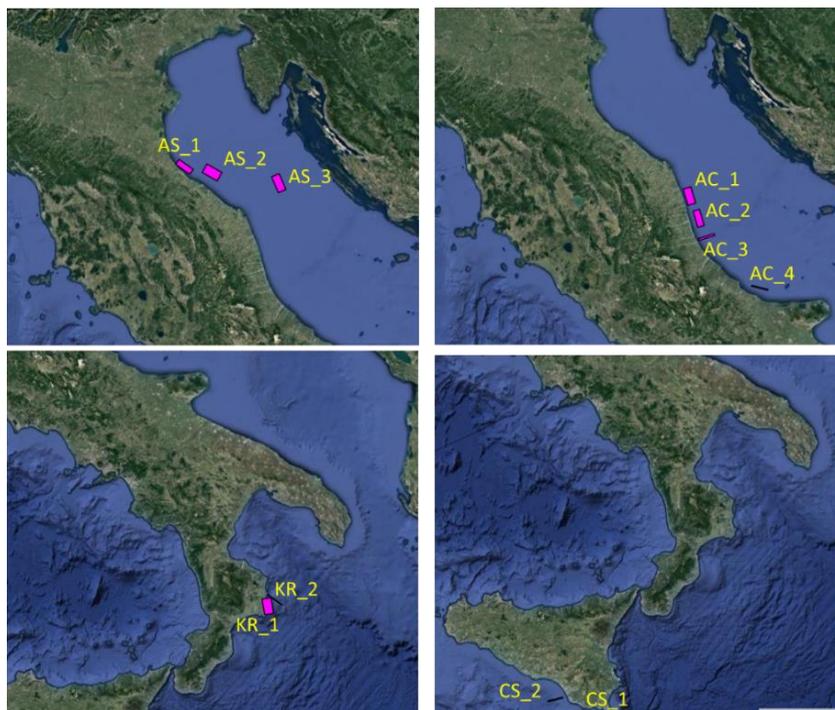


Figura L6-2 – Faglie utilizzate per il calcolo degli scenari di danno.

### Scenari di danno

Il rischio viene definito per un territorio o per una popolazione di elementi, edifici, persone e beni considerando i danni che possono derivare dal verificarsi di eventi calamitosi di origine naturale o antropica. Il rischio sismico è determinato da una combinazione della pericolosità (input sismico), della vulnerabilità (rappresentata ad esempio dalle curve di fragilità) e dell'esposizione (numero di persone, valore dei beni esposti, etc.) ed è una misura delle perdite che ci si può attendere in un dato intervallo di tempo. Nel caso in cui la pericolosità sismica sia rappresentata da un singolo terremoto, anziché da un modello di pericolosità, si parla di scenario di evento, e conseguentemente di danno e di perdite ad esso condizionate. Nel progetto SPOT sono stati calcolati 11 scenari di danno, in relazione alle 11 faglie descritte in precedenza, per tutte le opere prese in considerazione. Gli scenari sono stati calcolati sia in termini di probabilità di danno sia, come vedremo più avanti limitatamente al caso dell'edilizia residenziale, in termini di impatto e di perdite.

La probabilità di danno rappresenta la probabilità di raggiungere un determinato livello di danno dato un certo input sismico. La probabilità di danno può essere letta direttamente sulla curva di fragilità entrando in ascissa con la PGA al sito. Tale PGA è stata calcolata con tre diverse relazioni di attenuazione: Akkar e Bommer (2010), Boore e Atkinson (2008) e Bindi et al. (2011). Queste relazioni non prendono in considerazione la profondità della faglia, in quanto attenuano il parametro considerato in funzione della distanza dai bordi della proiezione in superficie della faglia stessa. Il calcolo della probabilità di danno è stato poi svolto solo per gli elementi (edifici, ponti, ecc.) che si trovano ad una distanza dalla sorgente sismogenica tale da risentire della scossa di terremoto. Si ipotizza che le strutture prese in considerazione subiscano danni per accelerazioni maggiori o uguali al 7% di g (accelerazione di gravità) corrispondente, secondo la relazione di Margottini et al. (1992), ad un'intensità macrosismica pari al grado 5 MCS. Gli elementi che si trovano ad una distanza tale per cui l'accelerazione calcolata con la relazione di attenuazione è minore di 0.07g non vengono presi in considerazione nello scenario di danno. Sul WebGIS si è scelto di visualizzare solo lo scenario medio derivante dalle tre relazioni di attenuazione.

Per l'edilizia residenziale sono state fatte ulteriori elaborazioni: gli scenari sono stati formulati, infatti, anche in termini di impatto e di perdite. Con il termine impatto si vuole indicare numero di edifici, % edifici, numero abitazioni, % abitazioni e superficie (*agibili*, *danneggiati* e *inagibili*) e la popolazione interessata dall'evento. La relazione tra livelli di danno ed impatto utilizzata in questo progetto deriva dall'analisi del database di danno osservato per il terremoto di de L'Aquila del 2009 (Sabetta et al., 2013). Il database ha richiesto una preventiva elaborazione, svolta in precedenza dal CNR-ITC de L'Aquila. Il rapporto ottenuto, in grado di ottimizzare sull'intero database la correlazione esito-danno, è il seguente:

- Agibili:  $D0+0.646 \cdot D1$
- Danneggiati:  $0.354 \cdot D1+0.184 \cdot (D2+D3)$
- Inagibili:  $0.816 \cdot (D2+D3)+D4+D5$

Oltre al calcolo delle probabilità di danno e dell'impatto, per l'edilizia residenziale sono state calcolate anche le perdite in termini economici e di vite umane. I parametri utilizzati per il calcolo delle perdite sono stati condivisi con ReLUIS che, analogamente a quanto fatto da EUCENTRE, li ha utilizzati per il calcolo delle perdite economiche relative agli scenari di danno da tsunami.

Le perdite in termini di vittime e feriti vengono calcolate a partire dalla popolazione che risiede in edifici che hanno raggiunto il livello di danno D4 e D5. In particolare, per il calcolo delle vittime e dei feriti si utilizzano le percentuali riportate in Tabella L6-2.

Tabella L6-2 – Parametri per il calcolo delle vittime e dei feriti.

Livello di danno (scala EMS, Grünthal 1998)	Descrizione	Vittime	Feriti
D1	Danno da trascurabile a lieve	0%	0%
D2	Danno moderato	0%	0%
D3	Danno da notevole a grave	0%	0%
D4	Danno severo	1%	5%
D5	Collasso	10%	30%

Per il calcolo delle perdite economiche si è fissato un costo di ricostruzione al mq pari a 1500 Euro per tutta Italia. In Tabella L6-3 sono mostrate le percentuali del costo al mq da applicare alle superfici degli edifici che raggiungono i diversi livelli di danno da D1 a D5.

Tabella L6-3 – Parametri per il calcolo delle perdite economiche.

Livello di danno	Costo di ricostruzione
D1	10%
D2	30%
D3	60%
D4	100%
D5	100%

### Scenari calcolati e considerazioni

Sulla base di tutte le assunzioni fatte, sono stati calcolati gli scenari di danno e le perdite conseguenti rispetto alle opere selezionate. I risultati sono visualizzabili/scaricabili tramite una piattaforma WebGIS appositamente sviluppata da EUCENTRE con le seguenti funzionalità principali:

- 1) Consentire la visualizzazione su mappa delle strutture esposte al danno;
- 2) Visualizzare, al click sulla struttura di interesse, i dati di esposizione; ad esempio, se si seleziona un comune, viene in automatico compilata una tabella che mostra numero di edifici, abitazioni, popolazione e superficie abitativa presenti nel comune, espressi come numero totale o suddivisi in funzione della classe di vulnerabilità degli edifici;
- 3) Visualizzare su mappa le sorgenti degli eventi ovvero le faglie di scenario identificate da INGV;
- 4) Visualizzare i risultati degli scenari di danno, e le relative perdite, elaborati in termini di mappe e di tabelle e, inoltre, consentire di scaricare lo *shapefile* (file vettoriale georeferenziato) che riporta i risultati dello scenario;
- 5) Consentire all'utente di tematizzare i gli strati informativi relativi agli scenari di danno.

La piattaforma rende fruibili tutti i numerosi risultati ottenuti che, altrimenti, risulterebbero difficilmente consultabili. Un breve sommario di questi risultati, selezionato a titolo di esempio, è riportato nei grafici che seguono. Nel grafico di Figura L6-3 è riportato il numero di edifici residenziali che raggiungono il livello di danno D1, corrispondente al danno lieve, associato ad ogni faglia. In Figura L6-4 è invece mostrato il numero di feriti, calcolati utilizzando le assunzioni riportate in Tabella L6-2. È necessario specificare che gli scenari calcolati, e quindi le relative mappe consultabili sulla piattaforma WebGIS e i grafici qui mostrati, si riferiscono ad eventi ipotetici, associati ad una magnitudo fissata a  $M_w=6.5$ .

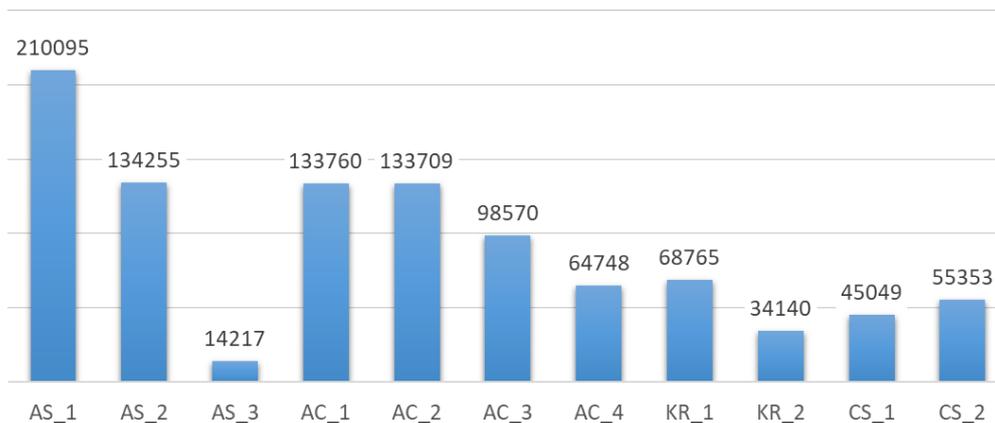


Figura L6-3 – Numero di edifici che raggiungono il livello di danno D1 per ciascuno scenario.



Figura L6-4 – Numero di feriti associati a ciascuno scenario elaborato.

**Linea di ricerca 7. Caratterizzazione della vulnerabilità delle strutture residenziali costiere rispetto all’impatto di un’onda di maremoto**

Nell’ambito del progetto, il Consorzio ReLUIS si è posto come obiettivo l’analisi di scenari di danno, e una prima stima delle perdite conseguenti, per le strutture residenziali in muratura e cemento armato (c.a.) potenzialmente interessate da uno tsunami generato da un evento sismico o da frane sottomarine da esso innescate.

La prima parte dello studio ha previsto un approfondimento della risposta strutturale degli edifici residenziali soggetti ad uno tsunami, a partire da dati presenti in letteratura. In particolare, è stato effettuato uno studio storico sui principali eventi dell’ultimo secolo, e dei relativi report esistenti, per indagare le principali tipologie di danni a cui sono soggetti gli edifici nei confronti delle azioni da maremoto.

Dall’analisi delle principali normative di riferimento in ambito internazionale, si individuano due principali approcci, forniti dalle norme statunitensi (FEMA P-646 e ASCE 7-16) e dalle linee guida giapponesi (Fukuyama et al., 2011). In particolare, il primo approccio prevede una distinzione tra le differenti componenti delle azioni che insistono sulla struttura (azioni idrostatiche, idrodinamiche, da impatto di detriti, etc.), e diverse combinazioni e scenari di carico da considerare; il secondo approccio, invece, modella le azioni dello tsunami attraverso un’unica distribuzione idrostatica equivalente, in cui l’altezza dell’onda viene amplificata in modo tale da tener conto indirettamente degli altri contributi (Figura L7-5). Il coefficiente di amplificazione è funzione della presenza o meno di elementi atti alla dissipazione dell’onda in prossimità delle coste, opportunamente progettati e comunemente chiamati *sea walls*; per le coste italiane, data l’assenza di tali opere, è lecito considerare la condizione più gravosa, assumendo il valore massimo per il suddetto coefficiente.

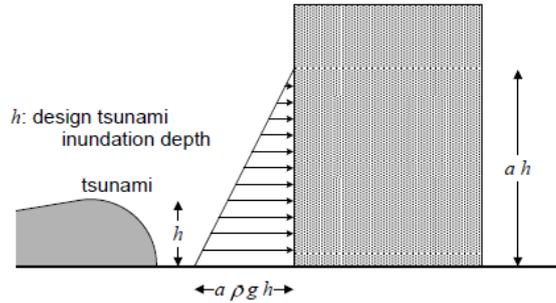


Figura L7-5 – Modellazione dell’azione al piede della struttura con l’approccio fornito dalle linee guida giapponesi.

La principale differenza rispetto all’applicazione dei due approcci consiste nei parametri richiesti per modellare le azioni in esame; in particolare, nelle linee guida giapponesi è sufficiente conoscere la sola altezza dell’onda agente al piede della struttura, mentre le norme americane necessitano della massima altezza dell’onda sull’edificio, della velocità massima dell’onda e del massimo momento di flusso. Tali parametri possono essere valutati attraverso formule semplificate, con apposite mappe di pericolosità o analisi numeriche approfondite. Dunque, l’approccio giapponese può risultare estremamente utile nel caso di analisi su larga scala, come nel caso del progetto SPOT, in cui l’azione dell’onda può essere modellata attraverso un unico parametro.

In letteratura sono presenti diversi studi che propongono curve di fragilità empiriche per edifici soggetti a tsunami al variare dei principali maremoti degli ultimi decenni, quali ad esempio il maremoto che ha colpito Sumatra (Indonesia) nel 2004 o le isole Samoa nel 2009. In particolare, si è focalizzata l’attenzione sugli studi realizzati da Suppasri et al. (2013) poiché i dati empirici presenti in questi studi sono basati su danni osservati relativi a un campione di oltre 250.000 edifici, a differenza di altri studi fondati su campioni molto ridotti. Inoltre, vengono individuati 6 diversi livelli di danneggiamento delle strutture (*Damage State – DS*, paragonabili con i livelli di danno da sisma).

Confrontando le curve empiriche giapponesi per edifici in muratura e c.a. (Figura L7-6), risalta come, per bassi gradi di danneggiamento, la tipologia costruttiva non influisca in maniera significativa sulla risposta strutturale e, di conseguenza, le curve tendano a sovrapporsi. Aumentando il livello di danno sulla struttura, con particolare riferimento al livello DS5 inerente al collasso, si nota come gli edifici in c.a. esibiscano un migliore comportamento rispetto le strutture in muratura.

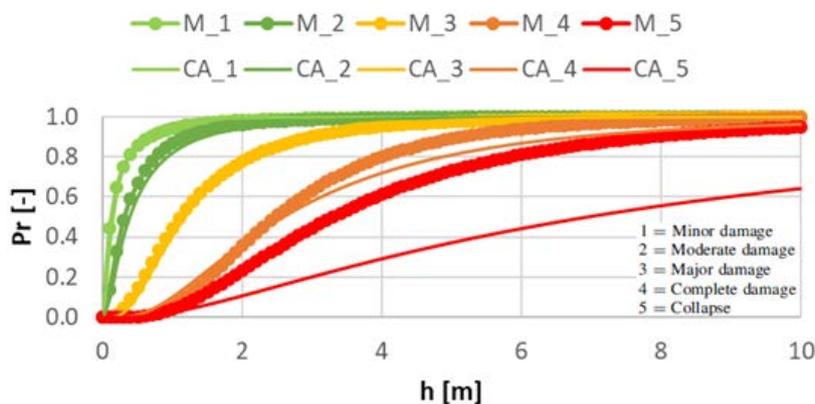


Figura L7-6 – Confronto tra le curve di fragilità empiriche per edifici in muratura e c.a.

Per approfondire la risposta degli edifici soggetti ad azioni da maremoto, sono state effettuate analisi meccaniche a partire dall'individuazione di classi di edifici, in modo da tenere opportunamente conto della variabilità del tessuto edilizio costiero nazionale. Le classi individuate per edifici in muratura e cemento armato si basano principalmente su due parametri: l'altezza dell'edificio e l'epoca di costruzione. Infatti, dagli studi di letteratura si evince in primo luogo che l'altezza dell'edificio influenza la vulnerabilità delle strutture soggette ad azioni da tsunami; in particolare, edifici con un maggiore numero di piani tendono ad essere meno sensibili al danneggiamento causato dall'azione dello tsunami. La distinzione delle classi di vulnerabilità per epoca di costruzione è, invece, relativa al progressivo miglioramento nel tempo delle tecniche costruttive e di progettazione, nonché alla maggiore attenzione posta sui controlli di qualità sui materiali e sulle opere. Altro importante fattore è l'evoluzione della normativa tecnica di riferimento per le costruzioni, e l'evoluzione storica delle zone sismiche sul territorio italiano (che hanno condizionato l'applicazione della normativa antisismica, il cui impatto sull'edificato ha migliorato il comportamento delle strutture alle azioni orizzontali, quindi anche rispetto agli tsunami). Le informazioni sull'edificato costiero nazionale sono state ricavate sulla base del database dell'ISTAT (aggiornato al 2011) il quale, su scala di area censuaria e comunale, classifica gli edifici residenziali in funzione della tipologia costruttiva (muratura, c.a. o altra tipologia), del numero di piani e dell'epoca di costruzione. L'utilizzo di questo database è inoltre coerente con quanto fatto da EUCENTRE per gli scenari di danno rispetto allo scuotimento sismico.

Per la generazione della popolazione di edifici per le classi di edifici individuate, in accordo con EUCENTRE, è stato utilizzato il metodo Monte Carlo sulla base di variabili aleatorie, rappresentanti i parametri geometrici, meccanici e le condizioni di carico necessarie per la progettazione degli edifici. Definiti i modelli degli edifici, sono state effettuate le analisi strutturali, i cui risultati hanno fornito le distribuzioni delle altezze d'inondazione che provocano l'attivazione di ciascun meccanismo di danno individuato, rispettivamente, per edifici in muratura ed in cemento armato, sui quali si è successivamente proceduto alla realizzazione delle curve di fragilità meccaniche.

Al fine di arricchire e migliorare l'accuratezza delle informazioni ricavate dal database dell'ISTAT, sul costruito costiero residenziale, sono state svolte attività di sopralluogo in Calabria. Tali informazioni sono utili per definire più accuratamente i modelli strutturali e l'intensità delle azioni statiche equivalenti dello tsunami, da adottare nelle analisi di vulnerabilità per edifici in c.a. e muratura, per poter valutare in seguito i potenziali danni sulle strutture di un eventuale tsunami nelle aree d'interesse.

In particolare, sulla base dell'area limite d'interesse preliminare condivisa dagli enti partner del progetto, estesa da Brancaleone Marina a Cirò Marina, le zone censuarie d'interesse dei comuni oggetto di studio sono state ricavate attraverso uno studio semplificato preliminare mediante l'utilizzo di un GIS (Geographic Information System).

Nello specifico, è stata ipotizzata un'altezza dell'onda sulla linea di costa uniforme pari a 10 m e si è valutata la relativa area di ingressione (inondazione) adottando una legge d'attenuazione dell'altezza di inondazione in accordo con le linee guida neozelandesi DGL 08-16. Questa legge si fonda sull'ipotesi secondo cui 1 m d'onda invade 200 m di entroterra attraverso una legge lineare di decadimento e immaginando l'orografia del suolo pianeggiante (Figura L7-7). Di conseguenza, immaginando sulla linea di costa un'onda alta 10 m, la massima fascia costiera potenzialmente soggetta a inondazione si estende per 2 km. Intersecando tale dato con le curve di livello topografiche a 5 e 10 m, estratte dal DTM (*Digital Terrain Model*), con risoluzione 75 m fornito dal Geoportale Nazionale, accessibile alla pagina web <http://www.pcn.minambiente.it/mattm/>, è stato possibile individuare, per ogni comune sulla costa, le aree censuarie potenzialmente soggette ad inondazione.

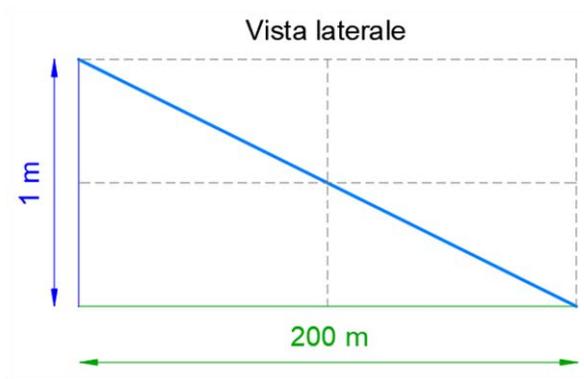


Figura L7-7 – Legge di attenuazione dell'altezza dell'inondazione da maremoto nell'ingressione a terra.

I comuni da esaminare a campione presentano un numero di edifici tale da fornire informazioni rilevanti per il conseguimento degli obiettivi sopra riportati. Tra questi (Figura L7-8), i comuni individuati come oggetto di studio durante i sopralluoghi effettuati negli ultimi mesi del 2017 sono: Squillace, Catanzaro, Roccella Ionica, Grotteria e Crotona. I comuni individuati come oggetto di studio durante i sopralluoghi effettuati ad inizio 2018, sono invece: Bovalino, Ardore Marina, Locri, Monasterace, Isola di Capo Rizzuto (Le Castella), Melissa (Torre Melissa), Cirò Marina.

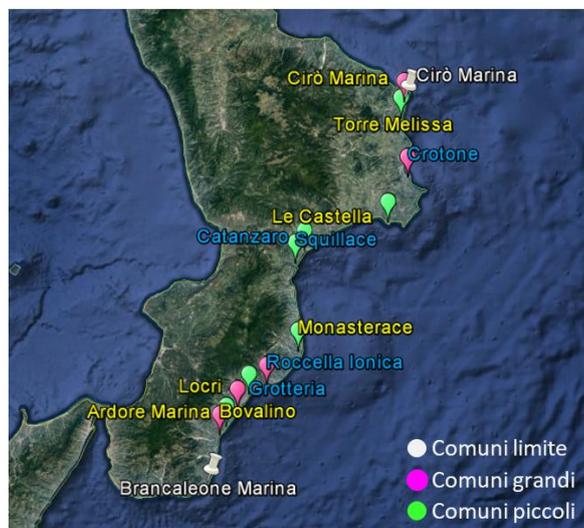


Figura L7-8 – Inquadramento dei comuni oggetto di studio tra novembre 2017 (nomi in celeste) e febbraio 2018 (nomi in giallo).

Sulla base dei sopralluoghi effettuati, analizzando l'affidabilità della rappresentazione delle aree potenzialmente suscettibili di inondazione, ottenute dal DTM sopra menzionato, si riscontra mediamente una buona sovrapposizione. L'unica criticità evidente è stata rilevata nel comune di Crotona, a causa della particolare conformazione della costa e dei continui cambi di pendenza del profilo topografico del terreno; in ogni caso, le zone individuate in sito come possibili aree soggette ad inondazione sono state comunque inglobate nelle aree potenzialmente a rischio definite in precedenza.

Sulla base dei sopralluoghi effettuati, con riferimento al numero totale di edifici, il numero rilevato ben approssima le quantità riportate nel database ISTAT. Tuttavia, gran parte dei comuni investigati durante la prima campagna di indagine è caratterizzata da una forte espansione edilizia, con diverse aree in cui sono visibili edifici di recente costruzione o in fase di realizzazione. Una criticità riscontrata è legata agli edifici ricadenti nella sezione “Altra tipologia” del database ISTAT, a cui appartengono edifici misti: acciaio, legno e qualsiasi struttura non riconducibile a c.a. e muratura. In particolare, da un sopralluogo puramente visivo, può non essere immediato distinguere una struttura mista.

Inoltre, dai sopralluoghi si evince l’elevata aleatorietà del fenomeno modellato; in particolare, i parametri caratterizzanti l’onda (altezza, velocità e momento di flusso) sono fortemente influenzati dalla variabilità del comune indagato, dalle geometrie degli edifici, dall’eventuale presenza di muri divisorii ed aree boschive, oltre che dalla topografia dell’area indagata e dalla batimetria del mare prospiciente.

***Linea di ricerca 8. Modellazione di scenari di danno su strutture residenziali costiere, e conseguenti perdite, dovuti ai maremoti sopra menzionati***

Sulla base della conoscenza acquisita dall’analisi dello stato dell’arte, si è proceduto all’elaborazione degli scenari di danno sulla base delle curve di fragilità empiriche precedentemente introdotte, attraverso cui è possibile legare la probabilità di superamento di un determinato grado di danneggiamento (DS) ad un solo parametro d’intensità rappresentativo del fenomeno in esame, ovvero l’altezza dell’onda al piede dell’edificio.

Come detto, i dati sull’edificato si basano sui database forniti dall’ISTAT e sono gestiti in ambiente GIS e, data l’elevata mole di dati relativi a tutti i comuni e le aree censuarie del territorio italiano, è nata la necessità di filtrare il database iniziale. Dunque, per tutte le coste oggetto di studio all’interno del progetto, sono state individuate delle aree potenzialmente soggette ad inondazione in caso di tsunami, con riferimento alla linea guida neozelandese DGL 08-16.

L’altezza di riferimento sulla linea di costa è stata posta, per ipotesi, costante lungo tutto il suo sviluppo e assunta con riferimento ai risultati del modello NEAMTHM18 (Basili et al., 2018), considerando lo scenario più sfavorevole. In tali ipotesi si è ottenuto in prossimità delle coste calabre un’altezza della colonna d’acqua di 25 m da cui deriva, in accordo con le linee guida neozelandesi DGL 08-16, una lunghezza d’ingressione massima pari a 5 km.

Le aree individuate sono state discretizzate in reticoli aventi dimensione differente (massimo 50 x 50 m<sup>2</sup> nei centri abitati e 100 x 100 m<sup>2</sup> all’esterno) a seconda che l’area in esame sia interna o meno ad un centro abitato (Figura L8-). In questo modo, si riesce a tener conto della variabilità delle quote altimetriche e della distribuzione degli edifici sul territorio, i cui dati si basano, come detto, sui database prodotti dall’ISTAT con riferimento al censimento del 2011.



Figura L8-1 – Esempio di discretizzazione delle aree censuarie (in verde) in maglie reticolari (in grigio) per il comune di Licata in Sicilia.

Le quote del terreno sono state estrapolate dal DTM avente risoluzione 20 m, disponibile sul Geoportale Nazionale. La congiungente tra il baricentro di ogni reticolo e la linea di costa, cioè la distanza minima tra loro, rappresenta il transetto rispetto cui si sviluppa, per ipotesi, il flusso monodirezionale dell'onda.

L'altezza dell'onda calcolata nel baricentro del reticolo si assume costante all'interno dell'area del reticolo considerato e rappresenta l'altezza al piede del generico edificio presente al suo interno. Tale dato rappresenta un valore di input delle curve di fragilità empiriche precedentemente introdotte e, intrecciando la probabilità di attingimento di un determinato grado di danneggiamento per una specifica altezza d'onda con i dati sull'edificato presente secondo il database ISTAT, è possibile valutare il numero di edifici coinvolti per ogni grado di danneggiamento DS analizzato.

Definite le strutture interessate da un determinato scenario e le relative superfici, i costi legati ai danni sono stati stabiliti in collaborazione con EUCENTRE e sono gli stessi adottati per gli scenari sismici nella Linea di ricerca 6; in particolare, è stato assunto un costo generico di 1500 €/m<sup>2</sup> sui quali, in percentuale, sono valutate le perdite economiche dei singoli DS, ovvero:

- DS1 = 10% di 1500 €/m<sup>2</sup>
- DS2 = 30% di 1500 €/m<sup>2</sup>
- DS3 = 60% di 1500 €/m<sup>2</sup>
- DS4 = 100% di 1500 €/m<sup>2</sup>
- DS5 = 100% di 1500 €/m<sup>2</sup>

Il costo applicato agli edifici interessati esclusivamente da un DS comprende anche la somma dei DS inferiori, per tener conto dei costi legati alle diverse tipologie di danno sulla struttura.

Dunque, sono stati realizzati scenari ipotizzando che l'altezza dell'onda sulla linea di costa si mantenga costante lungo tutto il suo sviluppo fino al limite dell'area di ingressione identificata come detto sopra, insieme a ulteriori scenari con altezze della colonna d'acqua ricavate dalle analisi di simulazione sopra descritte nella 'Linea di attività 4', relativamente alle frane sottomarine sismo-indotte e nella 'Linea di ricerca 5', riguardante gli 11 scenari di attività di faglie sismogeniche offshore. La principale differenza è legata alla legge di attenuazione dell'altezza dell'onda adottata per descriverne l'andamento lungo il transetto rispetto cui si sviluppa il flusso monodirezionale del maremoto. In particolare, per gli scenari con

altezza costante, si è ipotizzato che l'altezza si mantenga costante lungo il transetto e che di conseguenza la profondità di inondazione nel generico reticolo è pari alla differenza netta con la quota altimetrica del punto in esame; mentre per gli scenari derivanti da analisi di simulazioni è stato adottato dall'Università di Bologna e dall'INGV un metodo energetico denominato "Energy Grade Line" (Kriebel et al., 2017), che è riportato nella norma americana ASCE 7-16.

I risultati delle analisi vengono rappresentati nel reticolo in termini di aree inondate e, a livello comunale, provinciale e regionale, in termini di numero di edifici, danni in termini economici e persone coinvolte per ogni grado di danneggiamento considerato. In particolare, sono stati realizzati file vettoriali di tipo *shapefile*, che permettono di associare i dati a poligoni georeferenziati.

Di seguito si riportano alcune rappresentazioni grafiche esemplificative per lo scenario NTS04 (legato ad un maremoto prodotto dall'evento franoso NTS) a scala d'inondazione (

Figura L8-) e comunale (

Figura L8-).

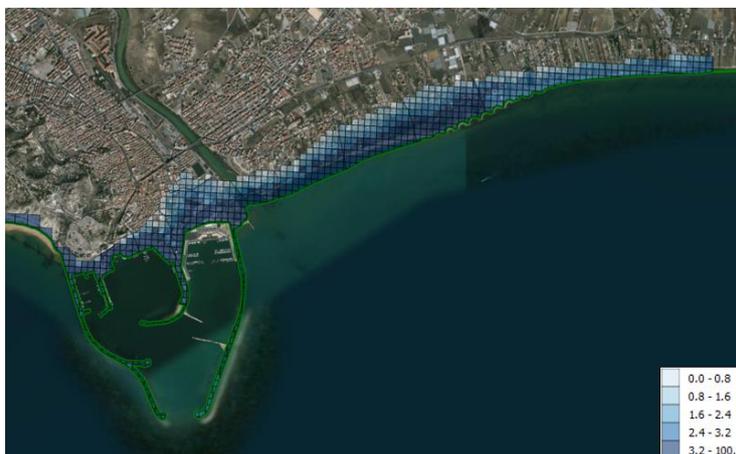


Figura L8-2 – Esempio di inondazione del comune di Licata (Sicilia) per lo scenario NTS04.



Figura L8-3 – Rappresentazione grafica mediante GIS del numero di edifici coinvolti al variare del DS considerato, per un'area della Sicilia, con riferimento allo scenario NTS04.

## Discussione

Il progetto SPOT è partito dalla necessità di svolgere analisi che non si limitassero a singoli casi di studio, ma che, con omogeneità di approccio e di metodologie, coprissero l'intero territorio nazionale nelle parti costiere prospicienti le piattaforme di estrazione di olio e gas in produzione.

Questo approccio regionale, insieme all'azione integrata dei diversi Enti di ricerca, rappresenta l'aspetto innovativo e il punto di forza del progetto. Sebbene i risultati ottenuti, essendo molto estesi ma poco dettagliati, rappresentino solo un primo passo da approfondire ulteriormente, SPOT già fornisce parametri preliminari confrontabili tra le diverse parti del territorio nazionale e costituisce un supporto quantitativo utilizzabile per stabilire, qualora richiesto, delle priorità nelle policy della DGS-UNMIG. Questi risultati permettono, ad esempio, di indirizzare futuri approfondimenti su aree o temi per i quali si ravvisi maggiore interesse.

Ovviamente, la scelta di lavorare ad una scala regionale comporta la necessità di usare dati "poveri", ma disponibili per tutte le aree considerate (per esempio le batimetrie dei fondali, o i dati censuari ISTAT), dati acquisiti per altre finalità (per esempio quelli forniti dalle compagnie petrolifere, per altro non sempre liberamente accessibili), e metodologie semplificate di calcolo. Per questo, i risultati ottenuti hanno una valenza statistica territoriale, ma non possono essere considerati attendibili alla scala di dettaglio di singoli edifici, limitati tratti di costa, o specifiche piattaforme offshore.

Dal punto di vista geologico, l'analisi condotta ha permesso di stabilire la presenza di faglie potenzialmente sismogeniche in molte tra le aree considerate, ma anche di verificarne l'assenza, ad esempio nel Golfo di Trieste e Venezia in Adriatico Settentrionale, in parte dell'Adriatico Centrale e nell'area al largo di Brindisi in Adriatico Meridionale. Le indagini relative all'eventuale attività di tali faglie sono state condotte, per quanto riguarda la parte più superficiale di spessore crostale e il fondale marino, con dati geofisici ad altissima risoluzione, interpretati alla luce delle più avanzate ricostruzioni paleoambientali, sedimentologiche e strutturali disponibili. Ovviamente, la verifica di presenza/assenza di faglie sismogeniche in profondità si riferisce solamente allo spessore di crosta investigato, e non fornisce informazioni sui livelli crostali più profondi.

Come detto, la caratterizzazione dell'attività delle faglie riconosciute è stata svolta a una scala regionale. Tuttavia, è stata anche sperimentata la possibilità di utilizzare la ricostruzione accurata di una superficie stratigrafica datata a 800.000 anni fa per sviluppare una valutazione più approfondita su una struttura tettonica in Adriatico Centrale. Questo approfondimento rappresenta un esempio di come potrebbe essere estesa la valutazione dell'attività di alcune delle strutture tettoniche identificate, laddove se ne ravvedesse la necessità e le informazioni geologiche disponibili lo consentissero.

Le faglie potenzialmente sismogeniche caratterizzate hanno rappresentato l'input per la modellazione di scenari di scuotimento e per il possibile verificarsi di fagliazione del fondale marino. Lo scuotimento, in particolare, è stato l'elemento di base per elaborare successivamente sia modelli di innesco di frane sottomarine identificate nelle aree di studio, sia scenari di danneggiamento sismico sulle aree costiere.

La selezione delle faglie su cui modellare i piani di rottura per gli scenari è stata effettuata con l'intento di fornire alla parte ingegneristica del progetto il quadro più ampio possibile di siti su cui fare valutazioni di danno. Si sottolinea che, sulla base delle valutazioni effettuate e avendo fissato la magnitudo momento dei terremoti di scenario al valore di 6.5, tali scenari considerati hanno una frequenza, e quindi una probabilità (quest'ultima non stimata) di accadimento diversa da zona a zona. I risultati degli scenari andrebbero quindi considerati alla luce di una stima probabilistica della loro possibilità di verificarsi in un determinato arco di tempo.

Per quanto riguarda i potenziali scenari di maremoto, sia generati dalla deformazione del fondale causata dalla fagliazione in profondità, sia dall'attivazione di frane sismoindotte, si segnala che, soprattutto a causa della mancanza sull'intero territorio nazionale di topografie e batimetrie di alta risoluzione spaziale, si è fatto ricorso ad un approccio semplificato per la stima dell'altezza della colonna d'acqua a terra, moltiplicando inoltre il valore ottenuto per un fattore pari a 2. Tale approccio, sviluppato in accordo tra i vari Enti coinvolti, ha permesso di ottenere risultati confrontabili su tutte le aree di studio e sui potenziali maremoti di origine sia da terremoto sia da frana.

Gli scenari realizzati rappresentano un campione molto ristretto della potenziale manifestazione della sismicità naturale e dei suoi effetti (scuotimento, tsunami) per un territorio vasto come quello delle aree d'indagine. Quindi questa analisi rappresenta un'esplorazione iniziale e parziale dei possibili effetti; pur trattandosi di scenari verosimili, la loro probabilità di accadimento non è stata definita. Essi presentano quindi delle forti limitazioni riguardo all'esplorazione della variabilità naturale dei fenomeni sismici e dei loro effetti. Per valutare l'importanza relativa di tali scenari, si raccomanda pertanto di analizzarli in combinazione con studi di pericolosità sismica e da maremoto, come la Mappa Nazionale di Pericolosità Sismica (MPS04; <http://zonesismiche.mi.ingv.it/>) e la Mappa di Pericolosità da Tsunami di origine Sismica (NEAMTHM18; <http://www.tsumaps-neam.eu/neamthm18/>), frutto di progetti realizzati con il contributo di vari Enti di ricerca e svolti in stretta collaborazione con il Dipartimento della Protezione Civile. In tal modo sarà possibile analizzare i risultati degli scenari valorizzando la complementarietà degli approcci utilizzati.

Venendo alla parte di valutazione degli scenari di danno da terremoto e delle relative perdite, si osserva che l'impatto atteso è stato calcolato per un numero molto elevato di strutture ed infrastrutture con informazioni di base. Se ci si focalizzasse su un numero inferiore di aree, potrebbe essere migliorato il livello di conoscenza dei dati di esposizione, sia relativi all'edilizia residenziale, sia alle infrastrutture. L'acquisizione di dati di esposizione di migliore qualità potrebbe essere effettuata sia per i terremoti che per i maremoti, nei cui scenari si utilizza di fatto una base dati molto simile.

La valutazione delle perdite è stata condotta per l'edilizia residenziale, ma modelli di perdita dovrebbero essere implementati anche per le infrastrutture, sia in termini di perdite dirette che in termini di perdite indirette.

Inoltre, ad oggi non vi sono ampi studi sulla vulnerabilità da tsunami dell'edificato costiero italiano. Per sopperire a tale carenza, è stata sviluppata una metodologia per la valutazione della vulnerabilità da tsunami di edifici residenziali italiani, confrontandola con curve empiriche sviluppate su edilizia di altri paesi. Come visto, per caratterizzare l'edificato si sono utilizzati come parametri principali quelli che sono desumibili da fonti ISTAT o similari (es.: epoca di costruzioni, numero di piani, materiale di costruzione, presenza o meno di normativa antisismica, ...).

L'azione strutturale di interesse è stata valutata mediante l'altezza dell'onda al piede dell'edificio (metodo giapponese); tuttavia, tale valutazione a scala territoriale è stata condotta basandosi sostanzialmente su transetti monodimensionali a partire dalla costa al piede dell'edificio. Tale parametro di input, primario per l'applicazione delle curve di fragilità, può essere ulteriormente migliorato mediante simulazioni di ingressione sulla terraferma.

Modelli di vulnerabilità di migliore qualità, in grado di processare i nuovi dati e migliorare di conseguenza la valutazione del danno atteso, dovrebbero considerare anche il fenomeno di accumulo del danno. Di fatto, all'arrivo dell'onda di tsunami, sia essa causata da frana sismoindotta o da deformazione cosismica del fondale, le strutture hanno già sofferto per effetto dello scuotimento determinato dal precedente terremoto, e potrebbero rispondere quindi in modo diverso rispetto a quanto atteso in assenza di danneggiamento sismico.

Un'ultima considerazione merita, infine, il confronto tra scenari di danno prodotti fissando una sola magnitudo. Si è visto, infatti, che i danni e le perdite maggiori sono al nord, dove però il risultato è condizionato dal fatto che l'abitato è più denso ma la probabilità di accadimento dell'evento, su base storica, è inferiore. Maggiori approfondimenti necessiterebbero la quantificazione della probabilità di accadimento degli scenari di terremoto e ciò potrà costituire un passo successivo dello studio. Inoltre, l'aver fissato la magnitudo momento dei terremoti di scenario al valore di 6.5 produce effetti molto disomogenei sullo scuotimento della scarpata continentale, che talune volte si trova in eccesso o in difetto di scuotimento rispetto alle dimensioni dei fenomeni gravitativi già avvenuti e mappati.

## **Conclusioni**

Il progetto SPOT è il punto di partenza di un'analisi volta a sostenere le decisioni in un campo con implicazioni sociali non trascurabili. Queste decisioni devono tenere conto della sicurezza della popolazione e dei loro territori da un lato, e dello sviluppo economico del Paese dall'altro.

Il percorso che è stato avviato con questo progetto è scientificamente lungo e difficile. Appare evidente come, in un suo eventuale sviluppo futuro e sempre sotto la supervisione del Ministero dello Sviluppo Economico, sia necessario immaginare una collaborazione anche con le compagnie petrolifere coinvolte. Infatti, integrando i dati e i modelli di produzione negli scenari, che dovrebbero essere sviluppati con dettaglio molto maggiore, si potrà analizzare in modo più circostanziato l'effettiva possibilità che le attività di produzione di idrocarburi possano o meno innescare eventi dannosi. Inoltre, nel caso in cui questa possibilità dovesse apparire di una qualche concretezza, potrebbero essere implementate contromisure scientificamente fondate e condivise con tutti i portatori di interesse.

## Bibliografia

- Akkar S., Bommer J.J., 2010. Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean Region, and the Middle East. *Seismological Research Letters*, 81(2), 195–206.
- American Lifelines Alliance, 2001. *Seismic Fragility Formulation for Water System, part 2 – Guideline*, ASCE – FEMA.
- Antoncccchi I., Di Bucci D., Dolce M., Terlizze F., 2019. Steps forward and open issues on the reduction of the risks related to hydrocarbon production and gas storage: the Italian experience from the viewpoint of two Governmental Administrations. *Acta Geophysica*, 67 (1), 411–421.
- Argnani A., 1987. The Gela Nappe: Evidence of accretionary melange in the Maghrebic foredeep of Sicily, *Memorie della Società Geologica Italiana*, 38, 419–428.
- Argnani A., Frugoni F., 1997. Foreland Deformation in the Central Adriatic and its Bearing on the Evolution of the Northern Apennines. *Annali di Geofisica*, 40, 771–780.
- Argnani A., Torelli L., 2001. The Pelagian Shelf and its graben system (Italy/Tunisia). *Mémoires du Muséum d'histoire naturelle*, 186, 529–544.
- ASCE 7-16, 2017: *Minimum design loads for buildings and other structures*, 16<sup>th</sup> American Society of Civil Engineering ASCE, Reston, USA, pp.25–50.
- Azzaro R., Barbano M. S., 2000. Contributo alla compilazione della carta delle faglie attive della Sicilia, in *Le ricerche del GNDT nel campo della pericolosità sismica*, edited by F. Galadini, C. Meletti and A. Rebez, CNR—Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, 227–235, Roma.
- Basili R., Brizuela B., Herrero A., Iqbal S., Lorito S., Maesano F.E., Murphy S., Perfetti P., Romano F., Scala A., Selva J., Taroni M., Thio H.K., Tiberti M.M., Tonini R., Volpe M., Glimsdal S., Harbitz C.B., Løvholt F., Baptista M.A., Carrilho F., Matias L.M., Omira R., Babeyko A., Hoechner A., Gurbuz M., Pekcan O., Yalçiner A., Canals M., Lastras G., Agalos A., Papadopoulos G., Triantafyllou I., Benchekroun S., Agrebi Jaouadi H., Attafi K., Ben Abdallah S., Bouallegue A., Hamdi H., Oueslati F., 2018. NEAM Tsunami Hazard Model 2018 (NEAMTHM18): online data of the Probabilistic Tsunami Hazard Model for the NEAM Region from the TSUMAPS-NEAM project. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV); <http://doi.org/10.13127/tsunami/neamthm18>.
- Bindi D., Pacor F., Luzi L., Puglia R., Massa M., Ameri G., Paolucci R., 2011. Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9, 1899–1920.
- Boore D.M., Atkinson G.M., 2008. Ground motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, 24, 99–138.
- Borzi B., Pinho R., Crowley H., 2008a. Simplified pushover-based vulnerability analysis for large scale assessment of RC buildings. *Engineering Structures*, 30(3), 804–820.
- Borzi B., Crowley H., Pinho R., 2008b. Simplified Pushover-Based Earthquake Loss Assessment (SPBELA) Method for Masonry Buildings., *International Journal of Architectural Heritage*, 2(4), 353–376.
- Calabrese A., Lai C.G., 2013. Fragility functions of blockwork wharves using artificial neural networks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 52(1), 88–102.

- Calabrese A., Lai C.G., 2016. Sensitivity analysis of the seismic response of gravity quay walls to perturbations of input parameters. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 82, 55–62.
- Catalano S., De Guidi G., Romagnoli G., Torrisi S., Tortorici G., Tortorici L., 2008. The migration of plate boundaries in SE Sicily: Influence on the large-scale kinematic model of the African promontory in southern Italy. *Tectonophysics*, 449, 41–62.
- Di Bucci D., Antoncicchi I., Ciccone F., Teofilo G., Terlizese F., Argnani A., Ligi M., Rovere M., Basili R., Coltelli M., Lorito S., Borzi B., Germagnoli F., Di Ludovico M., Lignola G.P., Prota A., 2017). The SPOT project (potentially triggerable offshore seismicity and tsunamis): a first appraisal of the possible impact of oil and gas platforms on the seismic and tsunami risks along the Italian coasts. *Geingegneria Ambientale e Mineraria (GEAM)*, 152 (3), 125–131.
- Diviacco P., Firetto Carlino M., Busato A., 2019. Enhancing the value of public vintage seismic data in the Italian offshore. *Geoscience Data Journal*, 6, 6–15.
- EMODnet Bathymetry Consortium (2018). EMODnet Digital Bathymetry (DTM). <http://doi.org/10.12770/18ff0d48-b203-4a65-94a9-5fd8b0ec35f6>
- Fantoni R., Franciosi R., 2010. Mesozoic extension and Cenozoic compression in Po Plain and Adriatic foreland. In: Sassi, F.P. (Ed.), *Nature and Geodynamics of the Lithostere in Northern Adriatic*. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 21 (1), 181–196.
- FEMA P-646, 2012. *Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis*. Federal Emergency Management Agency FEMA.
- Fukuyama H., Kato H., Ishihara T., Tajiri S., Tani M., Okuda Y., Kabeyasawa T., Nakano Y., 2011: Structural design requirement on the tsunami evacuation buildings. SDRTEB, Japanese Ministry of Land, Infrastructure, Transportation and Tourism MLIT.
- Gauchery T., Rovere M., Cattaneo A., Asioli A., Tesi T., Pellegrini C., Campiani E., Trincardi F., 2019. Contourite deposits and landslides in the south-eastern Gela Basin (Strait of Sicily, Central Mediterranean Sea), relationships and contributory causes. *Geophysical Research Abstracts*, 21, EGU2019-16208..
- Ghielmi M., Minervini M., Nini C., Rogledi S., Rossi M., 2013. Late Miocene-Middle Pleistocene sequences in the Po Plain and Northern Adriatic Sea (Italy): The stratigraphic record of modification phases affecting a complex foreland basin. *Marine and Petroleum Geology*, 42, 50–81.
- Ghisetti F.C., Gorman A.R., Grasso M., Vezzani L., 2009. Imprint of foreland structure on the deformation of a thrust sheet: The Plio-Pleistocene Gela nappe (southern Sicily, Italy). *Tectonics*, 28, 1–16..
- Grasso M., Pedley H. M., Maniscalco R., Ruggieri R., 2000. Geological context and explanatory notes of the 'Carta Geologica del settore centro-meridionale dell'Altopiano Ibleo'. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 55, 45–52.
- Grünthal G., 1998. European Macroseismic Scale (EMS 1998). Council of Europe, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Sismologie 15.
- Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Sgattoni G., Valensise G., 2018. CFTI5Med, Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.-1997) e nell'area Mediterranea (760 a.C.-1500). Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <http://storing.ingv.it/cfti/cfti5/>.

- HAZUS, 2004. Multi-hazard Loss Estimation Methodology –Earthquake Model, Technical Manual, National Institute of Buildings Science (NIBS) for the Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington D.C., USA.
- Kagan Y.Y., 2002. Seismic moment distribution revisited. I. Statistical results, *Geophysical Journal International*, 148, 520–541.
- Kriebel D. L., Lynett P. J., Cox D. T., Petroff C. M., Robertson I. N. and Chock G. Y. K., 2017. Energy method for approximating energy overlaid tsunami flows. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 143(5), 04017014.
- Kuhlmann J., Asioli A., Trincardi F., Klügel A., Huhn K., 2017. Landslide frequency and failure mechanisms at NE Gela Basin (Strait of Sicily). *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122, 2223–2243..
- Leonard M., 2014. Self-Consistent Earthquake Fault-Scaling Relations: Update and Extension to Stable Continental Strike-Slip Faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(6), 2953–2965.
- Margottini C., Molin D., Serva L., 1992. Intensity versus ground motion: A new approach using Italian data. *Engineering Geology*, 33, 1, 45–58.
- Meletti C., Montaldo V., 2007. Stime di pericolosità sismica per diverse probabilità di superamento in 50 anni: valori di ag. Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D2, <http://esse1.mi.ingv.it/d2.html>.
- Mesinger F., Arakawa A., 1976. Numerical Methods Used in Atmospheric Models, Volume 1. International Council of Scientific Unions—World Meteorological Organization, Geneva.
- Minisini D., Trincardi F., Asioli A., Canu M., Fogliani F., 2007. Morphological variability of exposed mass-transport deposits on the eastern slope of Gela Basin (Sicily channel). *Basin research*, 19(2), 217–240.
- Minisini D., Trincardi F., 2009. Frequent failure of the continental slope: The Gela Basin (Sicily Channel). *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, F03014,.
- Morris A., Ferril D.A., Henderson D.B., 1996. Slip-tendency analysis and fault reactivation. *Geology*, 24, 275–278.
- Neves M.C., Paiva L.T., Luis J., 2009. Software for slip-tendency analysis in 3D: A plug-in for Coulomb. *Computers and Geosciences*, 35, 2345–2352.
- Pace P., 2018. In *Atlas of Structural Geological Interpretation from Seismic Images*, 55–59.
- Paparo M.A., Tinti S., 2017. Analysis of Seismic-Driven Instability of Mt. Nuovo in the Ischia Island, Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(2), 750–759.
- Paparo M.A., Armigliato A., Pagnoni G., Zaniboni F., Tinti S., 2017. Earthquake-triggered landslides along the Hyblean-Malta Escarpment (off Augusta, eastern Sicily, Italy) – assessment of the related tsunamigenic potential. *Advances in Geosciences*, 44, 1–8.
- Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P., 2016. CPTI15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, doi: <http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPTI15>.
- Sabetta F., Speranza E., Borzi B., Faravelli M., 2013. Scenari di danno empirici e analitici a confronto con recenti terremoti italiani. Proceedings of 32<sup>th</sup> National Conference of GNGTS, Trieste, Italy.

- SRM-LIFE, 2007. Development of a global methodology for the vulnerability assessment and risk management of lifelines, infrastructures and critical facilities. Application to the metropolitan area of Thessaloniki, Research project, G. Secretariat for Research and Techniques, Greece.
- Suppasri A., Mas E., Charvet I., Gunasekera R., Imai K., Fukutani Y., Abe Y., Imamura F., 2013. Building damage characteristics based on surveyed data and fragility curves of the 2011 Great East Japan tsunami. *Natural Hazards*, 66(2), 319–341.
- Tinti S., Manucci A., 2006. Gravitational stability computed through the limit equilibrium method revisited. *Geophysical Journal International*, 164, 1-14.
- Tinti S., Tonini R., 2013. The UBO-TSUFDF tsunami inundation model: validation and application to a tsunami case study focused on the city of Catania, Italy, *Natural Hazards and Earth Systems Science*, 13, 1795–1816.
- Whitman R.V., Reed J.W., Hong S.T., 1973. Earthquake Damage Probability Matrices, in *Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 2, Palazzo DEI CONGRESSI (EUR), Rome, 2531–2540.



**DGISSEG**

