

Modello di pericolosità TSUMAPS-NEAM

La quantificazione probabilistica della pericolosità da tsunami (PTHA - *Probabilistic Tsunami Hazard Assessment*) si sta affermando come metodo standard (Geist & Lynett, 2014; Grezio et al., 2017).

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 di S-PTHA omogeneo a scala regionale e il più possibile condiviso da un'ampia comunità scientifica, allo scopo di favorire una strategia comune nella gestione del rischio tsunami sulle coste della regione NEAM. Questo modello di pericolosità, pur soffrendo delle limitazioni di un prodotto di recente elaborazione e ottenuto a una scala molto ampia (quella dell'intero bacino del Mediterraneo e dell'Atlantico nord-orientale), è il più avanzato strumento disponibile ad oggi che includa in modo omogeneo come area target l'intera costa italiana e come eventi sorgente l'intero spettro delle sorgenti sismiche ritenute capaci di generare tsunami nel Mediterraneo.

I risultati di TSUMAPS-NEAM (esempio in Figura 1) sono pubblici e disponibili in internet al sito web del progetto (<http://www.tsumaps-neam.eu/>). I risultati utilizzati per gli scopi di queste Indicazioni, consultabili e scaricabili dal sito citato, sono quelli relativi alla *Release* finale del progetto, pubblicata al 31 marzo 2018.

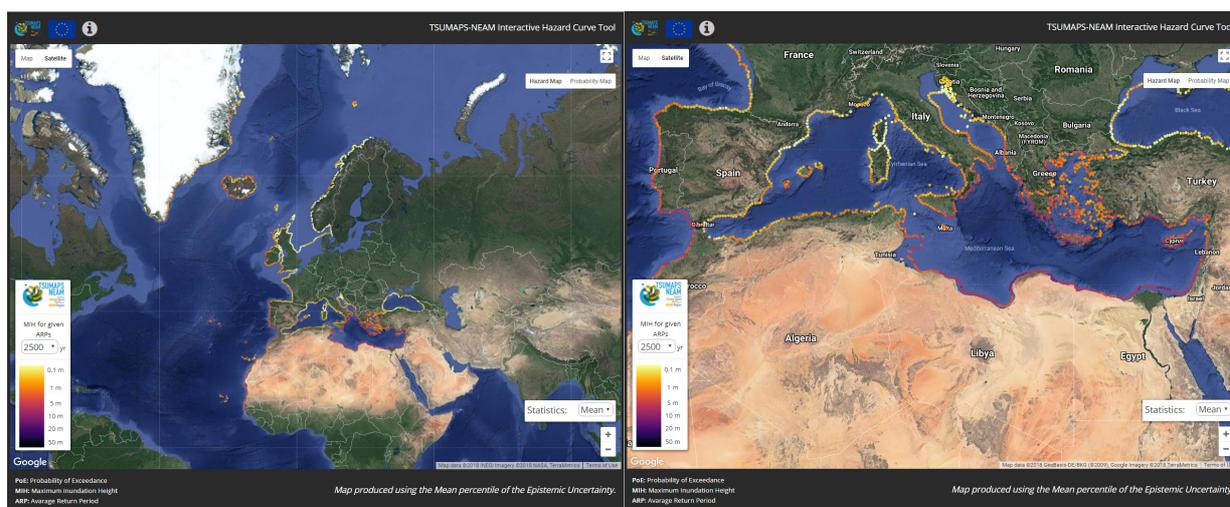


Figura 1 - Estensione completa e zoom alla scala del Mediterraneo della mappa di pericolosità media, per il tempo di ritorno medio di 2500 anni, del modello TSUMAPS-NEAM

La quantificazione del modello di pericolosità TSUMAPS-NEAM è fatta su alcuni POI (Points Of Interest – Punti di interesse), selezionati in mare aperto sulla linea batimetrica dei 50 m e proiettati sulla linea di costa. I POI sono selezionati lungo tutta la costa target ad una distanza di approssimativamente 20 km gli uni dagli altri. Ogni POI viene utilizzato per rappresentare l'intero tratto di costa e l'entroterra nell'intorno della sua proiezione a terra (area *target*).

In ogni POI, il modello di pericolosità, in linea con analoghi studi globali (per es. Davies et al., 2017), utilizza come parametro di intensità per gli tsunami la quantità MIH (*Maximum Inundation Height*), cioè l'altezza massima raggiunta dall'acqua rispetto al livello del mare a riposo (acqua + topografia) su profili ortogonali alla costa, definiti all'interno dell'area target, corrispondente a un tratto di costa lungo in media 20 km. La MIH rappresenta il valor medio dell'intensità attesa lungo il tratto di costa rappresentato da ogni POI.

Ne consegue che i valori di MIH e del *run-up* (massima quota topografica raggiunta dall'inondazione) possono essere localmente anche molto maggiori (3-4 volte) di quelli indicati dal modello di pericolosità.

Il modello di pericolosità TSUMAPS-NEAM fornisce in ogni POI curve di pericolosità che riportano, per diversi valori di MIH la corrispondente probabilità di superamento in 50 anni. Le incertezze nel processo di stima di queste curve sono riportate attraverso diversi percentili. La probabilità di superamento in 50 anni può essere convertita in tempi di ritorno medi. Ad esempio, una probabilità del 2% in 50 anni corrisponde a circa 2475 anni di tempo di ritorno medio.

Al capitolo 1.3 delle presenti Indicazioni si è stabilito di prendere, come valore di intensità di maremoto MIH in ogni POI, il valore corrispondente a un tempo di ritorno medio di 2500 anni sulla curva di pericolosità corrispondente all'84° percentile, che qui indicheremo come MIH_{ref} . Per tenere in considerazione le potenziali variazioni locali di MIH, che possono portare localmente a significativi superamenti del MIH mediato sull'area di costa corrispondente ad ogni POI, a MIH_{ref} deve poi essere applicato un fattore moltiplicativo di sicurezza, indicato con k . Tale coefficiente permette di trasformare MIH in una stima del massimo *run-up* atteso, qui indicato come R_{max} . Per permettere una scelta attendibile di k , TSUMAPS-NEAM ha prodotto una stima della relazione tra MIH medio ed il massimo *run-up* R_{max} in alcune aree rappresentative, attraverso modellazioni di dettaglio di numerosi tsunami con diverse caratteristiche. In base a tale risultato, è stato scelto un valore di k uguale a 3, corrispondente ad un valore superiore al 90° percentile della distribuzione del rapporto tra R_{max} e MIH medio.

Il citato modello di pericolosità TSUMAPS-NEAM è un modello a scala continentale, esteso lungo le coste atlantiche orientali dal nord Africa alla Groenlandia e in tutto il Mediterraneo e ai mari collegati, ed è finalizzato a stabilire priorità per eventuali misure di riduzione del rischio di lungo termine per tutte le coste della regione NEAM. I limiti di un tale modello a scala continentale riguardano, principalmente, la sua risoluzione spaziale, che non permette né l'approfondimento di specifiche aree sorgenti né la risoluzione del dettaglio delle singole coste. La risoluzione è pertanto potenzialmente incrementabile a scala nazionale. Il modello di pericolosità TSUMAPS-NEAM è al momento l'unico e il più avanzato strumento disponibile che copra in maniera uniforme l'intera costa italiana. Sono attualmente in corso studi di approfondimento focalizzati sulle sole coste italiane, basati su una maggiore specificità nella modellazione delle sorgenti di maggior impatto sulle coste italiane. Tale specializzazione potrà portare a revisioni dei valori di pericolosità attualmente proposti. Pertanto, i valori di *run-up* atteso R_{max} sono scelti, per ogni tratto di costa, prendendo il massimo tra diversi valori adiacenti di R_{max} all'interno di un raggio di ~40 km.

Ulteriori dettagli sono specificati nella documentazione, sul sito del progetto TSUMAPS-NEAM e in un documento tecnico presente sul sito web dell'INGV.

BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

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.

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>.

La delimitazione dell'area di inondazione attesa a seguito di un dato evento di tsunami rappresenta uno degli elementi fondamentali per la perimetrazione delle zone di allertamento. È necessario integrare due principali esigenze: da un lato che le zone di allertamento rappresentino l'involuppo di tutte le aree soggette ad inondazione derivanti da tutte le possibili sorgenti note di tsunami indotti da sismi, dall'altro che le mappe siano prodotte con una metodologia facilmente verificabile, ed utilizzabili in tempi rapidi e per l'intero territorio nazionale, in modo che il sistema di allertamento possa essere operativo ed efficace.

Il ricorso a modellazioni numeriche rappresenta, certamente, un approccio valido; tuttavia, esso non è in grado di fornire risultati in tempi brevi, richiedendo lunghi tempi di calcolo e coperture topo-batimetriche di alta risoluzione. Inoltre, l'efficacia del modello deve essere verificata in aree campione rappresentative, dove siano disponibili dati di inondazione misurati con precisione durante eventi recenti. Per tali ragioni, si ricorre, in prima analisi, a metodi di elaborazione che fanno riferimento a modelli empirici di propagazione ed inondazione. Tali modelli sono in grado di fornire risultati in tempi relativamente rapidi e su aree estese, con livelli d'incertezza che possono essere minimizzati adottando opportuni fattori e regole di sicurezza. In tal modo, si possono ottenere in tempi ragionevoli stime conservative, ma allo stesso tempo realistiche, delle aree di potenziale inondazione.

Le mappe d'inondazione e le relative zone di allertamento preliminari sono state definite proprio facendo ricorso ad una metodologia empirica, riconosciuta, validata e utilizzata a livello internazionale, e sono consultabili al seguente link: <http://sgi2.isprambiente.it/tsunamimap/> (Figura 2).

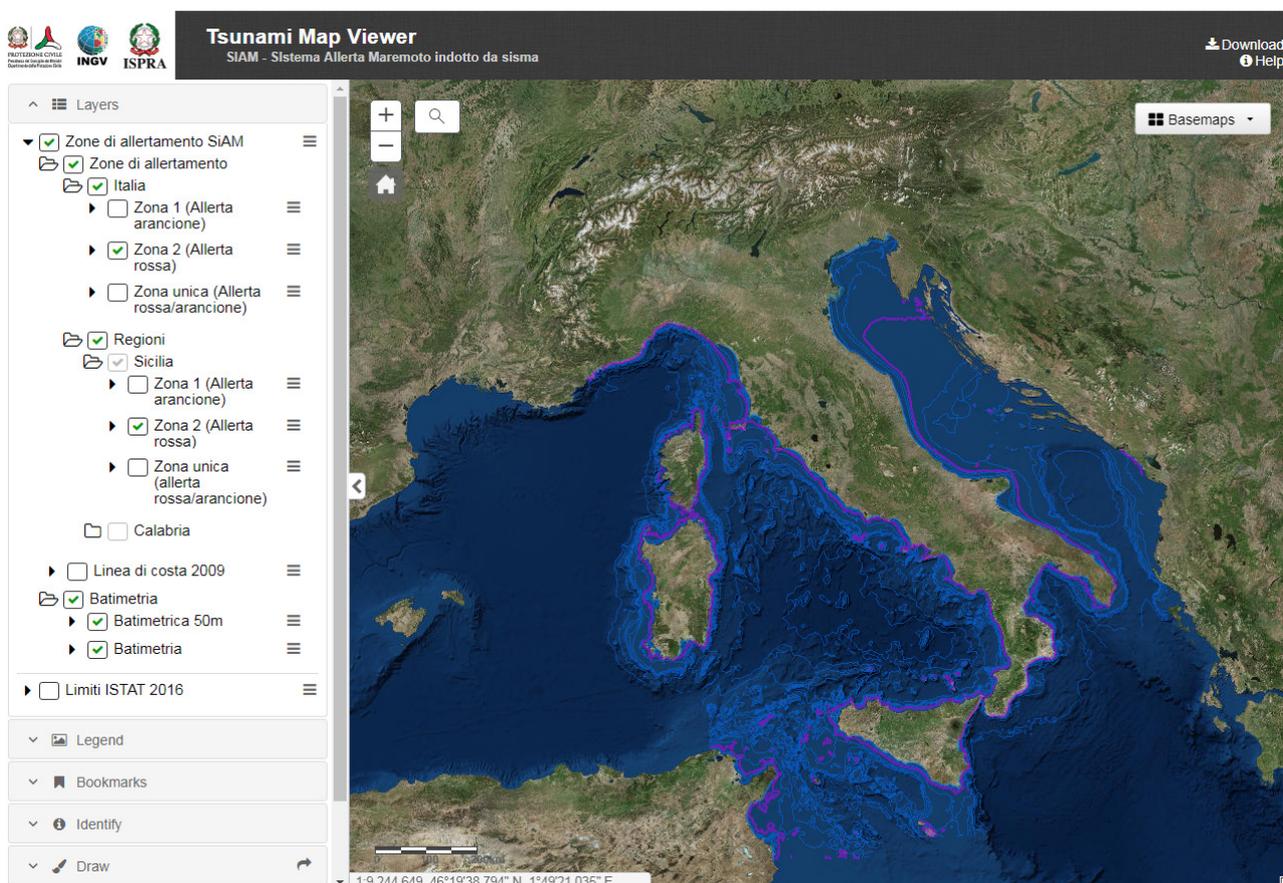


Figura 2 - Schermata del portale ISPRA dedicato alle mappe d'inondazione (Tsunami Map Viewer), dove è possibile visualizzare e scaricare le mappe per l'elaborazione e l'aggiornamento dei piani di protezione civile.

Il modo più semplice per definire l'area inondata è quello di fare riferimento ad un modello idrostatico, sulla base di un valore di *run-up* di scenario stabilito, senza tenere conto della resistenza all'ingressione a terra dell'onda di maremoto opposta dalle asperità del suolo, sia naturali che artificiali. In tal caso l'area inondata è tutta la fascia costiera posta a quota inferiore al *run-up*. Questo approccio è molto rapido e di

facile realizzazione ma, non considerando il processo di attenuazione dell'altezza dell'onda nell'entroterra, può condurre ad una forte sovrastima dell'estensione delle aree inondabili. Pertanto, può essere utilizzato per analisi preliminari su aree vaste e/o come base per orientare le scelte di elaborazioni successive di maggior dettaglio. In questa fase, le mappe d'inondazione sono state elaborate tenendo invece conto in modo empirico del processo di dissipazione dell'energia dell'onda nel suo percorso sulla terraferma (Figura 3). In pratica, il metodo si basa sull'applicazione di una relazione empirica tra *run-up* di scenario e penetrazione a terra, stimata sulla base delle numerose osservazioni condotte a seguito di eventi recenti e storici di tsunami, avvenuti soprattutto nell'area del Pacifico (2004, 2011), ma anche nel Mediterraneo. L'utilizzo di strumenti GIS consente di combinare i modelli topografici delle aree costiere con una relazione empirica di attenuazione dell'ingressione dell'onda, perimetrando le aree inondate per classi di valori di massimo *run-up* di scenario potenziale a costa (Figura 3).

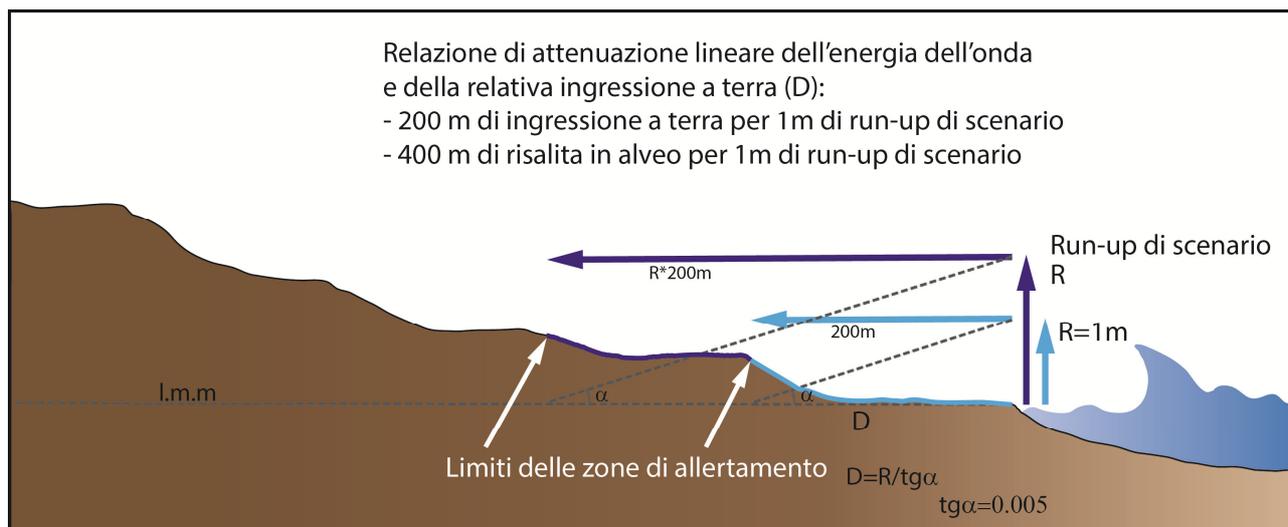


Figura 3 - Sezione trasversale alla costa (non in scala) che mostra come vengono definite le zone di allertamento *Watch* e *Advisory*, per le mappe elaborate applicando una relazione lineare tra il *run-up* (R) stimato per un dato settore costiero (*run-up* di scenario) e la massima distanza di ingressione a terra dell'onda (D). In azzurro e blu sono indicati, rispettivamente, i limiti delle zone di allertamento per i due livelli di allerta *Advisory* e *Watch*.

Tale approccio produce risultati più realistici rispetto al semplice modello idrostatico. Tuttavia, non tiene conto dell'effettivo comportamento fisico dell'onda una volta raggiunta la linea di costa, alquanto complesso per tutta una serie di interferenze delle varie onde con il territorio e le sue infrastrutture, e tra le onde stesse. Nelle modalità con cui viene applicato, il metodo è comunque adeguatamente conservativo, consentendo di definire zone d'inondazione che coprono un'ampia gamma di scenari potenziali.

Inoltre, la tendenza a sovrastimare le aree inondate rende questo approccio valido a favore della sicurezza (cautelativo), anche quando sono disponibili dati topografici e batimetrici di medio-bassa risoluzione verticale. Tale approccio non può essere ancora considerato definitivo, soprattutto per quelle aree particolarmente critiche per la presenza di infrastrutture strategiche, impianti ad elevato impatto per effetto domino, elevata densità di popolazione, etc., dove è opportuno integrare i suoi risultati con studi di dettaglio attraverso modellazioni fisico-numeriche. L'affidabilità dei risultati forniti da tali simulazioni dipende però anch'esso dalla qualità dei dati di *input*, ed è fortemente influenzato dalla capacità del modello numerico utilizzato di riprodurre in modo attendibile l'estrema complessità delle interazioni delle onde di maremoto nella fascia costiera.

Vista la necessità di fornire in tempi rapidi e su aree estese stime conservative, ma allo stesso tempo realistiche, delle aree soggette a potenziale inondazione, si è deciso di adottare in questa fase il metodo descritto di seguito, che segue un approccio consolidato già in uso in altri Paesi (per es. Nuova Zelanda).

Le mappe sono da considerarsi aperte ad affinamenti, sia in funzione del miglioramento della qualità e risoluzione dei dati di base, che delle metodologie di elaborazione. Perciò, pur restando le mappe attualmente fornite del tutto valide ai fini dell'allerta, in futuro i limiti delle zone di allertamento potranno essere resi

ancora più accurati, integrando nuovi e più definiti dati territoriali con modelli numerici e scenari d'inondazione, soprattutto per porzioni di territorio di particolare criticità, sia in termini di pericolosità che di significato strategico degli elementi esposti.

Descrizione del Metodo

Seguendo in particolare l'esempio delle linee guida della Nuova Zelanda (Leonard et al., 2009; MCDEM, 2008, 2016), per le mappe elaborate è stata adottata una funzione di attenuazione della propagazione a terra dell'onda di tipo lineare (Figura 3): sulla base del valore massimo di *run-up* (R) stimato per un dato settore costiero, è stato valutato il corrispondente valore di distanza di ingressione massima (D). La relazione utilizzata prevede 200 m di D per ogni metro di R, applicata a tutte le aree costiere. In corrispondenza delle foci fluviali, per tener conto della risalita in alveo dello tsunami, è stata adottata una legge di attenuazione ridotta, dove a 1 m di R corrispondono 400 m di ingressione lungo l'asta fluviale, mentre lateralmente l'attenuazione considerata è di 1 m ogni 100 m di distanza dall'alveo.

Al momento, non sono state ancora definite regole di attenuazione specifiche per le aree portuali, caratterizzate da condizioni poco dissipative, né regole distinte per l'elaborazione dell'inondazione per le aree dove sono presenti laghi costieri e/o lagune, dove i risultati dei modelli empirici adottati vanno approfonditi con studi specifici.

Le mappe elaborate ed informazioni di dettaglio sono consultabili all'indirizzo <http://sgi2.isprambiente.it/tsunamimap/>.

In via cautelativa, il valore di R ottenuto dalle stime probabilistiche (S-PTHA) è stato corretto in questa fase con l'aggiunta di 1 m, per tenere conto del livello d'incertezza associato ai dati di base utilizzati.

Attraverso strumenti GIS, sono state realizzate carte di inondazione con i criteri suddetti per R pari a 1, 2, 5, 10, 15, 20 e 25 m. Altezze di *run-up* ancora superiori sono possibili per situazioni locali ed eventi estremi (eruzioni vulcaniche, frane sottomarine), che non sono però oggetto del presente studio, riferito specificatamente al maremoto causato da eventi sismici e per l'intera estensione delle coste italiane.

Le zone di allertamento elaborate su base nazionale attraverso il DEM TINITALY hanno permesso una valutazione di massima dell'estensione territoriale delle aree coinvolte e una stima preliminare dell'esposizione delle aree urbanizzate e della popolazione. Tali mappe, visualizzabili sullo Tsunami Map Viewer (<http://sgi2.isprambiente.it/tsunamimap/>), non sono tuttavia adatte, per i limiti intrinseci di accuratezza e risoluzione, per l'elaborazione e l'aggiornamento dei piani di protezione civile a livello locale.

È in corso di realizzazione una perimetrazione di maggior dettaglio ed accuratezza delle zone di allertamento mediante l'utilizzo di DTM (*Digital Terrain Model*, modelli digitali del terreno) a elevata risoluzione, in funzione della loro disponibilità presso le varie Regioni.

Le suddette mappe regionali, disponibili per la consultazione ed il *download* sullo Tsunami Map Viewer, sono quelle da utilizzare per gli aggiornamenti dei piani di protezione civile. In futuro, anche queste mappe potrebbero essere soggette a modifiche ed integrazioni se saranno disponibili dati di maggior dettaglio e risoluzione e per situazioni di particolare criticità. Le stesse mappe sono anche aperte ad analisi e controllo da parte degli Enti locali e degli utilizzatori del dato e, pertanto, potrebbero subire modifiche a seguito del recepimento delle eventuali osservazioni.

Le mappe possono mostrare localmente una non perfetta coincidenza con la linea di costa attuale, conseguenza del fatto che il tracciato della linea di costa più recente ed utilizzabile per i calcoli è aggiornata all'anno 2009. In questi casi, va fatto riferimento alla linea d'inondazione a terra considerando tutta inondata e quindi compresa nelle fasce di allertamento l'area compresa tra di essa e la linea di costa effettiva.

I dati di base disponibili a copertura nazionale e pertanto utilizzati (dati morfologici, tracciato della linea di costa, DTM, foto aeree, cartografie, reticolo idrografico, etc.) presentano dei limiti d'informazione, legati alla scala, metodologia e periodo di acquisizione, alla risoluzione e ai formati di rilascio e possibilità di utilizzo. Inoltre, essi rappresentano il suolo in forma statica, ad una certa data, mentre l'evoluzione del territorio può essere significativa, soprattutto nei settori costieri, particolarmente dinamici sia per processi naturali che antropici. Per questi motivi, le mappe di inondazione da tsunami andranno regolarmente aggiornate con successive revisioni, integrazioni e miglioramenti. Allo stato attuale, esse rappresentano le migliori informazioni, per risoluzione, attendibilità e carattere conservativo (tendenza a sovrastimare le aree

di potenziale inondazione), a livello nazionale, sulla base dei dati disponibili. È implicito che l'esattezza e l'affidabilità dei dati d'inondazione possono essere migliorati significativamente per scale di estremo dettaglio (livello comunale, aree portuali, brevi settori costieri), utilizzando modelli digitali del terreno a risoluzione sub-metrica, anche applicando vari metodi di simulazione numerica.

Gli utenti delle mappe messe a disposizione devono considerarne attentamente la natura e le finalità nell'ambito del SiAM. Sebbene quindi esse forniscano indicazioni utili anche in ambito di stime di rischio e di pianificazione a scala locale, le finalità di pianificazione costiera a tale scala devono essere perseguite per quanto possibile con strumenti e dati territoriali adeguati alla risoluzione necessaria.

BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

Fraser, S. A. and Power, W. L. (2013) - Validation of a GIS-based attenuation rule for indicative tsunami evacuation zone mapping. GNS Science Report 2013/02. Lower Hutt. 21 p.

Leonard, G. S., Power, W. L., Lukovic, B., Smith, W. D., Johnston, D. M., Langridge, R., and Downes, G. (2008) - Interim tsunami evacuation planning zone boundary mapping for the Wellington and Horizons regions defined by a GIS-calculated attenuation rule. GNS Science Report 2008/30. Lower Hutt, New Zealand. 22p.

MCDEM (2008) - Tsunami Evacuation Zones - Director's Guideline for Civil Defence Emergency Management Groups [DGL 08/08]. December 2008 ISBN 978-0-478-25483-9. Published by the Ministry of Civil Defence & Emergency Management – New Zealand

MCDEM (2016) - Tsunami Evacuation Zones- Director's Guideline for Civil Defence Emergency Management Groups [DGL 08/16] February 2016 . ISBN 978-0-478-43515-3. Published by the Ministry of Civil Defence & Emergency Management – New Zealand

Tarquini S., I. Isola , M. Favalli , F. Mazzarini, M. Bisson, M.T. Pareschi, E. Boschi (2007) - TINITALY/01: a new Triangular Irregular Network of Italy, Annals of Geophysics, 50, 407-425.

Wright, K. C. (compiler), Beavan, R. J., Daly, M. C., Gale, N. H., Leonard, G. S., Lukovic, B., Palmer, N. G., et al. (2011) - Filling a critical gap in end-to-end tsunami warning in the Southwest Pacific: a pilot project in Samoa to create scientifically robust, community-based evacuation maps. GNS Science Report 2011/53. Lower Hutt, New Zealand. 140p.