



Tsunami

“Tsunami” e’ una parola giapponese che significa “onda nel porto”. Nel passato gli tsunami venivano anche chiamati “onde di marea” e “ onde di mare sismiche”. Entambe le terminologie non sono corrette. Gli tsunami non sono infatti connessi alle maree (che sono il risultato dell’influenza gravitazionale di corpi extraterrestri), anche se il grado di impatto di uno tsunami sulla linea di costa dipende dal livello della marea al momento in cui lo tsunami colpisce. Anche il termine onde di mare sismiche non e’ corretto in quanto esso implica un meccanismo di formazione degli tsunami legato ai terremoti, e questo non e’ sempre il caso in quanto gli tsunami possono essere generati anche da frane, eruzioni vulcaniche, caduta di meteoriti.



Fig.1 - Lo tsunami che il 16 Giugno 1964 distrusse il porto di Niigata (Giappone) fu innescato dal movimento del fondo marino provocato da un terremoto di Magnitudo 7.5.
Foto tratta dal sito: <http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/quakes/niigata>

Uno tsunami e’ un’onda di acqua, caratterizzata da una lunghezza d’onda molto grande, generata da una improvvisa importante dislocazione del fondo marino associata con un forte terremoto, una grande frana

sottomarina, un'esplosione vulcanica. La natura improvvisa del fenomeno e la sua dimensione lo rendono estremamente pericoloso per le comunità costiere.

Come tutte le onde, anche gli tsunami sono caratterizzati da lunghezza d'onda, ampiezza d'onda, altezza d'onda, frequenza (o periodo) e velocità (Fig.2)



Fig.2 - grandezze caratteristiche di un'onda

La **lunghezza d'onda** è la distanza tra due punti posti in uguale posizione sull'onda (per esempio le creste o le fosse). La lunghezza d'onda delle onde oceaniche "normali" è dell'ordine dei 100 metri, quella degli tsunami arriva a 200 km.

L'**altezza d'onda** è la distanza tra il punto più alto e il punto più basso dell'onda.

L'**ampiezza d'onda** si riferisce all'altezza dell'onda sulla linea di mare calmo (in genere = 1/2 della lunghezza d'onda).

Frequenza (o periodo) è il tempo necessario al passaggio di una intera lunghezza d'onda da un punto stazionario.

La **velocità** delle normali onde oceaniche ha valori di 90 km/ora, mentre gli tsunami possono raggiungere velocità 10 volte maggiori. Ovviamente, la velocità di un'onda è uguale alla lunghezza d'onda divisa per il periodo: $V = l/P$.

Tra tsunami e le normali onde che siamo abituati a vedere sulle spiagge vi sono differenze sostanziali. Queste ultime sono generate dal vento che soffia sulla superficie del mare ed hanno periodi di 5-20 secondi e lunghezze d'onda di 100-200 metri. Uno tsunami può avere periodi variabili tra 10 minuti e due ore e lunghezze d'onda superiori ai 500 km. Diversamente dalle onde normali, che interessano spessori modesti di acqua, gli tsunami sono caratterizzati dal fatto che la forma d'onda si estende all'intera colonna d'acqua compresa tra la superficie e il fondo del mare. È questa la caratteristica che dà conto della grande quantità di energia trasmessa da uno tsunami.

Un'onda è classificata come **onda di acqua bassa** quando il rapporto tra la profondità dell'acqua e la lunghezza d'onda è molto basso. Con questa definizione gli tsunami sono quindi caratterizzabili come onde di acqua bassa. La velocità di queste onde (in m/sec) è anche uguale alla radice quadrata del prodotto tra la profondità dell'acqua (in m) e l'accelerazione di gravità (9.8 m/sec/sec).

La velocità con la quale un'onda dissipa la propria energia è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda e di conseguenza gli tsunami perdono pochissima energia nel corso della loro rapidissima propagazione. Quando uno tsunami lascia le acque profonde del mare aperto e si avvicina alle acque basse vicino alla costa, esso subisce una trasformazione: dal momento che è legata alla profondità, la velocità diminuisce, ma l'energia totale dell'onda non cambia così come non cambia il periodo. Ugual periodo e minor velocità significano lunghezza d'onda più corta. Ma lunghezza più corta e ugual energia significano maggiore altezza dell'onda (fig.3). A causa di questo "effetto secca" uno tsunami che era quasi impercettibile in alto mare può arrivare con onde altissime sulla costa.

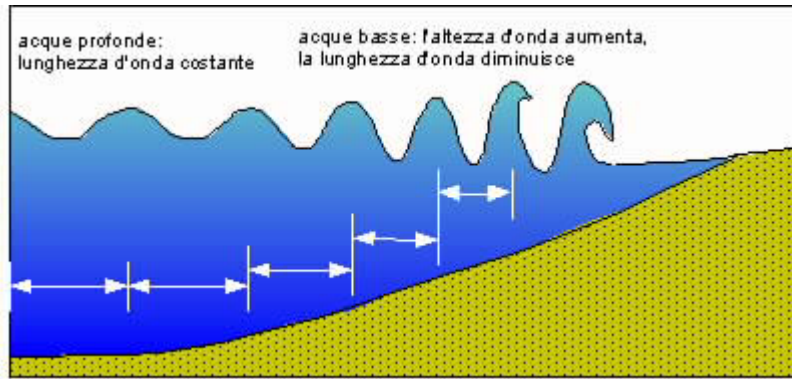


Fig.3 – L'effetto secca" che induce l'innalzamento dell'altezza delle onde di tsunami avvicinandosi alla costa. Ridisegnato e modificato da

Se il ventre dell'onda di tsunami raggiunge prima la costa, questo provoca un fenomeno di brutale abbassamento del livello del mare ("drawdown"), che appare ritirarsi verso il largo. Il drawdown è velocemente seguito dall'arrivo della cresta dell'onda che induce l'innalzamento del livello del mare ("run-up"). Il run-up è in genere espresso in metri al di sopra del livello normale di alta marea e, per una stessa onda di tsunami, può variare da punto a punto della costa investita in funzione delle sue morfologia e batimetria.

L'area inondata da uno tsunami può estendersi nell'entroterra per centinaia di metri, devastando vastissime superfici. Da considerare che, nel ritirarsi verso il mare, l'onda di ritorno porta verso il largo gran parte del materiale investito sulla costa. Le massime altezze dell'onda di tsunami osservate immediatamente prima di infrangersi sulla costa sono dell'ordine dei 30 metri, ma l'onda di più alta di cui si ha notizia raggiunse forse i 60 metri, associata a uno tsunami, generato da una frana, che si rovesciò nella baia di Lituya, in Alaska, nel 1958 (vedi appendice 1). Nonostante la sua velocità, la grande lunghezza d'onda degli tsunami rende molto lungo il periodo di queste onde. Può così succedere che tra l'arrivo di un'onda e la successiva passino molti minuti e che l'intero tsunami duri alcune ore. Non vi è regola sulla dimensione delle onde che si susseguono, e non sempre la prima è la più grande.

Come si generano gli tsunami

Nel bacino del Pacifico si verificano, in media, un paio di tsunami distruttivi per anno e un grande, catastrofico tsunami ogni 10-12 anni. Molti di questi sono il risultato di terremoti, ma all'origine di uno tsunami ci può essere qualsiasi fenomeno capace di provocare lo spostamento di porzioni importanti del fondo marino: eruzioni vulcaniche, frane, esplosioni sottomarine, impatto di meteoriti.

Terremoti – I terremoti con epicentro in mare o in aree costiere possono causare la formazione di tsunami inducendo spostamenti significativi del fondo marino. La dimensione del terremoto è in genere legata alla magnitudo del terremoto, ma è molto importante il senso del movimento, in quanto gli tsunami sono per lo più generati da spostamenti verticali (sollevamento o sprofondamento). Movimenti di tipo trascorrente (con piano di faglia verticale) hanno minore capacità di generare maremoti e, in linea di principio, questi sono associati solo ai terremoti con meccanismo focale di faglia normale o inversa.

Eruzioni vulcaniche – I vulcani subaerei che si trovano lungo le zone costiere e i vulcani sottomarini possono indurre la formazione di tsunami in diversi modi. Le eruzioni esplosive di vulcani subaerei possono comportare la formazione e lo scorrimento di colate piroclastiche e colate di fango di grandi dimensioni il cui ingresso in mare può comportare lo spostamento rapido di masse d'acqua consistenti. La formazione di tsunami sarà più probabile nel caso di collassi strutturali del vulcano

(sprofondamenti calderici dopo grandi eruzioni esplosive) o di grandi valanghe di detrito sul tipo di quella che ha segnato l'inizio dell'eruzione del Monte St Helens (USA) nel 1980.

Frane – Movimenti franosi di qualsiasi origine, purché di grandi massa e velocità, soprattutto quando interessano specchi d'acqua relativamente chiusi (baie, laghi), sono capaci di generare tsunami

Esplosioni sottomarine – Gli esperimenti nucleari effettuati dagli USA nelle isole Marshall negli anni 40 e 50 generarono modesti tsunami.

Impatto di meteoriti – Non sono conosciuti esempi osservati o storicamente riportati di tsunami generati dall'impatto di meteoriti, ma gli studi geologici hanno dimostrato che l'impatto di un asteroide sulla punta della penisola dello Yucatan alla fine del Cretaceo abbia prodotto gigantesche onde di tsunami i cui depositi sono stati ritrovati ben all'interno del continente lungo tutto il golfo del Messico.

Esempi nell'Oceano Pacifico

Il primo Aprile del 1946 un terremoto di magnitudo 7,3 si verificò nei pressi della fossa delle Aleutine, vicino all'isola di Unimak, a Ovest dell'Alaska. Grandi volumi di sedimenti furono mobilizzati, franarono nella fossa e generarono uno tsunami. A Scotch Gap c'era un faro in cemento armato e acciaio, costruito sulla costa a 14 metri s.l.m.. La prima onda di tsunami aveva un run-up di 30 metri, essa colpì l'area di Scotch Gap 20 minuti dopo il terremoto e distrusse totalmente il faro. Quattro ore e mezzo più tardi lo tsunami raggiunse le isole Hawaii viaggiando alla velocità media di 659 km/ora. Al momento in cui l'onda investì la cittadina di Hilo (sull'isola di Hawaii, la più grande dell'arcipelago, figg. 4 e 5) essa aveva ridotto la sua velocità a 47 km/ora, ma aveva un run-up di 18 metri. Lo tsunami fece complessivamente 159 vittime, 90 delle quali a Hilo.



Fig.4 - Lo tsunami generato nelle isole Aleutine il primo Aprile 1946, dopo circa 4 ore e mezzo si abbatte su una spiaggia dell'isola di Hawaii, a circa 3.000 Km di distanza dal luogo di origine. Foto: Mrs. Harry A. Simms, Sr. (NOAA-National Geophysical Data Center, Boulder, Colorado).

Fig.5 – Ancora lo tsunami del primo Aprile 1946 si infrange sul molo di Hilo, Hawaii. L'uomo in basso a sinistra è una delle 159 vittime. La foto fu scattata dalla nave Brigham Victory che era nel porto al momento del maremoto e riuscì con i motori a tutta forza a evitare di essere sbattuta in banchina. Foto: NOAA-National Geophysical Data Center, Boulder, Colorado/EDIS.



Il 22 Maggio 1960 un terremoto di Magnitudo (Mw) 9,5, il piu' forte mai registrato strumentalmente, si verifico' lungo la zona di subduzione al largo del Cile meridionale. La sequenza di scosse duro' alcuni giorni e la fratturazione interessò una segmento di faglia lungo 1000 km, una delle piu' lunghe mai registrate. La prima scossa (il "main shock") innesco' uno tsunami, la cui prima ondata investì la costa del Cile con un run-up di 4,5 metri 15 minuti dopo il terremoto. Oltre allo tsunami diversi altri fenomeni geologici si verificarono in associazione col terremoto: fenomeni di subsidenza a grande scala, alterazioni permanenti della linea di costa, frane. Il vulcano Puyehue entro' in eruzione 47 ore dopo il main shock. Il numero totale delle vittime non e' mai stato definito con precisione: esso varia tra 500 e oltre 5000.



Fig.6 - Inondazione della città di Valdivia (Cile) durante lo tsunami del Maggio 1960. Si notino le case danneggiate e l'argine del fiume e il lungofiume sommersi. L'altezza dello tsunami in questa zona fu di circa 10 metri. Photo credit: Pierre St. Amand, dal sito: <http://www.ngdc.noaa.gov>



Fig.7 - La nave al centro della foto fece naufragio sull'isola Mocha (a nord della città di Valdivia) in conseguenza dello tsunami del Maggio 1960. Notare l'arretramento della spiaggia e le frane in alto a sinistra. Sulle coste dell'isola Mocha il run-up dello tsunami fu di 25 metri. Photo credit: Pierre St. Amand, dal sito: <http://www.ngdc.noaa.gov>

Sulle coste del Cile lo tsunami ebbe almeno tre onde distruttive, arrivate a distanza di un'ora e piu' una dall'altra. Nel complesso ci furono quasi 1000 morti e altrettanti dispersi. Nell'arcipelago delle Hawaii funzionava già un sistema di allarme e lo tsunami era atteso per le 9.57. Esso fu puntualissimo (9.58) e fece anche qui 61 vittime, tutti curiosi di osservare da vicino (evidentemente troppo!) il fenomeno. Lo tsunami procedette attraverso il Pacifico e raggiunse il Giappone dove fece altre 185 vittime.

Il terremoto dell'Alaska del 27 Marzo 1964 (il "Good Friday Earthquake") ebbe una magnitudo 8,5 Richter e, come abbiamo già discusso nelle pagine precedenti, fu associato a forti deformazioni superficiali, con movimenti verticali dell'ordine di 2-3 metri. In queste condizioni la generazione di uno tsunami fu praticamente automatica ma, data la bassa densità di popolazione delle coste dell'Alaska, il numero delle vittime fu relativamente modesto (122). Sulle coste della California era funzionante un sistema di allarme da tsunami e le zone interessate furono evacuate preventivamente con danni contenuti. Nella cittadina di Crescent City, però, dopo aver visto succedersi quattro grandi ondate, diversi abitanti ritennero di poter rientrare per valutare i danni e recuperare qualcosa. Sfortunatamente il fenomeno non si esaurì e la quinta onda fu anche la più grande (oltre 6 metri di run-up) e uccise 12 persone.

Un terremoto di magnitudo 7 si verificò il 2 Settembre 1992 al largo delle coste pacifiche del Nicaragua. Il terremoto era ovviamente legato alla subduzione di litosfera oceanica lungo la Fossa del Centro America. In due minuti un segmento di 100 km si spostò di un metro lungo il piano di Benioff, liberando una enorme quantità di energia che, in gran parte, fu trasferita all'acqua, generando uno tsunami che si abbatté con breve preavviso sulle coste nicaraguesi. I morti furono 150 e i senza tetto 13.000.

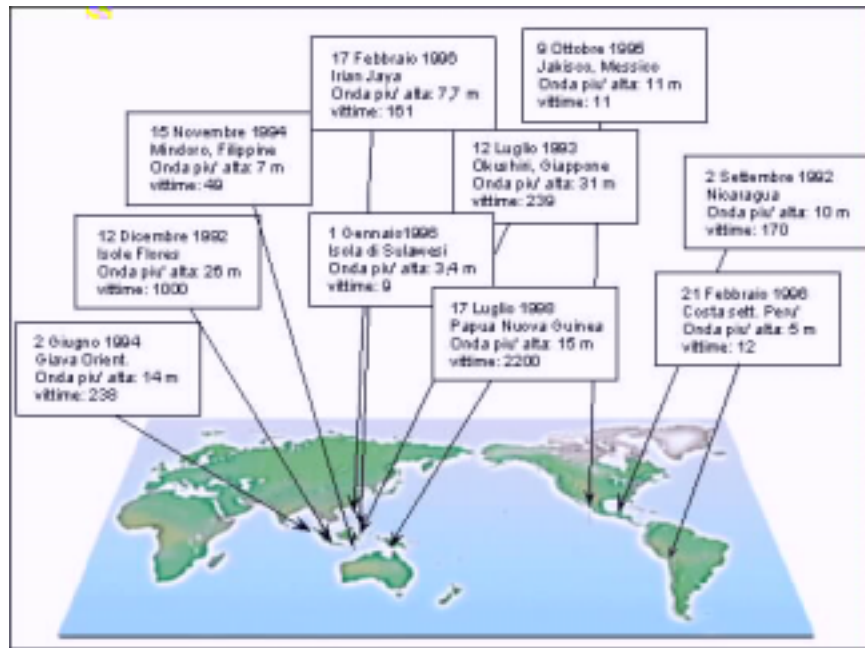


Fig.8 - Dal 1990 al 1998 gli tsunami hanno provocato sulle coste del Pacifico la morte di oltre 4.000 persone. Tratta dal sito: <http://www.scientificamerican.com/1999/0599issue/0599gonzalezbox1.html>

Esempi di Eruzioni tsunamigeniche

Krakatau 1883 - La grande eruzione pliniana del 1883 del Krakatau nello Stretto della Sonda, tra Giava e Sumatra, dette origine ad almeno tre tsunami che, complessivamente, fecero oltre 36.000 vittime. Uno dei tre ebbe un run-up di circa 40 metri al di sopra del normale livello del mare e fu capace di trasportare per 100 metri nell'entroterra un blocco di corallo del peso di 600 tonnellate. Un veliero fu trasportato sulla terraferma per un tratto di 2,5 chilometri, prima di essere abbandonato a una quota di 24 metri, avendo perso l'intero equipaggio in mare aperto. Le cause specifiche dei tre tsunami sono ancora oggetto di discussione, dal momento che nel corso dell'eruzione furono diversi i fenomeni capaci potenzialmente di generare uno tsunami: (1) colate piroclastiche - l'imponente colonna eruttiva che si innalzò fino a più di 40 km, trasportando in alta atmosfera miliardi di tonnellate di cenere e pomice fu soggetta a diversi collassi con formazione di colate piroclastiche, ciascuna delle quali era probabilmente sufficientemente grande da poter generare uno tsunami; (2) esplosione freatomagmatica - una fragorosa esplosione, udita anche in Australia, si verificò nel corso dell'eruzione, probabilmente alla fine della fase di colonna sostenuta, e fu, secondo molti studiosi, dovuta alla violentissima interazione tra magma e fluidi non magmatici (acqua di mare? fluidi idrotermali? acqua freatica?) che potrebbe aver innescato uno tsunami; (3) collasso calderico - nelle fasi terminali, ma ancora violentissime, dell'eruzione lo svuotamento della camera magmatica superficiale indusse il collasso strutturale del vulcano con conseguente formazione di una grande caldera e possibile innesco di tsunami; (4) terremoti - tutta l'eruzione fu accompagnata da violenti terremoti sottomarini, alcuni dei quali potrebbero aver avuto capacità di generare uno tsunami.

Santorini 1650 a.C. - L'eruzione di Santorini (o Thera), in Grecia, del 1650 a.C. e' stata una delle piu' grandi degli ultimi 10.000 anni. Circa 30 km³ di magma dacitico vennero eruttati nel corso di una eruzione esplosiva polifasata nel corso della quale si ebbe il collasso del vulcano e l'allargamento della caldera che si era formata nel corso della storia eruttiva precedente. Tsunami furono certamente associati all'eruzione e raggiunsero le coste delle isole vicine e del continente. Creta fu l'isola probabilmente piu' gravemente danneggiata tanto da far supporre che la fine della civiltà minoica sia da imputare alle distruzioni connesse con l'eruzione. E' questo il motivo per il quale l'eruzione del 1650 a.C. e' detta "Minoica".



Fig.9 -

Tsunami innescati da frane

La baia di Lituya, situata all'interno del Glacier Bay National Park, lungo la costa sudorientale dell'Alaska, vicino al confine col Canada (fig.10), e' stata il sito di uno dei piu' grandi tsunami mai osservati dall'uomo. Nella notte del 7 Luglio 1958 un terremoto di magnitudo 8 provoco' il distacco di una grande frana che si rovescio' nelle acque della baia inducendo la formazione di una immane onda di tsunami.



Fig.10 - La baia di Lituya (Alaska)

La frana (di scivolamento) avvenne lungo la parete orientale della Gilbert Inlet. L'urto della massa di roccia sulla superficie dell'acqua produsse un immenso spruzzo che scaravento' l'acqua fino a quote di oltre 500 metri (1720 piedi) dalla parte opposta dell'insenatura (fig.). Questa ondata iniziale strappo' tutta la vegetazione e' lascio' la roccia nuda a marcare l'altezza raggiunta (fig.11).

Oltre all'enorme spruzzo iniziale, la frana indusse la formazione di un grande tsunami che spazzo' tutta la baia raggiungendo altezze certamente superiori ai 35-40 e, forse, fino a 60 metri alla testa della baia. I pochi battelli che erano ancorati nella baia furono travolti e alcuni degli occupanti persero la vita. Lo tsunami inondo' circa 13 km² di territorio lungo le coste della baia penetrando per oltre un chilometro sulla terra ferma.



Fig.11 - La frana del 1958 nella baia di Lituya e ben visibile in alto nella foto. Chiarissima e' anche la traccia dell'ondata sul bordo dell'insenatura prospiciente la frana, marcata dalla totale assenza di vegetazione.



Fig.12 La foto fornisce una panoramica dell'intera Lituya Bay vista da Ovest. Le aree non coperte dalla foresta che circondano la baia marcano l'estensione approssimativa del run-up dello tsunami.

Tsunami nel Mediterraneo

Benche' non cosi' frequenti e distruttivi come nel Pacifico, gli tsunami sono stati nel passato, e presumibilmente saranno nel futuro, un fenomeno non insolito anche nel Mediterraneo. Nel Mediterraneo Orientale su un totale di 613 forti terremoti documentati storicamente, almeno 41 generarono tsunami, 16 dei quali distruttivi, la maggior parte dei quali originati dalla regione dell'arco ellenico comprendente l'isola di Santorini.

Nel 365 uno tsunami, dopo aver devastato la costa di Creta, raggiunse il delta del Nilo e Alessandria d'Egitto ove molte imbarcazioni furono trascinate fin nel centro della citta' e lì lasciate.

Nel Settembre 1650, a seguito di un forte terremoto accompagnato da un'esplosione del vulcano sottomarino Colombo, a nord-est di Santorini, si genero' uno tsunami con onde di 16 metri che devasto' le coste di Ios, un'isola delle Cicladi a nord di Santorini.

Piu' recentemente, nel Luglio del 1956, uno tsunami generato da terremoto colpì con onde di 20-25 metri le isole di Amorgos (dove fece 53 vittime) e di Astypalea.

Gli tsunami in Italia.

La maggior parte degli tsunami che si sono verificati in Italia, e comunque tutti i piu' forti (1693, 1783 e 1908), hanno colpito le coste dell'Italia Meridionale, in particolare quelle della Calabria e della Sicilia.

Il terremoto di Val di Noto (Sicilia Orientale) dell'11 Gennaio 1693 ($M = 6.8$, $I = XI$ MCS) causo' la morte di circa 70.000 persone e la distruzione totale di numerosi paesi nelle province di Siracusa, Ragusa and Catania. Un forte tsunami di intensita' 4 nella scala Ambraseys-Sieberg colpì la costa siciliana tra Augusta e Messina: moltissimi battelli furono trascinati in secco e diversi grossi velieri rischiarono il naufragio. L'acqua di mare danneggiò severamente il monastero di San Domenico a Augusta.

Nel Febbraio del 1783 la Calabria fu interessata da una delle piu' violente e lunghe crisi sismiche degli ultimi 2000 anni. Il 5 Febbraio si verifico' il primo terremoto che danneggiò circa 400 paesi e provoco' 25.000 vittime, quasi tutte dovute agli incendi divampati a Messina. Al terremoto fece seguito uno tsunami di intensita' 3. A Messina, Reggio Calabria, Roccella Ionica, Scilla e Catona le strade furono allagate e il mare entro' per circa 1500 metri sulla terraferma. Il 6 Febbraio ci fu una seconda violenta scossa cui seguì uno tsunami disastroso (intensita' 6). Il fenomeno fu probabilmente innescato

dal rapido distacco, provocato dal terremoto, e lo scivolamento in mare di una grossa porzione del Monte Paci. A Scilla la maggior parte della popolazione, impaurita dalle scosse sismiche, era scappata sulla spiaggia, dove fu sorpresa dall'onda di tsunami il cui run-out massimo e' stato valutato a 9 metri. Le vittime furono piu' di 1500.

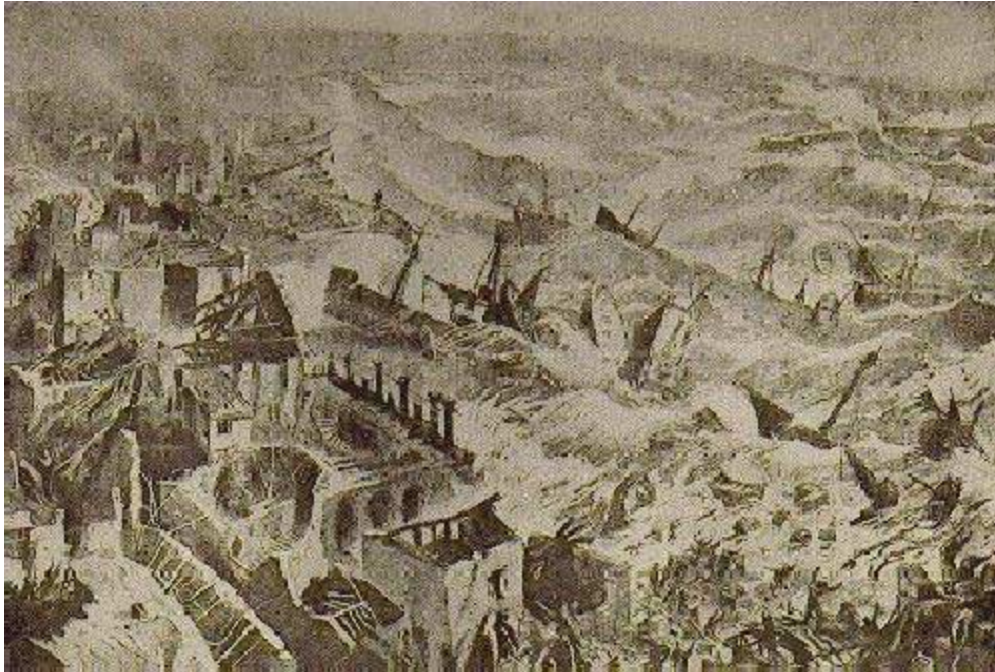


Fig.13 – Immagine artistica dello tsunami che devasto' la costa di Messina immediatamente dopo il terremoto del 28 Dicembre 1908. Da: J. Martin Miller's The Complete Story of the Italian Earthquake Horror, (Copyright, 1909 by J. T. Moss), P.41. Immagine tratta dal sito: <http://www.arduini.net/tales/tales15j.htm>

Uno dei terremoti piu' forti mai avvenuti in Italia e' quello dello stretto di Messina del 28 Dicembre 1908. Esso causo' la distruzione pressoché totale di Messina e di Reggio Calabria, oltre a quella di numerosi altri paesi e centri minori. Il terremoto produsse il piu' violento tsunami mai verificatosi in Italia. Ovunque il primo fenomeno osservato fu un marcato ritiro del mare durato alcuni minuti, seguito da inondazioni connesse ad almeno tre grosse ondate. Un rilevamento effettuato immediatamente dopo l'evento permette di avere una valutazione abbastanza precisa delle caratteristiche del fenomeno e dei danni che esso causo'. Lo tsunami raggiunse la sua massima intensita' (6 nella scala Ambraseys-Sieberg) a Pellaro, Lazzaro e Gallico sulla costa calabra e a Riposto, Briga e Paradiso sulla costa siciliana. Il runup massimo fu misurato a S.Alessio (11,70 m) e a Pellaro (13 m) sulle coste siciliana e calabra rispettivamente. In molti altri posti le onde raggiunsero altezze di 8-10 metri. I morti per lo tsunami furono diverse centinaia e gran parte delle abitazioni situate vicino alla spiaggia andarono completamente distrutte.

L'ultimo tsunami in ordine di tempo verificatosi sulle coste italiane è stato generato a Stromboli, ai piedi della Sciara del Fuoco, il 30 Dicembre 2002 da frane, probabilmente in parte sottomarine, connesse all'emissione di colate di lava. Il runup massimo è valutabile sui 5-6 metri sulla costa nordoccidentale dell'isola e sui 2-3 metri sulle isole più vicine (Panarea). L'evento è stato modesto e, fortunatamente, i danni sono stati limitati (in stagione estiva i problemi sarebbero stati molto maggiori) ma esso ha portato l'attenzione degli studiosi e della Protezione Civile su un fenomeno geologico che, pur nella sua bassa frequenza, nel basso Tirreno potrebbe comportare danni molto significativi. Stromboli in particolare, per ragioni morfologiche, sembra potenzialmente soggetto a collassi

gravitativi di ampi settori dei suoi fianchi (“collassi di settore”). Il settore nordoccidentale dell’isola ha subito almeno tre collassi importanti (volumi di 1-3 km³) negli ultimi 13.000 anni, l’ultimo dei quali ha avuto luogo tra 2.000 e 5.000 anni or sono, dando origine alla Sciara del Fuoco (fig.14).



Fig.14. La Sciara del Fuoco a Stromboli. Foto tratta dal sito: <http://www.educeth.ch/stromboli>

Mitigazione della Pericolosità e del Rischio

I danni principali che gli tsunami sono capaci di arrecare sono connessi alla natura distruttiva delle onde. Effetti secondari sono rappresentati dai detriti scagliati come proiettili dall’onda, dall’erosione rapida che può compromettere le fondamenta delle costruzioni, dagli incendi che possono essere conseguenza della distruzione delle linee elettriche e delle condutture del gas. Gli effetti terziari riguardano la possibilità di compromettere la fertilità dei terreni e la potabilità delle falde acquifere.

Nell’ultimo secolo sono stati registrati 94 tsunami distruttivi che hanno complessivamente provocato la morte di 51.000 persone.

Tab. 1 - Scala di Ambraseys-Sieberg di intensità degli tsunami

I - molto debole	Onda percettibile solo dai mareografi
II - debole	Onda avvertita da persone che vivono vicino alla spiaggia e hanno familiarità col mare. Osservata solo su spiagge molto piatte
III - abbastanza forte	Onda avvertita da tutti. Inondazione di coste a dolce pendenza. Piccole imbarcazioni spinte sulla spiaggia. Modesti danni alle strutture leggere vicino alla costa. Negli estuari inversione della corrente dei fiumi.
IV - forte	Inondazione delle spiagge fino a una altezza definita caso per caso. Leggera erosione dei terreni non consolidati. Danni alle strutture leggere prossime alla riva. Piccoli danni alle strutture in muratura sulla costa. Insabbiamento di imbarcazioni o loro trascinarsi al largo. Detriti galleggianti lungo le coste.
V - molto forte	Inondazione delle spiagge fino a una altezza definita nelle diverse zone. Danni significativi alle strutture in muratura lungo la spiaggia. Distruzione delle strutture leggere. Forte erosione. Oggetti galleggianti e animali marini sparsi sulla riva e lungo la costa. Tutti i tipi di imbarcazione, a parte le grandi navi, sono scaraventate a terra o trascinate in mare aperto. Alte ondate sugli estuari dei fiumi. Danni alle costruzioni portuali. Persone affogate. Onda accompagnata da un forte rombo.
VI - disastroso	Totale o parziale distruzione di tutte le costruzioni fino a una determinata distanza dalla spiaggia. Inondazione della costa fino a una notevole altezza. Danni forti anche alle grandi navi. Alberi sradicati e troncati. Molte vittime.

Grandi terremoti in mare e associati tsunami sono fenomeni tipici delle coste dell’Oceano Pacifico ove, sin dal 1950 sono attivi sistemi di monitoraggio continuo e di allarme. Nonostante

questo, gli tsunami continuano a mietere vittime, soprattutto quando la sorgente del maremoto e' molto vicina alla costa lasciando tempi strettissimi tra l'allarme e l'arrivo dell'onda. Le dimensioni e la geometria del Mediterraneo non si prestano all'esistenza di sistemi di allarme, per i tempi comunque troppo stretti tra evento generatore e arrivo dello tsunami. La dinamica delle placche che circondano gli oceani Indiano e Atlantico e' incompatibile con il verificarsi di grandi terremoti con epicentro in mare e gli tsunami, di conseguenza, sono fenomeni molto poco frequenti in queste aree.

Gli abitanti delle aree soggette a tsunami e poste a grande distanza dal punto nel quale lo tsunami e' stato generato, se allertati tempestivamente, hanno in genere tempo sufficiente per evacuare le zone costiere. Il migliore esempio e' fornito dalle Isole Hawaii: esse distano non meno di 3.000 km dalle principali zone sismiche circumpacifiche nelle quali la maggior parte dei grandi tsunami vengono generati. Cio' vuol dire che uno tsunami raggiungera' le Hawaii almeno quattro ore dopo che e' stato generato, un tempo sufficiente a salvare molte vite umane e molti beni materiali, purché rapidamente trasportabili. Il sistema di monitoraggio e allertamento attivo nel Pacifico (il Pacific Tsunami Warning Center) e' stato creato dall'Agenzia statunitense NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Esso e' costituito da una rete internazionale di stazioni sismiche e mareografiche ubicate tutt'intorno all'Oceano pacifico che trasmettono in tempo reale, via satellite, le informazioni raccolte al Centro di interpretazione ed elaborazione dati delle Hawaii (fig.15). Quando nella regione si registra un terremoto, il Centro analizza immediatamente i dati cercando indicazioni relative alla possibilita' che venga generato uno tsunami e, se tale possibilita' sussiste, l'allarme viene immediatamente diffuso a tutte le aree costiere del Pacifico. Il processo di analisi e dei dati e invio dell'allarme richiede circa un'ora, con conseguente impossibilita' di allerta tempestivo per le aree ubicate in un raggio di 7-800 km dal punto di origine dello tsunami.

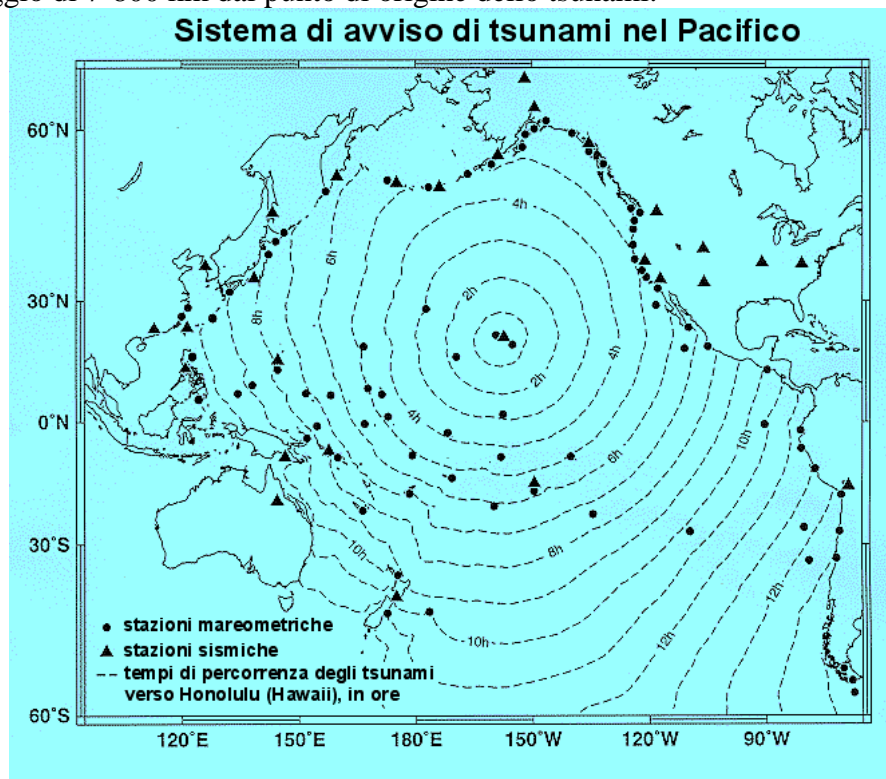


Fig.15 – Schema della rete strumentale del Sistema di avviso di tsunami nel Pacifico creato e gestito dalla NOAA

Allo scopo di rendere possibile l'allarme anche entro il raggio dei 750 km sono state creati diversi Centri Regionali per l'allertamento nelle aree ove piu' frequentemente vengono generati gli tsunami: Giappone, Kamchatka, Polinesia Francese, Alaska, Hawaii e Cile.

I sistemi di allerta oggi funzionano soddisfacentemente e hanno permesso di risparmiare molte vite umane: in Giappone, prima che fosse installato il Centro giapponese di allerta, 14 tsunami avevano ucciso 6000 persone, dopo che il Centro ha cominciato a funzionare, 20 tsunami hanno fatto 215 vittime.

Come tutti i sistemi di Protezione Civile, l'efficacia dell'avviso precoce di tsunami dipende molto dalla capacita' delle autorita' locali di rendersi conto dell'esistenza del pericolo e di diffondere capillarmente e rapidamente l'informazioni tra tutti i potenziali interessati, nonche' dalla educazione della popolazione a recepire l'avviso e a spostarsi tempestivamente dalle aree di potenziale pericolo.

Norme di comportamento di fronte a uno tsunami

Le regole di comportamento sotto riportate sono tradotte dalla home page del West Coast & Alaska Tsunami Warning Center: <http://www.alaska.net/~atwc/>

1. *Un forte terremoto avvertito in aree costiere basse e' un avviso naturale di un possibile immediato pericolo. State calmi e spostatevi rapidamente in zone elevate lontane dalla costa.*
2. *Non tutti I forti terremoti provocano tsunami, ma molti lo fanno. Se il terremoto e' localizzato vicino all'oceano o sul fondo marino, la probabilita' di uno tsunami aumenta. Quando venite informati che un terremoto si e' verificato in una zona costiera o nell'oceano, preparatevi a un'emergenza da tsunami.*
3. *Gli tsunami possono verificarsi a qualsiasi ora del giorno e della notte. Essi possono risalire i corsi dei fiumi o dei torrenti che sfociano nell'oceano.*
4. *Uno tsunami non e' costituito da una singola ondata, ma da una serie di ondate. Tenetevi fuori dalle zone pericolose fino a che il segnale di CESSATO ALLARME e' diffuso dalle autorita' competenti.*
5. *L'approssimarsi degli tsunami e' talvolta annunciato da significativi abbassamenti o innalzamenti del livello del mare. Questo e' un avviso naturale di tsunami e a esso va prestata attenzione.*
6. *Un piccolo tsunami su una spiaggia puo' essere gigantesco a poche miglia di distanza. Non fate si' che le modeste dimensioni di uno vi facciano perdere il riguardo per tutti.*
7. *Prima o poi uno tsunami investira' ogni costa del Pacifico. Tutti gli tsunami, come gli uragani, sono potenzialmente pericolosi, anche se essi possono non danneggiare le coste sulle quali si abbattono.*
8. *Non scendete mai in spiaggia per osservare uno tsunami! QUANDO VEDETE L'ONDA SIETE TROPPO VICIN I PER POTER SCAPPARE. Gli tsunami sono piu' veloci di quanto possa correre un uomo!*
9. *Durante un'emergenza da tsunami, l'ufficio locale di protezione civile, la polizia, i vigili del fuoco e le altre organizzazioni per l'emergenza cercano di salvarvi la vita. Date loro la massima collaborazione.*
10. *Case e costruzioni situate in aree costiere basse non sono sicure. NON RIMANETE in tali edifici se c'e' un avviso di tsunami.*
11. *I piani superiori di edifici con molti piani e in cemento armato possono costituire un rifugio se non c'e' tempo sufficiente per andare in luoghi elevati lontani dalla costa.*
12. *Se siete su una barca o su un battello spostatevi verso acque profonde (almeno 100 braccia). Se le condizioni atmosferiche sono molto cattive, puo' essere meno rischioso lasciare l'imbarcazione attraccata al molo e muoversi a piedi verso aree elevate.*
13. *Onde capaci di fare danni e correnti irregolari e imprevedibili possono condizionare le condizioni del porto per un certo tempo dopo l'impatto dello tsunami. Accertatevi della sicurezza del porto prima di farvi ritorno con la vostra imbarcazione.*
14. *Rimanete sintonizzati sulle stazioni radio locali, sulla radio della NOAA o sulle stazioni televisive durante un'emergenza da tsunami: I bollettini emanati dalla Protezione Civile possono salvarvi la vita.*

Tab. 2 – Catalogo degli tsunami italiani

Data	Regione	Descrizione	Att.	Causa	I macr	M sisma	VEI	Run- Up	Tsu int
4-2-1169	Stretto di Messina	Inondazione e distruzioni a Messina	3	ER	11	6,8			4
26-3-1511	Nord Adriatico	Forte innalzamento del livello marino a Trieste	3	EA	10	6,1			2
20-7-1564	Liguria-Costa Azzurra	Inondazione ad Antibes	4	EA	10	6,2			3
25-8-1613	Stretto di Messina	Inondazioni a Naso	2	EA	9	5,6			
30-7-1627	Gargano	Ritiro considerevole e inondazione	4	EA	11	6,3			5
17-12-1631	Campania	Ritiro nel Golfo di Napoli	4	VA			4		3
27-3-1638	Calabria Tirrenica	Ritiro del mare di 2 miglia a Pizzo C.	2	EA	11	7,1			
5-4-1646	Toscana	Aumento livello marino a Livorno	4	EA	7	3,6			3
14-4-1672	Adriatico centrale	Ritiro e inondazione a Rimini	4	ER	9	5,7			2
11-1-1693	Sicilia Or	Ritiro considerevole e inondazione	4	ER	11	6,8			4
14-5-1698	Campania	Ritiro nel Golfo di Napoli	2	VA			3		
1-5-1703	Liguria-Costa Azzurra	Ritiro nel golfo di Genova	2	ER	11	6,8			4
1-9-1726	Sicilia Nord	Ritiro a Palermo	4	EA	9	5,8			2
4-7-1727	Canale di Sicilia	Ritiro a Sciacca	2	ER	7				
20-3-1731	Gargano	Aumento livello mare a Siponto e Barletta	2	EA	10	6,3			
19-1-1742	Toscana	Oscillazioni livello mare Livorno	4	ER	5,5	4			2
20-2-1743	Puglia	Ritiro a Brindisi	2	EA	9	7,3			2
5-2-1783	Calabria Tirrenica	Ritiro e inondazione	4	EA	11	7			3
6-2-1783	Calabria Tirrenica	>1500 vittime a Scilla	4	EL	9,5	6,3	900		6
7-2-1783	Calabria Tirrenica	Aumento livello mare a Stilo	2	EA	10,5	6,4			
1-3-1783	Calabria Tirrenica	Inondazione Tropea	2	EA	9	5,6			
28-3-1783	Calabria Tirrenica	Inondazione Bagnara	2	EA	11	7			
7-1-1784	Calabria Ionica	Inondazione Roccella	2	ER	6	4,1			
19-1-1784	Stretto di Messina	Inondazione Faro e Catona	2	ER	6	4,1			
26-7-1805	Campania	Aumento livello mare Golfo Napoli	4	EA	10	6,6			2
2-4-1808	Liguria-Costa Azzurra	Flusso-riflusso a Marsiglia	2	EA	8	5,6			
17-5-1813	Campania	Ritiro nel Golfo di Napoli	1	VA			2		
19-6-1813	Campania	Ritiro nel Golfo di Napoli	1	VA			2		
20-2-1818	Sicilia Or	Onde anomale a Catania	4	EA	9,5	6,2			2
23-2-1818	Liguria Costa Azzurra	Onde violente a Antibes	2	EA	8				
9-12-1818	Liguria Costa Azzurra	Inondazione porto di Genova	2	EA	7				
5-3-1823	Nord Sicilia	Barche trascinate a mare a Cefalu'	4	ER	8	5,9			4
9-10-1828	Mare Ligure	Naufragio porto di Genova	4	EA	8	5,7			2
8-3-1832	Calabria Ionica	Inondazione Magliacane (Kr)	4	EA	10	6,7			2
25-4-1836	Calabria Ionica	Ritiro-inondazione. Barche danneggiate	4	EA	9	6,2			3
14-8-1846	Toscana	Aumento livello mare di una yarda a Livorno	4	EA	9	5,6			3
17-3-1875	Adriatico centrale	Inondazioni a Rimini e Cervia	4	ER	8	5,2			2
23-2-1887	Liguria Costa Azzurra	Notevole ritiro del mare. Barche danneggiate	4	ER	10	6,4	150		3
8-12-1889	Gargano	Mare agitato	2	ER	7				
16-11-1894	Calabria Tirrenica	Navi trasportate a terra a Reggio Calabria	4	EA	9	6			3
8-9-1905	Calabria Tirrenica	Forte inondazione e navi danneggiate	4	EA	10	6,9	600		3
4-4-1906	Campania	Oscillazioni livello mare nel Golfo di Napoli	2	VA			3		
23-10-1907	Calabria Ionica	Inondazioni a Capo Bruzzano	4	EA	9	5,9			3
28-12-1908	Stretto di Messina	Distruzioni e centinaia di vittime	4	ER	11	7,2	1300		6
3-7-1916	Isole Eolie	Aumento mare a Stromboli	4	EA	7		1000		3
22-5-1919	Isole Eolie	Inondazione a Stromboli	4	VO			3		3
17-8-1926	Isole Eolie	Ritiro anomalo del mare a Salina	2	EA	7,5				
11-9-1930	Isole Eolie	Ritiro-inondazione a Stromboli	4	VO			3	250	3
20-8-1944	Isole Eolie	Inondazione. Abitazioni distrutte	4	VO			2		4
?-2-1954	Isole Eolie	Debole tsunami a Stromboli	4	VO			2		2
18-4-1968	Liguria Costa Azzurra	Ritiro e inondazione a Alassio	4	ER	5	3,6			2
15-4-1979	Adriatico Meridionale	Onda distruttiva a Kotorbay	4	ER	9	7			4
16-10-1979	Liguria Costa Azzurra	Onde anomale a Antibes	4	GS			300		3
13-12-1990	Sicilia Orientale	Onda anomala a Augusta	4	ER	8	5,4			2

ATT: attendibilita' dell'informazione (4 max); EA: terremoto con epicentro a terra, ER: terremoto con epicentro a mare; VA: eruzione vulcanica; VA: VO: GS: ;Imacr: intensita' macrosismica; M: magnitudo; VEI: Indice di esplosivita' vulcanica; Run-up: altezza massima (in cm) dell'innalzamento del livello del mare; Tsu int: intensita' dello tsunami nella scala di Ambraseys-Sieberg (tab.1). Tabella (modificata) tratta dal sito dell'INGV. Data ultimo aggiornamento (D. Riposati) 18-01-2001