

***Dal modello di pericolosità di TSUMAPS-NEAM ai valori di run-up
massimo per la definizione delle fasce costiere: concetti chiave,
applicabilità e limitazioni***

Autori: CAT-INGV

VERSIONE 1.1

Ultimo Aggiornamento: 1 ottobre 2018



**ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA**

Indice

Tsunami, generalità.....	1
Il modello di pericolosità TSUMAPS-NEAM.....	5
I POI e le metriche dell'intensità della pericolosità.....	8
Curve di pericolosità, mappe di pericolosità e di probabilità.....	10
Dalla pericolosità ai valori di run-up massimo per la definizione delle fasce costiere.....	12
Limiti e raccomandazioni	16
Bibliografia	18

Tsunami, generalità

Uno tsunami (o maremoto) è un fenomeno naturale che si verifica quando una grande massa d'acqua, nel mare o in un lago, viene rapidamente spostata generando una serie di onde. Questi eventi sono noti per il loro potenziale di inondazione delle coste che causa, in alcuni casi, la perdita di vite umane e enormi danni alle proprietà. Gli tsunami possono essere innescati da:

- grandi terremoti sottomarini o costieri che producono un sostanziale spostamento del fondale marino, del fondo del lago o dell'area costiera. Questa è di gran lunga la causa più comune di tsunami;
- grandi frane sottomarine o frane subaeree (rocce che cadono in acqua), spesso come risultato di un terremoto o di un'attività vulcanica;
- eruzioni vulcaniche, esplosioni sottomarine, collassi di caldera o flussi piroclastici;
- improvvisi cambiamenti della pressione atmosferica;
- impatti di meteoriti.

Le onde dello tsunami sono molto diverse dalle normali onde generate dal vento. Queste ultime sono generate quando il vento disturba la superficie dell'acqua e di solito hanno periodi (intervallo di tempo richiesto per un ciclo completo di un'onda) dell'ordine di alcune decine di secondi. Le onde dello tsunami, al contrario, sono treni d'onda caratterizzati da una sequenza di picchi e ventri che si propagano dalla zona sorgente in tutte le direzioni. Le onde di tsunami hanno periodi da diversi minuti fino a 1 ora o più. Il movimento associato allo tsunami interessa l'intera colonna d'acqua (dal fondo alla superficie) e di conseguenza le onde di tsunami sono molto più energetiche delle onde generate dal vento.

La generazione dello tsunami a causa di un terremoto è fortemente controllata dall'estensione e distribuzione spaziale e dalla storia temporale della deformazione del fondale marino causata dal terremoto, che a sua volta dipende dalle caratteristiche del terremoto stesso (dimensioni della rottura, meccanismo di fagliazione, distribuzione spaziale e temporale della dislocazione sulla faglia). In generale, i terremoti caratterizzati da movimenti verticali su faglie molto inclinate sono capaci di sviluppare tsunami di entità maggiore. Uno schema, in sezione, di un terremoto su una faglia inclinata che induce lo spostamento del fondale e innesca uno tsunami è mostrato in FIGURA 1.

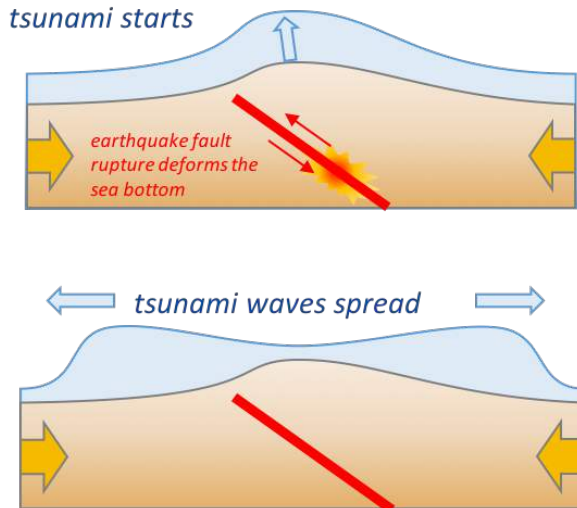


FIGURA 1: Schema di generazione dello tsunami per effetto della dislocazione di una faglia sottomarina che durante il terremoto sposta improvvisamente il fondo del mare. Lo spostamento del fondo a sua volta disturba l'intera colonna d'acqua sovrastante. Ciò innesca la propagazione dello tsunami (sotto l'azione della forza di gravità, che tende a ripristinare il livello del mare originario).

In FIGURA 2 è mostrata la distribuzione dell'energia per uno scenario realistico, dove si vede che l'energia dello tsunami è diretta inizialmente in direzione perpendicolare a quella della faglia, mentre successivamente si distribuisce in base alla morfologia del fondale su cui lo tsunami si propaga (come spiegato in seguito).

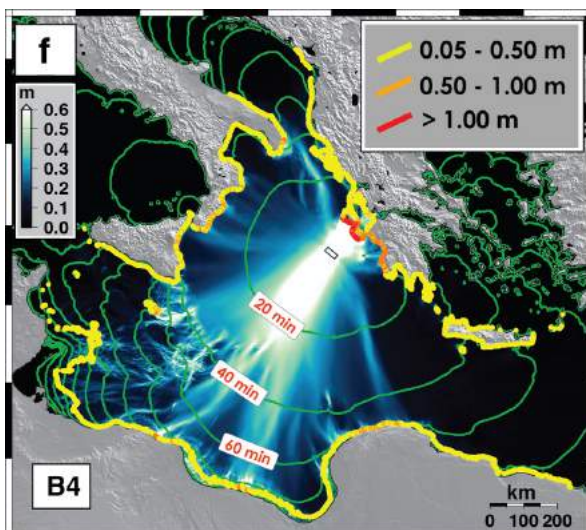


FIGURA 2: Distribuzione dell'energia (altezza) dello tsunami durante la propagazione a partire da una faglia, schematizzata come un piccolo rettangolo vicino alle coste della Grecia con direzione approssimativamente NW-SE. Lo tsunami parte in direzione perpendicolare (SW-NE) e poi si distribuisce in modo complesso. I colori da blu scuro a bianco (legenda in alto a sinistra) rappresentano l'altezza dello tsunami in mare aperto. I colori nella legenda in alto a destra rappresentano invece diverse altezze dell'onda di fronte alla costa.

In mare aperto, gli tsunami si comportano essenzialmente come onde lineari di lungo periodo. Quindi, dissipano poca energia e viaggiano a lunghe distanze con attenuazione quasi esclusivamente dovuta alla diffusione geometrica allontanandosi dalla sorgente (con ampiezza che decresce proporzionalmente alla radice quadrata della distanza dalla sorgente). Gli tsunami si propagano molto rapidamente in acque profonde, ad una velocità pari alla radice quadrata della profondità dell'acqua moltiplicata per l'accelerazione di gravità (FIGURA 3).

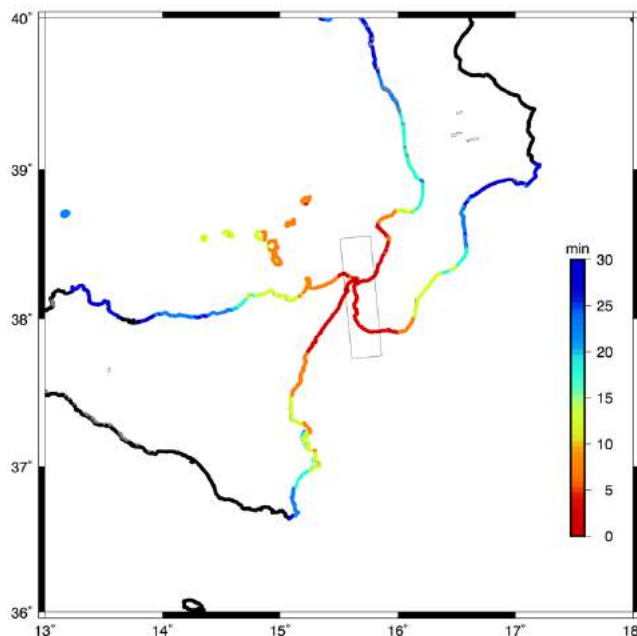
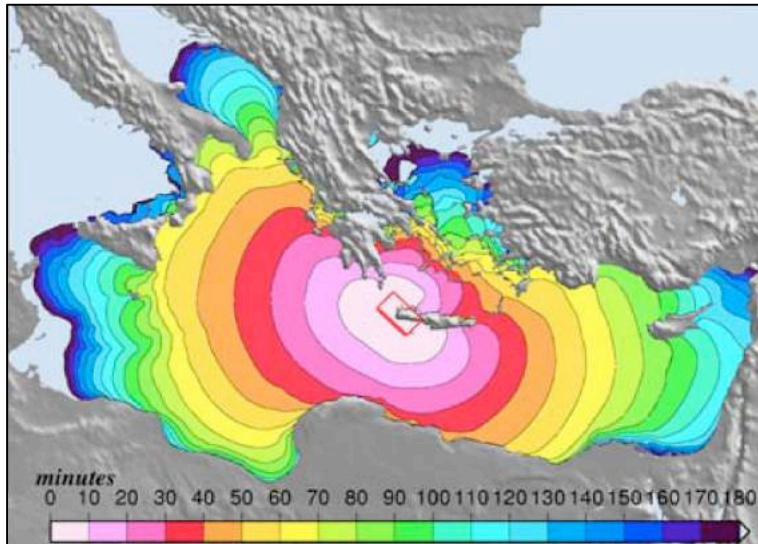


FIGURA 3: Sopra: Tempi di viaggio per uno tsunami generato sull'Arco Ellenico. Per questo specifico scenario le coste italiane sono raggiunte dopo circa un'ora dal terremoto (modificata da Lorito et al., 2008); Sotto: Tempi di arrivo della prima onda sulla costa per uno scenario dovuto a un terremoto nello Stretto di Messina (il rettangolo schematizza la faglia). In zona sorgente la costa è raggiunta immediatamente, ma alcune volte può trattarsi di un ritiro e in generale non è detto che l'onda più alta nel treno di onde sia la prima ad arrivare.

Di conseguenza, la focalizzazione e/o defocalizzazione dell'energia dello tsunami sono controllate dalle caratteristiche batimetriche, ad esempio mediante rifrazione e interferenze tra diverse onde (si veda FIGURA 2). Gli tsunami possono anche essere caratterizzati da dispersione in frequenza, in particolare per quanto riguarda le componenti di lunghezza d'onda relativamente piccole introdotte per esempio da complessità nelle caratteristiche della sorgente. Durante l'avvicinamento a costa in acque progressivamente meno profonde, l'onda dello tsunami rallenta. Per il principio di conservazione dell'energia, l'ampiezza aumenta e la lunghezza d'onda si riduce progressivamente. Maggiore è il rapporto tra l'altezza dello tsunami e la profondità dell'acqua, maggiore è la non linearità del fenomeno durante l'avvicinamento a costa. Viceversa, la linearità aumenta all'aumentare della pendenza del versante costiero. Inoltre, più il fronte d'onda è ripido e più è probabile che le onde si rompano limitandone l'impatto successivo.

Quando un'onda di tsunami colpisce la costa, l'evoluzione dell'inondazione diventa un fenomeno complesso non lineare controllato dall'interazione delle caratteristiche dell'onda incidente con la topografia. L'impulso dell'onda può spingere all'interno l'intera colonna d'acqua anche per grandi distanze lungo i pendii, producendo un run-up (la massima quota topografica che l'onda raggiunge nell'entroterra) che può superare il doppio dell'ampiezza dell'onda sulla costa. La massima distanza di inondazione (detta anche massima ingressione) e il massimo run-up possono essere molto variabili a seconda delle condizioni locali.

Generalmente, i valori più alti di run-up sono osservati nelle aree costiere dove è presente una forte pendenza o dove le caratteristiche topografiche portano a fenomeni di focalizzazione delle onde. Lunghe distanze di inondazione possono verificarsi in aree costiere con lievi pendenze e scarsa vegetazione, caratterizzate da scarsa rugosità e assenza di ostacoli, dove l'energia delle onde di tsunami si dissipa lentamente. Nell'esempio in FIGURA 4, è rappresentato uno scenario di inondazione a Milazzo, causato da un forte terremoto sottomarino di magnitudo superiore a 7 a poca distanza dal sito, scelto a fini puramente illustrativi e non necessariamente rappresentativo di un caso realistico.

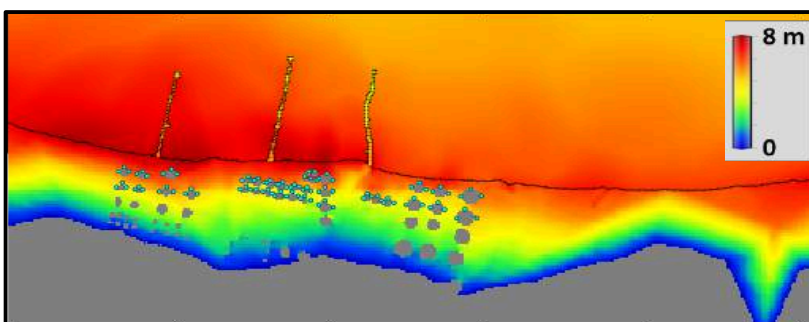


FIGURA 4: Esempio di scenario di inondazione (massima altezza dell'onda) presso la raffineria di Milazzo. La linea di costa è in nero, con il mare nella parte alta della figura. In grigio le strutture della raffineria non sommerse dall'onda e la zona raggiunta dall'ingressione dell'onda a terra.

Un ulteriore e più completo trattamento degli argomenti di cui sopra può essere trovato in Lynett (2008), Geist and Oglesby (2014), e nella bibliografia ivi citata.

Il modello di pericolosità TSUMAPS-NEAM

La quantificazione probabilistica della pericolosità da tsunami (PTHA - Probabilistic Tsunami Hazard Assessment) si sta affermando come metodologia standard per stimare questo tipo di pericolosità (Geist & Lynett, 2014; Grezio et al., 2017). Indicheremo qui con S-PTHA la “Seismic-PTHA”, cioè la PTHA per gli tsunami indotti da terremoti.

La regione NEAM (*Northeastern Atlantic, the Mediterranean and connected seas* - Atlantico nord-orientale, Mediterraneo e mari collegati, di cui l'Italia fa parte) dispone di un recente modello di pericolosità probabilistica per gli tsunami generati da terremoti (S-PTHA, *Seismic - PTHA*) prodotto dal progetto TSUMAPS-NEAM (2016-2018, Agreement N° ECHO/SUB/2015/718568/PREV26), co-finanziato dal DG-ECHO e coordinato da INGV.

TSUMAPS-NEAM ha prodotto il primo modello S-PTHA omogeneo a scala regionale, cioè alla scala della regione del NEAM che include l'Atlantico nord-orientale (dall'Africa alla Norvegia, la Groenlandia e l'Islanda), il Mediterraneo e i mari connessi (Mar di Marmara e Mar Nero). Questo modello è il risultato di una forte e complessa interazione con un'ampia comunità scientifica interdisciplinare internazionale.

La S-PTHA ottenuta in ambito TSUMAPS-NEAM si basa su dati e metodi sviluppati in progetti precedenti a scala locale, regionale e globale. Si basa anche su procedure innovative implementate durante lo sviluppo del progetto.

Il modello di pericolosità TSUMAPS-NEAM è stato costruito modellando prima i terremoti e la loro probabilità di accadimento, ottenuta estrapolando i dati sulla sismicità recente alle alte magnitudo e considerando anche le migliori informazioni geologiche e tettoniche disponibili, per poi modellare numericamente la generazione, propagazione e l'impatto degli tsunami generati da questi terremoti.

Tuttavia, come ogni stima della pericolosità, l'implementazione della S-PTHA TSUMAPS-NEAM ha richiesto diverse valutazioni e decisioni talvolta caratterizzate da un elevato grado di soggettività, come la scelta di diversi modelli alternativi scientificamente accettabili (per rappresentare l'incertezza del modello di pericolosità) e l'attribuzione di pesi relativi ai diversi modelli (per rappresentare la loro credibilità scientifica). Scienziati provenienti da tutto il mondo hanno aiutato il team TSUMAPS-NEAM nello sviluppo di queste complesse procedure, mettendo a disposizione le loro conoscenze ed esperienze su base esclusivamente volontaria.

Più specificamente, è stato implementato un processo multi-esperto trasparente e documentato per gestire e ridurre la soggettività di scelte potenzialmente critiche. Questo processo ha incluso esperimenti elicitativi (letteralmente, estrazione delle informazioni) formali di un pool di esperti e una revisione partecipata della metodologia e dei risultati da parte di un ulteriore gruppo di esperti, chiamati revisori interni (FIGURA 5).

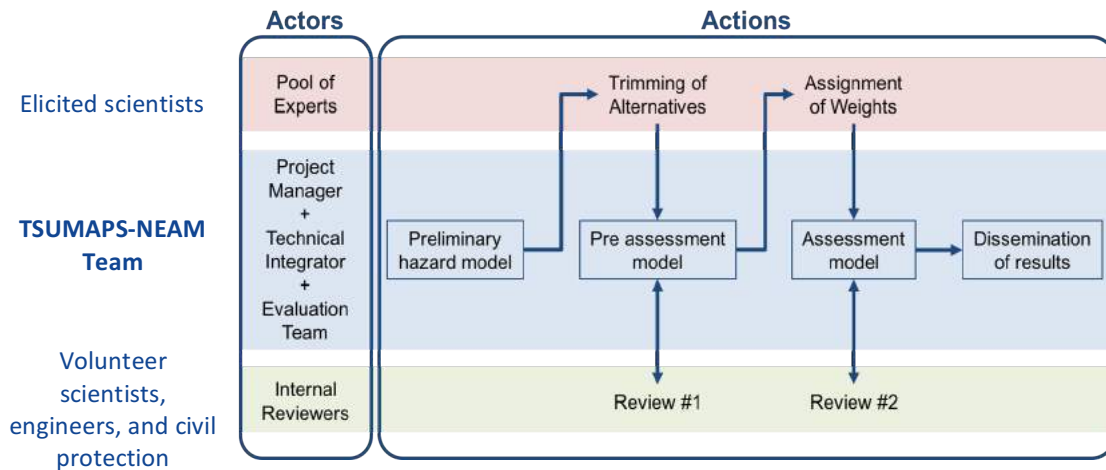


FIGURA 5: Diagramma di flusso semplificato dei diversi ruoli e azioni dei diversi gruppi di esperti coinvolti in TSUMAPS-NEAM

Le incertezze del modello di pericolosità sono state infine valutate con la tecnica di modellazione dell'*ensemble* (Selva et al., 2016), anche recentemente adottata per valutazioni di pericolosità probabilistica sismica e vulcanica (Marzocchi e Jordan, 2014; Marzocchi et al., 2015; Selva et al., 2018).

I risultati del progetto TSUMAPS-NEAM (FIGURA 6) sono disponibili al pubblico su Internet (<http://www.tsumaps-neam.eu/>), sotto forma di:

- 1) curve di pericolosità,
- 2) mappe di pericolosità e
- 3) mappe di probabilità,

calcolate in specifici Punti di interesse (POI). La pericolosità è riferita alla probabilità di eccedenza in 50 anni di una misura specifica dell'intensità dello tsunami, l'altezza massima dell'inondazione (MIH). Questi concetti sono introdotti sinteticamente nelle prossime sezioni.

I POI e le metriche dell'intensità della pericolosità

Il modello di pericolosità è calcolato in specifici Punti di Interesse (che da qui in avanti indicheremo con l'acronimo POI, Points Of Interest). I POI sono punti in mare selezionati lungo la linea batimetrica a -50 metri e lo spazio medio tra loro è di circa 20 km (FIGURA 7). La pericolosità ad ogni POI rappresenta il valor medio di pericolosità per un'area costiera vicina. In TSUMAPS-NEAM sono stati considerati oltre duemila POI distribuiti lungo le coste della regione NEAM. Ci sono 1.076 punti nell'Atlantico nord-orientale; 1.130 punti nel Mar Mediterraneo; e 137 punti nel Mar Nero.

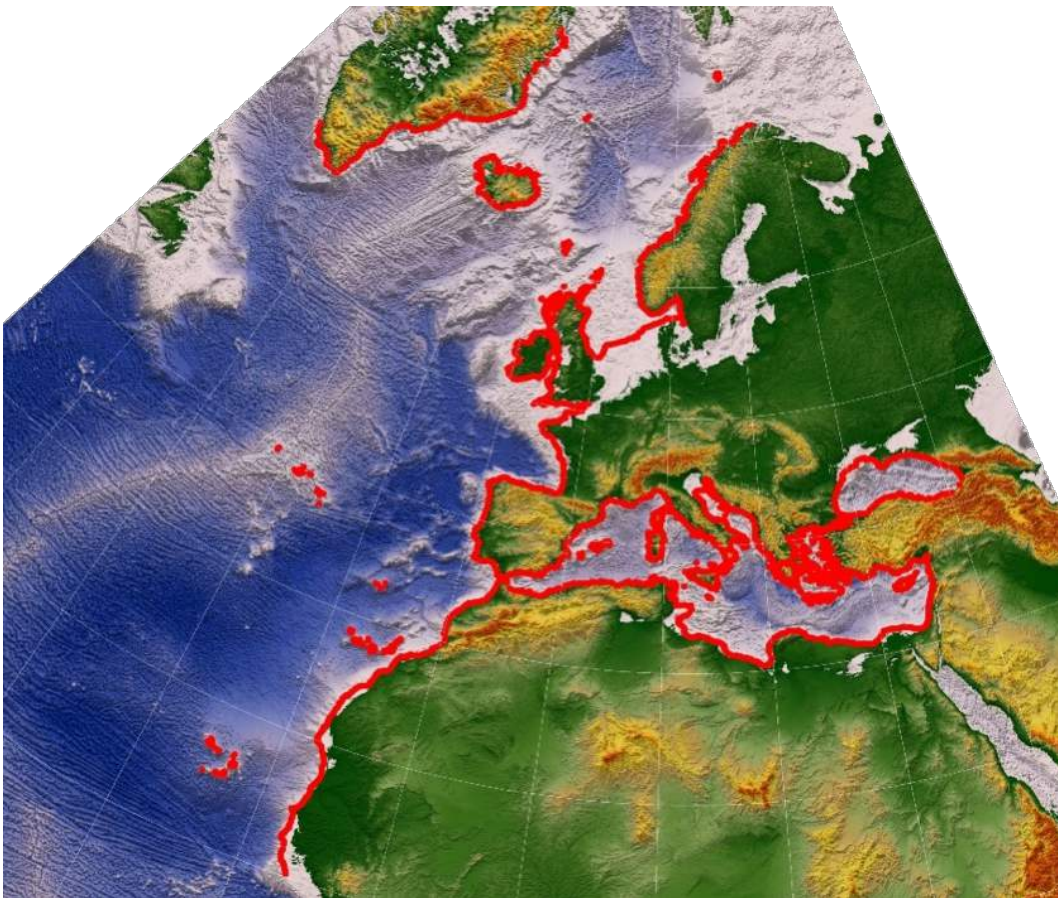


FIGURA 7: I POI considerati in TSUMAPS-NEAM (punti rossi, che appaiono come una linea a questa scala) lungo le coste della regione NEAM (Atlantico nord-orientale, Mediterraneo e Mare connesso). Si veda <http://www.ioc-tsunami.org/> per ulteriori dettagli sulla regione NEAM e anche sul sistema di allerta tsunami NEAMTWS.

Analogamente a studi su scala globale (ad es. Davies et al., 2017), il parametro di intensità utilizzato nel modello di pericolosità è l'altezza massima di inondazione (Maximum Inundation Height, MIH, FIGURA 8), che è l'altezza massima raggiunta dall'onda, cioè l'altezza dell'acqua in un punto sommata alla quota topografica del punto stesso, misurata rispetto al livello medio del mare, lungo profili topografici ortogonali alla linea di costa. MIH viene calcolato su tutti i POI, e rappresenta l'altezza della inondazione dello tsunami sulla costa nell'area retrostante associata a ciascun POI, in una fascia che si estende parallelamente alla costa ed è quindi perpendicolare al profilo schematico in FIGURA 8 (le fasce parallele

alla costa corrispondenti a ciascun POI sono anche rappresentate schematicamente dalle doppie frecce verdi, più spesse, in FIGURA 11).

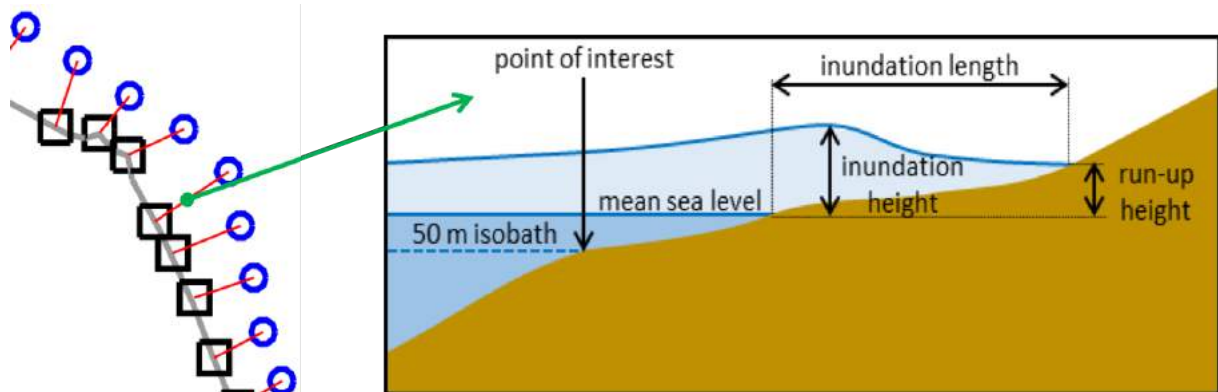


FIGURA 8: Schema delle diverse grandezze discusse nel testo. A sinistra alcuni POI (cerchietti blu) e i transetti (linee rosse dal cerchietto al quadratino a terra; quest'ultimo rappresenta il punto dove il transetto intercetta la linea di costa) lungo i quali sono calcolate le grandezze nella figura a destra.

In altre parole, il valore di MIH viene associato al POI ma si riferisce alla fascia di terra emersa che viene inondata. La MIH rappresenta il valor medio dell'altezza di inondazione attesa lungo il tratto di costa rappresentato da ogni POI (fascia costiera retrostante il POI). Ne consegue che MIH può variare lateralmente lungo la costa retrostante il POI. I valori di MIH locali (e il massimo run-up) lungo la costa possono essere anche 3-4 volte più grandi del valore di MIH stimato dal modello di pericolosità.

Il valore di MIH associato a ogni singolo scenario sismico – che poi viene aggregato con tutti i valori di MIH prodotti da tutti gli scenari considerati secondo le loro probabilità per formare il modello di pericolosità – è qui basato su: 1) modelli numerici di propagazione dell'onda dello tsunami relativi ad ogni scenario considerato, calcolati fino al POI; 2) un fattore di amplificazione dell'onda per passare dall'altezza calcolata all'isobata di 50 metri data dal singolo scenario al POI alla stima di MIH che rappresenta il valor medio dell'inondazione attesa corrispondente a quella data altezza, dipendente da una funzione di probabilità che varia con la batimetria locale e con il periodo e la polarità dell'onda incidente; 3) una probabilità condizionata che modella la variabilità laterale (parallela alla costa) di MIH nell'area target rappresentata da ciascun POI (si veda anche FIGURA 11).

Le distribuzioni risultanti quantificano la probabilità per diversi valori di MIH in un punto casuale all'interno dell'area target corrispondente a un POI per ogni singolo scenario. La combinazione di queste informazioni con la probabilità di occorrenza di ciascun scenario produce in ciascun POI le curve di pericolosità, che sono descritte nella prossima sezione.

Curve di pericolosità, mappe di pericolosità e di probabilità

Una curva di pericolosità è il risultato di un calcolo matematico che associa la probabilità di accadimento dei terremoti di diverse magnitudo dovuti a ogni sorgente sismica considerata all'intensità dello tsunami che può generare (FIGURA 9, sinistra). La curva di pericolosità esprime la probabilità di eccedenza (o superamento) in funzione di una "misura di intensità" in un dato periodo di tempo, chiamato "periodo di esposizione". In altre parole, ogni punto della curva dice quanto frequentemente un evento di una certa intensità o superiore possa avvenire nel futuro nell'area a cui la stima di pericolosità è riferita. In TSUMAPS-NEAM la finestra di esposizione è fissata a 50 anni, e le curve di pericolosità sono calcolate in ogni POI adottando come misura di intensità MIH, come definita nella sezione precedente.

La probabilità di eccedenza è sempre un numero compreso tra 0 e 1, spesso espressa in termini percentuali (ad es., la probabilità di 0.3 è spesso riportata come 30%). Probabilità e frequenza di un evento sono collegate, e ad ogni valore di probabilità corrisponde un certo "periodo di ritorno medio" (l'inverso della frequenza media), che rappresenta la lunghezza dell'intervallo temporale che mediamente separa due eventi di intensità simile (più precisamente, superiori alla stessa soglia).

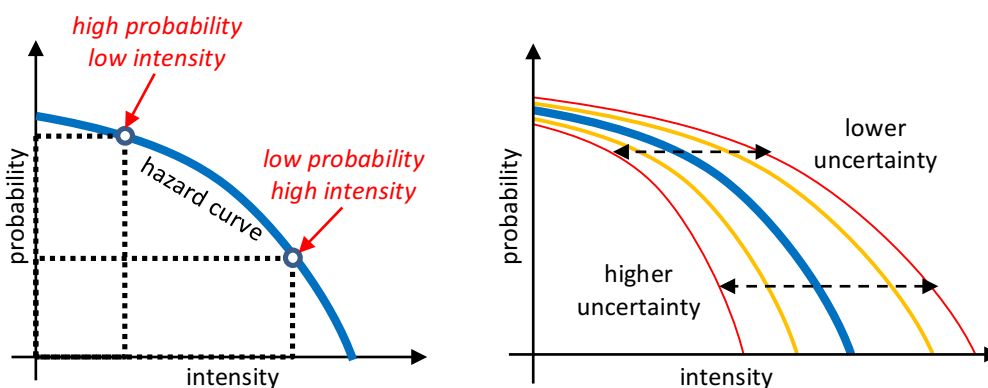


FIGURA 9: Sinistra, esempio di curva di pericolosità; Destra, esempio di insieme di percentili (curve gialle e rosse) intorno a una curva di probabilità media (curva blu); i percentili esprimono l'incertezza sul modello di pericolosità: tanto più essi sono distanti tra loro, tanto più l'incertezza è grande.

Tutti i modelli, compresi i modelli di pericolosità, sono caratterizzati da un determinato livello di incertezza. Diverse curve di pericolosità possono essere mostrate nella stessa figura per poter rappresentare questa incertezza, attraverso una quantità definita percentile (FIGURA 9, destra). Questa incertezza rappresenta la variabilità delle curve di pericolosità quando si implementano diverse scelte modellistiche, tutte scientificamente accettabili. Per esempio, la curva di pericolosità relativa al 50esimo percentile indica che il 50% dei modelli scientificamente accettabili forniscono curve di pericolosità con valori di probabilità minori o uguali a quelli rappresentati in questa curva. Maggiore è la separazione tra queste curve, maggiore sarà il livello di incertezza nel modello di pericolosità.

Per produrre le cosiddette “mappe di pericolosità” e “mappe di probabilità”, il punto di partenza sono le curve di pericolosità per tutti i punti di interesse (POI).

La mappa di pericolosità si ottiene riportando, per ogni POI, il valore di MIH corrispondente ad un prefinito valore di probabilità di superamento (spesso indicata come probabilità di progettazione; FIGURA 10, Sopra). I colori rappresentano i valori di MIH così estratti, e hanno come unità di misura i metri (m). Questo tipo di mappa viene generalmente usato dagli ingegneri e da altri specialisti.

La mappa di probabilità si ottiene riportando, per ogni POI, il valore di probabilità di eccedenza in 50 anni corrispondente ad un prefinito valore di intensità MIH (FIGURA 10, Sotto). I diversi colori sono proporzionali al valore di probabilità di superamento, e sono quindi valori compresi tra 0 e 1. Questo tipo di mappe può essere efficace per comunicare la pericolosità agli amministratori, ai decisori e, più in generale, al pubblico.

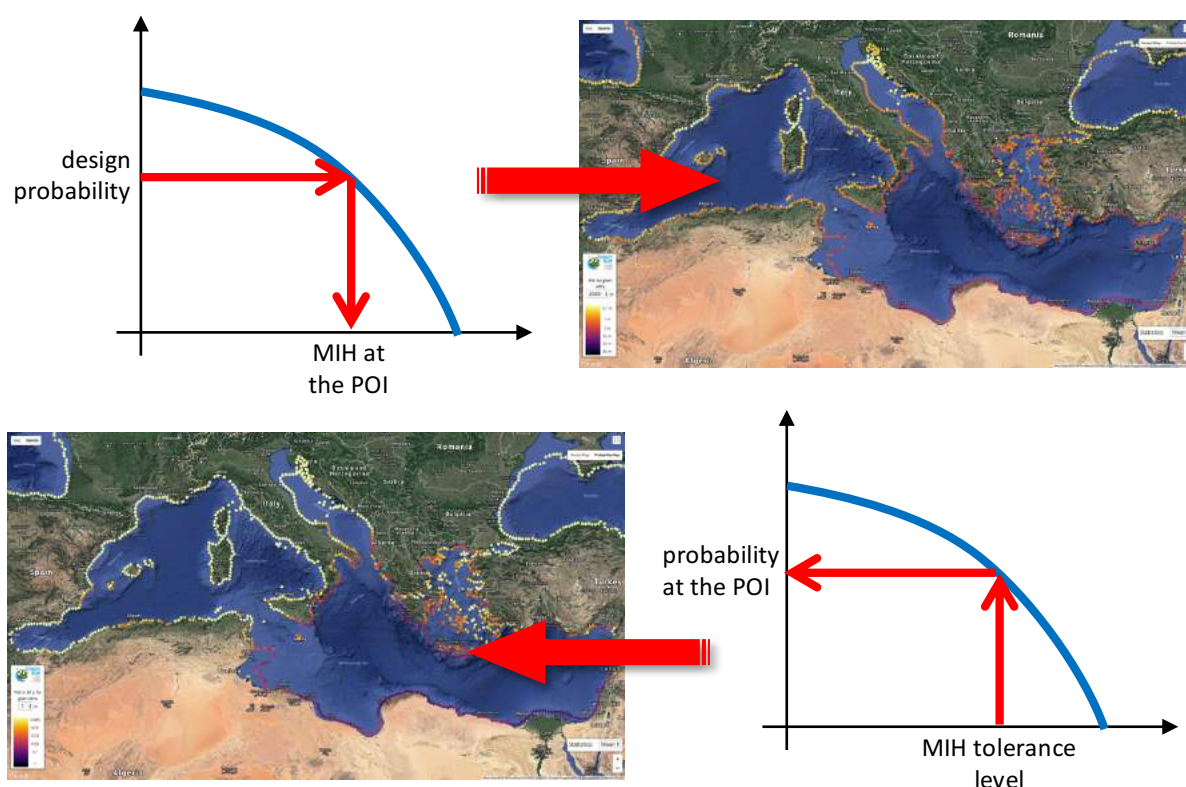


FIGURA 10: Sopra, una mappa di pericolosità, cioè i valori di MIH in metri per POI, ottenuti, come descritto nel testo, “tagliando” le curve di pericolosità ad una data probabilità di superamento in 50 anni; In basso, una mappa di probabilità, ovvero la probabilità di superamento in 50 anni, ottenuta “tagliando” le curve di pericolosità ad un dato valore MIH.

Dalla pericolosità ai valori di run-up massimo per la definizione delle fasce costiere

Le Indicazioni del Dipartimento della Protezione Civile assumono come valore di riferimento per la costruzione delle fasce costiere corrispondenti al livello di allerta ROSSO (WATCH) il valore di MIH a ogni POI che in media viene superato ogni 2500 anni (ovvero, una probabilità di circa il 2% in 50 anni, è stata utilizzata come “design probability” in ingresso alle curve di hazard per ottenere l’MIH corrispondente; si confronti FIGURA 10, sopra). Tale operazione è stata effettuata utilizzando le curve di pericolosità corrispondenti all’84° percentile dell’incertezza del modello.

Al fine di utilizzare il modello di pericolosità per definire le fasce di evacuazione in caso di allerta, è necessario passare dai valori di MIH ai valori del massimo run-up atteso sull’intero tratto di costa rappresentato da ogni POI (massimo dei massimi). Si noti che il punto esatto in cui avviene massimo run-up lungo il tratto di costa in esame non è definibile.

Come discusso in una sezione precedente, i valori di MIH riportati nell’ascissa delle curve di pericolosità esprimono necessariamente una media effettuata sull’area che ogni POI rappresenta (schematicamente indicata dalle doppie frecce, più spesse e in verde scuro per un generico POI in FIGURA 11 a sinistra). All’interno di questa area, MIH può variare lateralmente e, localmente, si possono raggiungere valori di MIH (così come di altre intensità, come il massimo run-up) anche 3-4 volte più grandi del valore riportato nelle curve di pericolosità di TSUMAPS-NEAM.

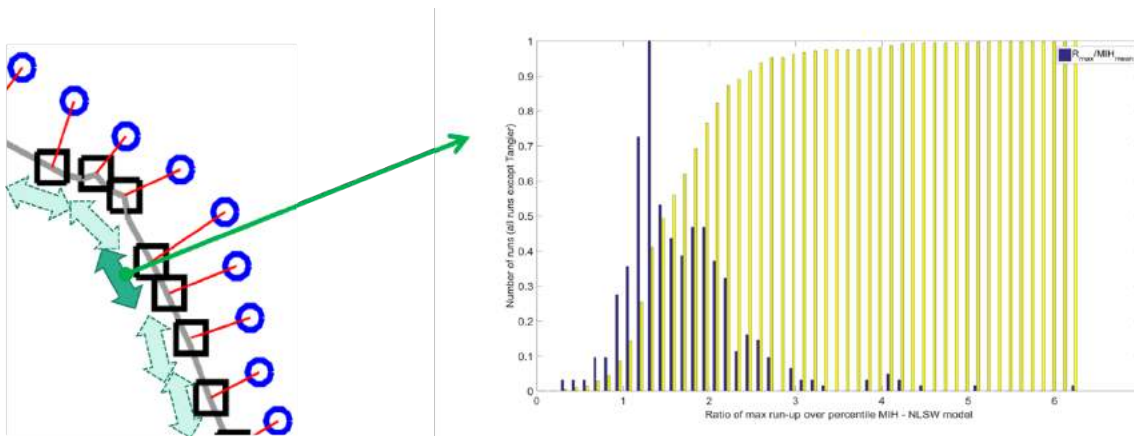


FIGURA 11: Istogramma (in blu) e distribuzione cumulativa empirica dei rapporti tra il massimo run-up in tutte le simulazioni di dettaglio effettuate, per diversi siti, e i valori della media di MIH stimati con il metodo utilizzato da TSUMAPS-NEAM.

Per stimare il massimo run-up R_{max} , nelle Indicazioni del Dipartimento della Protezione Civile si è quindi applicato un coefficiente di conversione k a partire da MIH, ovvero $R_{max}=MIH*k$. Per definire tale coefficiente diverse statistiche di MIH sono state confrontate con i valori del massimo run-up per numerosi scenari di dettaglio (risoluzione spaziale 10 m) su topografia realistica. I risultati di questi confronti (un esempio in Figura 11) sono stati forniti al

Dipartimento della Protezione Civile come base di informazioni per definire il coefficiente di conversione. In Figura 11 si evince che più del 90-95% dei valori del run-up sono tenuti in considerazione se la pianificazione viene fatta utilizzando un fattore di conversione pari a 3. In altri termini, ci si aspetta che la soglia stabilita possa essere superata localmente solamente nel 5-10% dei casi.

Per tener conto in qualche misura dei limiti di applicabilità in termini di variabilità spaziale del modello di pericolosità S-PTHA TSUMAPS-NEAM, che a causa dei limiti di risoluzione potrebbe non catturare a pieno la variabilità locale degli tsunami lungo la costa, INGV ha suggerito di considerare il massimo valore di run-up tra POI adiacenti, utilizzando un raggio di ricerca di 40 km. Dunque, per associare i POI ai tratti costieri, la procedura adottata per ogni punto sulla costa è stata la seguente:

1. Individuazione dei POI in un intorno di raggio $R=40\text{km}$ dal punto sulla costa
2. Attribuzione al punto di costa del massimo degli MIH associati ai POI individuati

Una specifica procedura è stata utilizzata da INGV per il Mar Adriatico Settentrionale, la Calabria tirrenica meridionale e le isole minori.

Mar Adriatico Settentrionale

L'isobata a 50 metri è molto lontana dalla costa settentrionale di questo settore marino; questo implica che nessun POI ricade all'interno di un raggio di 40 km dalla linea di costa; si è scelto allora di attribuire a tutti i punti della zona il valore massimo di MIH associato ai POI più vicini.

Calabria tirrenica Meridionale

Un raggio di 40 km intorno ai punti di costa della Calabria tirrenica meridionale potrebbe includere anche i POI sull'isobata a 50 metri nello Ionio, che è caratterizzata da una pericolosità da tsunami significativamente più elevata rispetto alle coste tirreniche. Per evitare che questo accada, l'associazione linea di costa-POI è stata effettuata introducendo un buffer spaziale per la ricerca/esclusione dei POI.

Isole minori

Per evitare che i punti sulle isole minori (arcipelago toscano, isole pontine, arcipelago campano, isole Tremiti, isole Eolie, Ustica, isole Egadi, Pantelleria, isole Pelagie) avessero un solo POI associato è stato utilizzato un raggio di ricerca più grande, pari a 80 km, e alcuni POI vicino all'Africa nord-occidentale.

Di seguito riportiamo due mappe con i punti lungo la costa il cui codice-colore indica il valore di R_{\max} (MIH moltiplicato per il fattore di conversione k). La prima mappa (FIGURA 12, sopra) mostra il valore di R_{\max} attribuito ai punti sulla costa utilizzando come parametro di ricerca solo un raggio $R=40$ km; la seconda mappa (FIGURA 12, sotto), mostra R_{\max} attribuito ai punti sulla costa utilizzando come parametro di ricerca un raggio $R=40$ km e

applicando le correzioni per l'Adriatico Settentrionale, la Calabria tirrenica meridionale, e le isole minori.

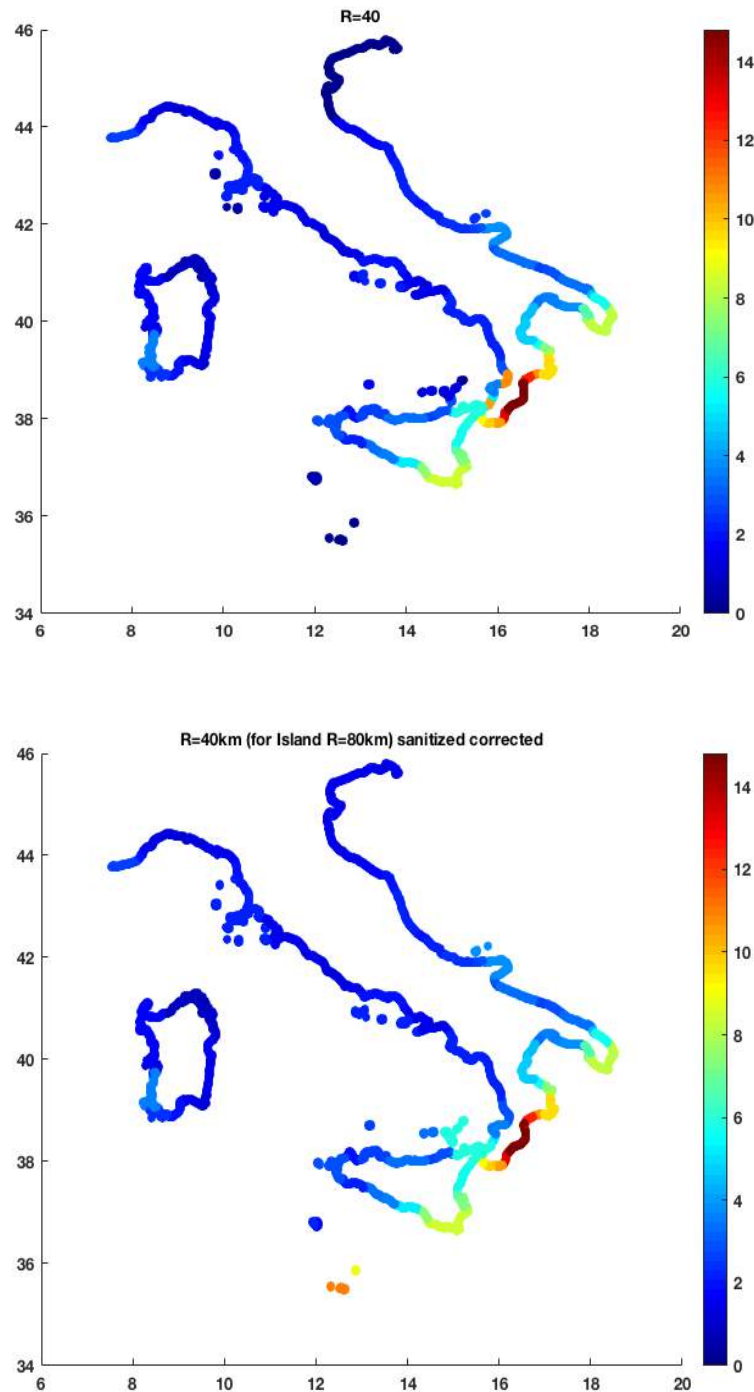


Figura 12: Sopra, Run-up R_{max} di riferimento attribuito ai punti sulla costa utilizzando come parametro di ricerca per i POI un raggio $R=40$ km; Sotto, Run-up R_{max} di riferimento attribuito ai punti sulla costa utilizzando come parametro di ricerca per i POI un raggio $R=40$ km, e applicando le correzioni per la laguna veneta, la Calabria tirrenica meridionale, e le isole minori (la scala di colori a destra è in metri).

Linee Guida, contributo tecnico CAT-INGV

A partire da questi valori di run-up di riferimento R_{\max} , ISPRA, come illustrato nel documento “Metodologia seguita per la prima definizione delle zone di allertamento per la pianificazione da rischio maremoto” (disponibile sul sito ISPRA), ha derivato le fasce per la pianificazione corrispondenti al livello di allerta ROSSO (WATCH), tenendo conto anche della dissipazione dello tsunami durante la propagazione sulla terraferma e di particolari morfologie (ad esempio, foci di fiumi).

Limiti e raccomandazioni

Come per tutti i modelli di pericolosità, anche quello di TSUMAPS-NEAM presenta alcuni limiti fisiologici descritti nel seguito.

I modelli di pericolosità probabilistici mirano a stimare la pericolosità futura ad una data posizione ma, come ogni modello, non possono mai dare una rappresentazione esatta della realtà né tantomeno possono predire con esattezza il futuro.

Gli tsunami sono eventi a frequenza di accadimento relativamente bassa (ma spesso di grande impatto). Di conseguenza, i modelli di pericolosità per gli tsunami, rispetto ai corrispondenti modelli per fenomeni più frequenti, dispongono in genere anche osservazioni più scarse su cui basarsi per la loro calibrazione o verifica. Ciò introduce una incertezza significativa.

Uno dei risultati del modello di pericolosità è, per esempio, la determinazione del periodo medio di ritorno per il superamento di una data altezza in un certo luogo. Più lungo è il periodo di ritorno, più scarse sono le osservazioni per testare e, eventualmente, falsificare il modello. Questo profilo critico, insieme ad altri descritti di seguito, spiega le cautele adottate nelle Indicazioni (come l'adozione dell'84° percentile e un periodo di ritorno di 2500 anni), considerato che i risultati di pericolosità sono alla base della pianificazione territoriale.

I dati su tsunami osservati, ad esempio misure ripetute di run-up in uno specifico sito costiero, che richiederebbero serie temporali molto estese indietro nel tempo, sono più scarsi nella regione del NEAM che in altre regioni caratterizzate da (grandi) terremoti più frequenti, come potrebbe essere ad esempio il caso del Cile e di altre regioni circum-pacifiche. Di conseguenza, non sarebbe opportuno costruire il modello di pericolosità direttamente dai dati di tsunami disponibili. Per questo motivo, seguendo una pratica comune e che si sta ormai affermando come standard nella comunità scientifica (Geist e Lynett, 2014; Grezio et al., 2017), il modello di pericolosità TSUMAPS-NEAM è stato costruito modellando prima i terremoti e la loro probabilità, per poi modellare numericamente la generazione, propagazione e l'impatto degli tsunami generati da questi terremoti.

Inoltre, il modello TSUMAPS-NEAM è il risultato di un progetto che, come tale, si basa su risorse finanziarie, umane e temporali limitate e rappresenta quindi compromesso ottimale tra fattibilità e approfondimento dell'analisi. Tuttavia, ulteriori analisi, la raccolta di nuovi dati e miglioramenti metodologici potrebbero essere raggiunti in futuro e apportare delle variazioni a una prossima versione del modello di pericolosità. Ad esempio, non è stato valutato l'impatto sulla pericolosità dell'incertezza del modello batimetrico utilizzato per la propagazione dello tsunami, poiché questo compito era al di là degli obiettivi del progetto. A questo riguardo, è stato eseguito solo un controllo qualitativo delle differenze nei risultati di alcuni scenari eseguiti con un modello batimetrico diverso. Questo e altri problemi aperti o altre difficoltà incontrate, sono riportati nella documentazione del progetto TSUMAPS-NEAM, inclusi alcuni altri punti sollevati dai revisori che non sono stati affrontati in ragione dei tempi ristretti del progetto.

Si deve anche rimarcare che la risoluzione e la completezza spaziale del modello sono limitate. Per esempio, i POI, come già detto, hanno una spaziatura media tra loro di circa 20 km; i centri geometrici delle sorgenti sismiche si trovano su una griglia con passo medio di 25 km; altri parametri sono discretizzati in maniera abbastanza ‘grossolana’, per esempio lo strike (direzione della faglia), varia a passi di 45°. Per i dettagli si fa riferimento alla documentazione disponibile sul sito di TSUMAPS-NEAM (<http://www.tsumaps-neam.eu/>).

Essendo la S-PTHA TSUMAPS-NEAM un modello regionale, il suo scopo principale è quello di strumento di *screening* per stabilire le priorità per ulteriori valutazioni locali, a più alta risoluzione, della pericolosità e del rischio. Una valutazione probabilistica della pericolosità di lungo termine a livello regionale per gli tsunami causati da sorgenti sismiche è il primo passo da intraprendere per l'avvio di valutazioni locali e più dettagliate della pericolosità e del rischio e quindi per la gestione del rischio stesso. La regolamentazione e pianificazione costiera, la definizione di codici per le costruzioni e la sicurezza delle infrastrutture critiche dipendono tutte da queste azioni. Il principale vantaggio dell'approccio probabilistico rispetto ai metodi basati su scenari classici è che esso consente agli ingegneri di eseguire un'analisi quantitativa del rischio, spazialmente omogenea, e che i responsabili delle decisioni possono basare le proprie scelte su analisi quantitative costi-benefici e su studi comparativi tra diverse aree.

Rimarchiamo che, se da un lato questo modello è stato sviluppato originariamente con altre finalità, d'altro canto, il modello S-PTHA TSUMAPS-NEAM è, al momento, a nostro avviso, il migliore disponibile per le coste italiane.

Tuttavia, deve essere chiaro che l'applicazione in questione sarà caratterizzata da un'incertezza molto ampia. Queste incertezze sono necessariamente più grandi di quelle di un modello locale ad alta risoluzione, che non dovrebbe e non può essere sostituito da un'analisi su scala regionale con risoluzione inferiore.

L'elaborazione di un modello specifico alla scala nazionale è già in corso e i piani di emergenza dovranno essere necessariamente rivalutati alla luce del nuovo modello.

Alla luce di quanto descritto, è importante concludere con due raccomandazioni generali. Costituisce buona pratica aggiornare periodicamente i modelli di pericolosità alla luce delle nuove conoscenze. Inoltre, qualsiasi riutilizzo del modello per applicazioni di gestione del rischio passa per un processo decisionale necessariamente complesso. Si raccomanda, quindi, di consultare sempre specialisti di pericolosità e rischio.

Bibliografia

- Basili, R., Tiberti, M.M., Kastelic, V., Romano, F., Piatanesi, A., Selva, J. & Lorito, S., 2013. Integrating geologic fault data into tsunami hazard studies, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **13**, 1025–1050.
- Davies, G., Griffin, J., Løvholt, F., Glimsdal, S., Harbitz, C., Thio, H. K., Lorito, S., Basili, R., Geist, E. L., Baptista, A. M. (2017). A global probabilistic tsunami hazard assessment from earthquake sources. In E. M. Scourse, et al. (Eds.), *Tsunamis: Geology, Hazards and Risks*. London: Geological Society of London Spec. Pub., 456. <https://doi.org/10.1144/SP1456.1146>.
- Geist, E. L. and Lynett, P. J.: Source processes for the probabilistic assessment of tsunami hazards, *Oceanography*, **27**, 86–93, 2014.
- Geist, E.L., and Oglesby, D.D., 2014, Tsunamis: Stochastic models of occurrence and generation mechanisms, in Meyers, R.A., *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*: Berlin, Springer, 25 p., doi:10.1007/978-3-642-27737-5_595-1.
- Grezio, A., Babeyko, A., Baptista, M. A., Behrens, J., Costa, A., Davies, G., Geist, E. L., Glimsdal, S., González, F. I., Griffin, J., Harbitz, C. B., LeVeque, R. J., Lorito, S., Løvholt, F., Omira, R., Mueller, C., Paris, R., Parsons, T., Polet, J., Power, W., Selva, J., Sørensen, M., Thio, H. K. (2017). Probabilistic Tsunami Hazard Analysis: Multiple sources and global applications. *Reviews of Geophysics*, **55**. <https://doi.org/10.1002/2017RG000579>.
- Lorito, S., Tiberti, M.M., Basili, R., Piatanesi, A. & Valensise, G., 2008a. Earthquake-generated tsunamis in the Mediterranean Sea: scenarios of potential threats to Southern Italy, *J. geophys. Res.*, **113**, B01301, doi:10.1029/2007JB004943.
- Lynett, P., 2008. Modeling of tsunami inundation. In: Lee, W.H.K. (Ed.), *Encyclopedia of Complexity and System Science*. Springer-Verlag.
- Marzocchi, W. & Jordan, T.H. (2014). Testing for ontological errors in probabilistic forecasting models of natural systems, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **85**, 955–959
- Marzocchi W, Taroni M, Selva J (2015), Accounting for Epistemic Uncertainty in PSHA: Logic Tree and Ensemble Modeling, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **105** (4), doi: 10.1785/0120140131.
- Selva, J., Tonini, R., Molinari, I., Tiberti, M. M., Romano, F., Grezio, A., Melini, D., Piatanesi, A., Basili, R., and Lorito, S.: Quantification of source uncertainties in Seismic Probabilistic Tsunami Hazard Analysis (SPTHA), *Geophys. J. Int.*, **205**, 1780–1803, doi:10.1093/gji/ggw107, 2016.
- Selva J , Costa A, De Natale G, Di Vito MA, Isaia R, Macedonio G (2018), Sensitivity test and ensemble hazard assessment for tephra fallout at Campi Flegrei, Italy , *Volcanol Geotherm Res* **351**, 1-28, DOI:10.1016/j.jvolgeores.2017.11.024.