

TSUNAMI

“Tsunami” è una parola giapponese che significa “onda nel porto”. Nel passato gli tsunami venivano anche chiamati “onde di marea” e “onde di mare sismiche”. Entrambe 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 è corretto in quanto esso implica un meccanismo di formazione degli tsunami legato ai terremoti, e questo non è sempre il caso in quanto gli tsunami possono essere generati anche da frane, eruzioni vulcaniche, caduta di meteoriti.

Uno tsunami è 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’.

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).

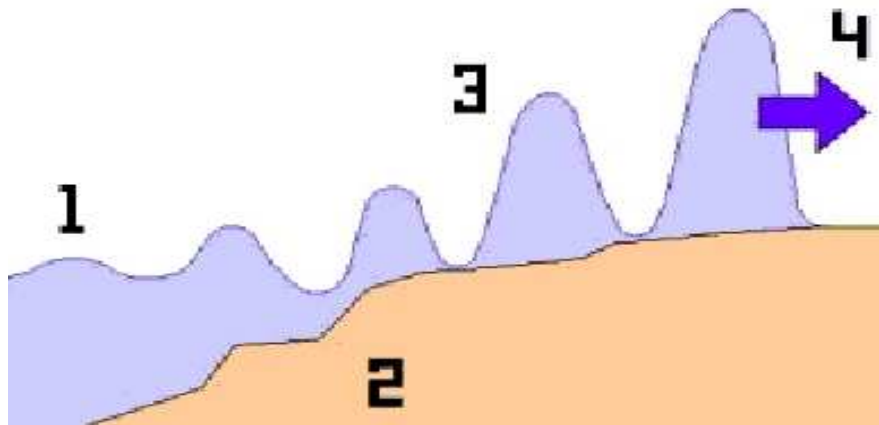
Frequenza (o **periodo**) è il tempo necessario al passaggio di una intera lunghezza d’onda da un punto stazionario.

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: $V = \lambda / P$.

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. A causa di questo "effetto secca" uno tsunami che era quasi impercettibile in alto mare può arrivare con onde altissime sulla costa.



In mare aperto (1) l'onda è caratterizzata da una limitata ampiezza. Al diminuire della profondità del fondale (2) si innesca il fenomeno del runup (3) ed il muro d'acqua si riversa sulla costa (4) spingendosi nell'entroterra. Il disegno è un adattamento di quello riportato nell'articolo Tsunami! di F.I. Gonzalez pubblicato sulla rivista Scientific American del maggio 1999.

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 della sua 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. 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 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. I ricercatori si sono accorti, comunque per prima cosa, che i depositi di materiale lasciati dagli Tsunami generati dalle grandi eruzioni esplosive hanno alcune caratteristiche uniche. Per esempio, depositi di pomice generati dall'eruzione del Krakatoa sono stati individuati in molte altre isole. Inoltre i depositi creati dagli Tsunami tendono ad avere una composizione molto simile tra di loro. Questo avviene perché le grandi eruzioni esplosive generano enormi aree di pomice galleggiante, che può essere trasportata per molti chilometri. Al contrario, i depositi creati durante altre fasi dell'eruzione tendono a formarsi a partire da sedimenti locali e non hanno un legame geologico con l'eruzione. La capacità di distinguere i vari tipi di depositi permette ai ricercatori di interpretare i depositi costieri in aree in cui sono presenti vulcani esplosivi. In questo modo è possibile anche analizzare i rischi associati a possibili nuove eruzioni.

Santorini 1650 a.C. - L'eruzione di Santorini (o Thera), in Grecia, del 1650 a.C. è stata una delle più 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.

Gli Tsunami furono certamente associati all'eruzione e raggiunsero le coste delle isole vicine e del continente. Creta fu l'isola probabilmente più gravemente danneggiata tanto da far supporre che la fine della civiltà minoica sia da imputare alle distruzioni connesse con l'eruzione. È questo il motivo per il quale l'eruzione del 1650 a.C. è detta "Minoica".

Pochissimo è conosciuto circa il relativo meccanismo che lo ha generato. La maggior parte degli studi ha attribuito questo tsunami all'esplosione e al crollo del vulcano di Santorini nel formare una grande caldera sottomarina.

I geologi attribuiscono l'attuale forma delle Cicladi all'avvicinarsi di variazioni

geologiche, terremoti, eruzioni vulcaniche, spostamenti della crosta terrestre succedutesi nel tempo e che inabissarono molte parti della terra ferma.

Il catastrofico evento è molto spesso collegato a diversi avvenimenti: biblici, storici, leggendari.

•**I fatti biblici** collegati agli sconvolgimenti del Mediterraneo sono almeno due: l'oscuramento del cielo per tre giorni citato dalla Bibbia (Geremia) e la distruzione dell'esercito del Faraone investito dalle acque mentre inseguiva gli Ebrei nel loro esodo verso la terra promessa; infatti fu probabilmente uno tsunami, con un'enorme onda anomala alta 90 metri, a travolgere l'esercito egiziano nel Mar Rosso consentendo a Mosè di portare in salvo gli Ebrei in fuga. Taluni studiosi arrivano a pensare che perfino il diluvio universale sia stato causato da un *mega tsunami*. Infatti, nel Mar Nero, lungo la costa anatolica, una spedizione guidata dal prof. Ballard trovò nel 2000 i resti di edifici sommersi a 100 metri di profondità suggerenti un improvviso forte innalzamento delle acque del bacino.

•**I fatti storici** sono relativi alla scomparsa quasi improvvisa della civiltà Minoica che, investita da uno tsunami, non ebbe più le risorse per riprendersi e, quindi, fu "scalzata" dalla allora emergente civiltà Micenea che, approfittando della debolezza minoica, prese il sopravvento su di essa.

•**Un fatto leggendario**, legato ad uno tsunami del tempo, è la scomparsa di Atlantide. Infatti molti credono che una delle terre inabissate nell'Egeo sia stata la leggendaria [Atlantide](#).

Secondo alcuni storici Thera (Santorini) altro non sarebbe stata che la mitica Atlantide, la terra della civiltà più evoluta del suo tempo, distrutta da un maremoto e seppellita sotto acqua e cenere. Su Atlantide sono stati scritti fiumi d'inchiostro per collocarla nei luoghi più disparati: ora a Santorini, ora in Turchia, ora in Gran Bretagna e perfino in Giappone.

Molti indizi fanno ritenere che l'attività del vulcano Thera sia stata ben conosciuta dagli abitanti del luogo la gran parte dei quali, se non tutti, deve aver abbandonato l'isola ben prima del grande cataclisma finale.

Altri indizi fanno inoltre ritenere che il fenomeno **parossistico** (relativo al parossismo vulcanico o tettonico) finale non sia stato l'unico evento catastrofico causato dall'attività del vulcano di Santorini. Si pensa, infatti, che nel tempo, sia prima che dopo, vi siano state diverse fasi **parossistiche** più o meno devastanti e che hanno provocato più tsunami.

Sulla scia di quest'ultima ipotesi sono state fatte diverse considerazioni e deduzioni:

- 1) Due studiosi (HeiKen e McCoy) affermano che il processo di formazione della caldera sia stato lento, graduale, distribuito nel tempo e quindi insufficiente per generare un'enorme unico tsunami. Così si è costretti a dedurre che un differente meccanismo generatore di tsunami sia stato responsabile del tremendo ed estremamente devastante tsunami avvenuto nell'Età del bronzo nell'area orientale del Mediterraneo, cioè nell'Egeo.



Figura 4 - Immagine del Mar Egeo.

- 2) Le susseguenti e molteplici fasi eruttive **parossistiche** e il parziale collasso della caldera sono stati probabilmente generati da una subsidenza causata da un vasto terremoto.
- 3) Alcuni tsunami devono essere stati causati da meccanismi differenti. Il graduale collasso della porzione ovest della caldera deve aver generato alcuni piccoli tsunami che hanno originato a nord-ovest e a ovest un'apertura con espansione della caldera di Santorini. Alcune altre probabili fasi **parossistiche** hanno presumibilmente generato altri piccoli tsunami.

- 4) Il collasso del rimanente vulcano all'interno delle camere magmatiche vuote, probabilmente causato da un forte terremoto, ha generato un enorme tsunami che forse è stato molto distruttivo nelle isole adiacenti, Creta, Cicladi e altrove.



Figura 5 - Cartina dell'arcipelago delle Cicladi nel Mar Egeo.

- 5) Molti enormi tsunami, nell'Età del bronzo, sono stati generati dalla combinazione della normale attività della faglia scaturita da un sospetto enorme terremoto e i possibili slittamenti subacquei d'instabili pareti vulcaniche nel circostante perimetro del vulcano Santorini. Un simile evento può essere accaduto contemporaneamente a tsunami generato dal collasso del rimanente vulcano di Santorini o in tempo differente.



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 è stata il sito di uno dei più grandi tsunami mai osservati dall'uomo. Nella notte del 7 Luglio 1958 un terremoto di magnitudo 8 provocò il distacco di una grande frana che si rovesciò nelle acque della baia inducendo la formazione di una immane onda di tsunami.

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 scaraventò l'acqua fino a quote di oltre 500 metri (1720 piedi) dalla parte opposta dell'insenatura. Questa ondata iniziale strappò tutta la vegetazione e lasciò la roccia nuda a marcare l'altezza raggiunta.

Oltre all'enorme spruzzo iniziale, la frana indusse la formazione di un grande tsunami che spazzò 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 inondò circa 13 km² di territorio lungo le coste della baia penetrando per oltre un chilometro sulla terra ferma.

Tsunami nel Mediterraneo

Benché non così 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.



Figura 2 - Santorini vista dall'alto.

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 città e lì lasciate.

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



3 - Mappa dell'isola di Santorini.

Più 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. Secondo le ricostruzioni geomorfologiche del suo territorio, Santorini sarebbe stato il parto di una violentissima esplosione vulcanica: la stessa isola, in pratica, sarebbe la parte inferiore di un vulcano che, a causa di un'eruzione, ha generato le altre due isole nelle quali Santorini si allunga, Aspronissi e Terrasia, modellandone i contorni e la conformazione.

Gli tsunami in Italia.

Anche l'Italia è una zona potenzialmente soggetta agli tsunami, non fosse altro che per la sua posizione peninsulare e per l'alta sismicità di alcune regioni. Gli episodi di tsunami più imponenti (ma anche altri di minore intensità) hanno

colpito l'Italia meridionale, specialmente le coste pugliesi, siciliane e calabresi, e possono essere riferiti ai terremoti verificatisi negli anni 1627, 1693, 1783 e 1908.

Promontorio del Gargano – 30 luglio 1627. Si tratta di uno dei maggiori tsunami che hanno interessato le coste italiane dell'Adriatico meridionale e si verificò il 30 luglio 1627 interessando il promontorio del Gargano.

Lo tsunami fu innescato da un terremoto (undicesimo grado della scala Mercalli) con epicentro a nord-est di San Severo (5.000 furono complessivamente le vittime imputabili direttamente al sisma) e colpì la zona costiera tra Fortore e San Nicandro, nei pressi del Lago di Lesina nel Gargano Settentrionale.

La zona, dopo un primo ritiro delle acque, venne completamente sommersa dal mare. Il fronte d'acqua associato allo tsunami deve essere stato veramente impressionante: cronache dell'epoca riferiscono che la città costiera di Termoli "precipitò" nel mare; sicuramente si tratta di un'iperbole letteraria, ma rende molto bene la drammaticità dei fatti.

Anche altre città furono interessate dall'evento. A Manfredonia, città costiera uscita praticamente indenne dagli effetti del terremoto, si registrò un runup dell'ordine di 2-3 metri.

Un'importante considerazione riguarda l'estrema pericolosità dell'evento se dovesse ripetersi ai giorni nostri.

La zona interessata, infatti, praticamente disabitata all'epoca dell'evento, è oggi sede di un forte insediamento abitativo e numerose strutture turistiche sono sorte a ridosso della costa.

Terribile sarebbe il pedaggio da pagare sia in perdite di vite umane sia in danni economici al patrimonio per la distruzione generalizzata che deriverebbe dal verificarsi di un terremoto/tsunami analogo a quello del 1627.

Il terremoto di Val di Noto (Sicilia Orientale) dell'11 Gennaio 1693 ($M = 6.8$, $I = XI$ MCS) causò la morte di circa 70.000 persone e la distruzione totale di numerosi paesi nelle province di Siracusa, Ragusa e Catania. Un forte tsunami di intensità 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 più violente e lunghe crisi sismiche degli ultimi 2000 anni. Il 5 Febbraio si verificò il primo terremoto che danneggiò circa 400 paesi e provocò 25.000 vittime, quasi tutte dovute agli incendi divampati a Messina. Al terremoto fece seguito uno tsunami di intensità 3. A Messina, Reggio Calabria, Roccella Ionica, Scilla e Catona le strade furono allagate e il mare entrò per circa 1500 metri sulla terraferma. Il 6 Febbraio ci fu una seconda violenta scossa cui seguì uno tsunami disastroso (intensità 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 è stato valutato a 9 metri.

Le vittime furono più di 1500.

Uno dei terremoti più forti mai avvenuti in Italia è quello dello stretto di Messina del 28 Dicembre 1908. Esso causò la distruzione pressoché totale di Messina e di Reggio Calabria, oltre a quella di numerosi altri paesi e centri minori. Il terremoto produsse il più 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 causò. Lo tsunami raggiunse la sua massima intensità (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.

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.

Gli Tsunami nell'Atlantico.

In occasione del 250mo anniversario del catastrofico tsunami che colpì Lisbona la sera del 31 ottobre del 1755. La città, quarta nel mondo di allora, per ricchezza e potenza, con 275 mila abitanti, fu rasa al suolo da un fortissimo terremoto d'intensità di 8.7 della scala Richter, con epicentro nell'Oceano Atlantico e da onde enormi e consecutive, 10-13 metri, che si levarono dalla superficie marina a seguito del violento sobbalzo del fondo marino che causò lo spostamento di chilometri di masse di roccia. Le onde, attraverso l'estuario del Tago, si addentrarono nella città, bella, ma geologicamente fragile, praticamente costruita sulla sabbia. Stando a descrizioni dell'epoca: "alcuni edifici furono inghiottiti dal fondo sabbioso, ancor prima di crollare". Solo a Lisbona tra terremoto e tsunami morirono dalle 30 alle 75 mila persone. È stato, dicono gli scienziati, il più grande terremoto mai registrato in Europa, 30 volte più potente di quello che distrusse nel 1906 San Francisco. Fu così forte che in Finlandia le acque dei laghi oscillarono e, come nell'Oceano Indiano, il

26 dicembre dello scorso anno, le onde provocate dal terremoto del 1755 viaggiarono velocemente in tutte le direzioni a partire dall'epicentro.

Dalle analisi fatte su antichi sedimenti, si viene a sapere che molti dei grandi tsunami che si sono verificati nell'Atlantico sono stati causati da gigantesche frane sottomarine, come, ad esempio, quello che si verificò il 18 novembre 1929, quando un terremoto di magnitudo 7.2 provocò il distacco e la caduta di 200 chilometri cubici di massa rocciosa che alzò onde alte 13 metri. Stessa causa ebbero gli tsunami che colpirono le coste settentrionali francesi nel 1580 e della Gran Bretagna nel 1607. Per non parlare della frana di Storegga, un evento catastrofico che si verificò 7900 anni fa quando più di mille metri cubi di sedimenti marini collassarono dalla piattaforma continentale, al largo della costa occidentale della Norvegia, provocando onde di 30 metri che si abatterono sulle Shetland e onde dai 3 ai 12 metri che colpirono la Scozia, la Groenlandia e la stessa Norvegia. Quante sono, dunque, le probabilità che si presentino ancora eventi simili? Ai nostri giorni, secondo gli scienziati, bisogna fare i conti con un nuovo scenario: i cambiamenti climatici, che potrebbero determinare le condizioni giuste al verificarsi di tsunami nell'Atlantico, soprattutto in quelle zone ricche di sedimenti dove si raccolgono grandi depositi di gas idrati, metano allo stato solido, che, a causa dell'aumento della temperatura delle acque marine, potrebbero destabilizzarsi e liberarsi a causa di rotture nell'”involucro” di sedimenti che le contiene. Oppure, tsunami causati da terremoti provocati dal riassetamento di parti del territorio, in Groenlandia, liberato dal pesante strato di ghiaccio sciolto dalle alte temperature.

Ma una minaccia precisa e ben documentata potrebbe venire dal collasso di un fianco del Cumbre Vieja, un grande vulcano sull'isola La Palma, una delle isole Canarie. Secondo gli scienziati 500 chilometri cubici di roccia e detriti, ritenuti instabili, potrebbero staccarsi dal vulcano, in qualsiasi momento, e precipitare in mare. Una catastrofe messa nel conto, ma che non si sa quando avverrà.

Steve Ward e Simon Day dell'Università di California, Santa Cruz, prevedono, che, se si dovesse staccare all'improvviso e in un sol colpo il fianco del vulcano, si formerebbe una prima enorme colonna di acqua alta 900 metri e come contraccolpo onde di 20 metri sulle coste orientali del Nord America e ondate che andrebbero dai sette ai dieci metri sulle coste occidentali dell'Europa, la stessa altezza delle onde che hanno colpito lo scorso anno le coste del sud est asiatico. A subire le conseguenze peggiori sarebbero le stesse Isole Canarie con onde di oltre cento metri e le coste brasiliane e dell'Africa nord occidentale con ondate di diverse decine di metri.

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, 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.

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.

Il 22 Maggio 1960 un terremoto di Magnitudo (Mw) 9,5, il più forte mai registrato strumentalmente, si verificò lungo la zona di subduzione al largo del Cile meridionale. La sequenza di scosse durò alcuni giorni e la fratturazione interessò un segmento di faglia lungo 1000 km, una delle più lunghe mai registrate. La prima

scossa (il “main shock”) innescò 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 entrò in eruzione 47 ore dopo il main shock. Il numero totale delle vittime non è mai stato definito con precisione: esso varia tra 500 e oltre 5000.

Sulle coste del Cile lo tsunami ebbe almeno tre onde distruttive, arrivate a distanza di un’ora e più 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, 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 era esaurito 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.

Esattamente alle ore 6 e 58 minuti primi (in Italia mancavano due minuti alle 2 di notte) del 26 dicembre 2004 si verificava un violento terremoto al largo dell'isola di Sumatra nell'Oceano Indiano. Il sisma del nono grado della scala Richter; si tratta del quarto maggior sisma per intensità sino ad oggi. Gli esperti paragonano l'energia liberata dal sisma a quella di un milione di bombe atomiche; un'energia pari a 23 mila esplosioni nucleari del tipo di Hiroshima, e che poi si è trasmessa nelle acque dell'Oceano Indiano provocando sulle zone costiere ondate di oltre quindici metri di altezza. Il sisma era stato causato dallo scivolamento della placca indiana sotto quella di Burma (o microplacca birmana). Come è noto la crosta terrestre è suddivisa in numerose placche o zolle tutte quante in reciproco lento movimento e nell'area della Sonda confluiscono tre di queste pacche maggiori (indiana, australiana e della Sonda) ed una minore detta appunto microplacca della Birmania. Normalmente lo spostamento di una placca rispetto ad un'altra è di pochi centimetri all'anno, ma a volte capita che una di esse accumuli energia per un lungo periodo di tempo senza spostarsi apprezzabilmente per poi farlo improvvisamente e in misura notevole.

Si ebbe lo scivolamento della placca indiana sotto quella birmana per una ventina di metri lungo un fronte di oltre 400 chilometri. Il terremoto che ne seguì provocò a sua volta uno tsunami, il quale investì dopo pochi minuti le coste a nord-ovest di Sumatra penetrando per alcuni chilometri all'interno del territorio e mietendo 250 mila vittime. Dopo due ore e mezza l'onda anomala sconvolse anche i litorali della Thailandia da una parte e quelli dello Sri Lanka dalla parte opposta e successivamente tutte le rimanenti spiagge del Golfo del Bengala uccidendo altre decine di migliaia di persone (si calcola che le vittime complessive del maremoto siano state più di 300.000) e provocando danni ingenti.

Il terremoto del 26 dicembre 2004 nel Sud-Est asiatico sarà ricordato a lungo. Specialmente in alcune aree, tra cui l'isola di **Simeulue**, Nord Sumatra, Indonesia, un'isola lunga circa 80 km ed il punto più vicino all'epicentro del terremoto. Da quel

giorno, per gli abitanti dell'isola, molto è cambiato. E' cambiata addirittura la geografia: la spiaggia non è più dov'era prima, ma si è spostata. Tutto quello che c'era sott'acqua, coralli, spugne, alghe, adesso è fuori, per centinaia di chilometri di costa. Dopo il terremoto del 26 dicembre, il fondo marino si è sollevato di quasi due metri.

L'isolotto di **Lakon** si è sollevato di quasi 2 metri, lasciando vastissime aree di barriera corallina esposte fuori dall'acqua, il sisma ha frantumato la piattaforma carbonatica su cui si posa il reef (scogliera), causando crolli e frane: la parte non esposta all'onda dell'isolotto presenta infatti le stesse condizioni di quella rivolta verso l'oceano, da cui è arrivato lo tsunami.

l'isola di **Silaut Kecil**, la zona di terra più vicina in assoluto all'epicentro del terremoto presenta alcune spaccature impressionanti sul fondo marino il quale testimonia l'incredibile violenza del sisma. Il reef nei primi metri è completamente distrutto, Il terremoto del 26 dicembre ha sicuramente lasciato in questa zona un'impronta indelebile, tanto da far diventare necessario addirittura riscrivere le carte nautiche.

La tragedia del 26 dicembre 2004 non verrà ricordata solo per la terribile tragedia che ha devastato l'Asia ma anche per un cambiamento epocale che ha mutato la geografia della Terra. Gli scienziati ne sono convinti e lo confermano i dati secondo i quali dopo il sisma il nostro pianeta avrebbe non solo cambiato il suo aspetto con uno spostamento dell'asse di rotazione di 6 centimetri ,ma avrebbe anche innalzato la catena dell'Himalaya, ridotto la durata del giorno di tre millisecondi ed infine modificato la topografia delle isole Andamane e Nicobar, e per certo sono dati anche la trasformazione delle coste dell'India.

PREVISIONE E PREVENZIONE

Affinché un sistema di allarme anti-tsunami funzioni a dovere è necessario innanzitutto individuare le aree costiere che potrebbero eventualmente essere interessate da questo genere di fenomeno. Per far ciò si elaborano al computer alcuni modelli matematici che, tenuto conto dell'altezza delle coste e della morfologia del suolo, sono in grado di stabilire fino a quale distanza dalla riva un'onda di tsunami potrebbe penetrare nell'entroterra. La disponibilità di una mappa delle zone a rischio è uno strumento essenziale sia per definire le aree sorgenti di maremoti sia per determinare gli effetti prodotti da onde anomale sulle coste.

In secondo luogo, è necessario installare una serie di sismografi sulle coste dell'oceano in grado di localizzare istantaneamente l'epicentro del sisma e la sua magnitudo. I dati così raccolti e la loro analisi puntuale dovrebbero consentire di prevedere il momento in cui l'onda di tsunami giungerà con tutta la sua forza distruttiva presso una determinata zona a rischio. In verità l'elaborazione dei dati non è semplice anche perché non tutti i terremoti in mare determinano ondate pericolose di tsunami. Per essere certi della presenza di onde di questo tipo è infatti indispensabile sistemare oltre ai sismografi anche una serie di boe in alto mare in grado di rilevare la presenza di onde sottomarine. In fondo al mare, sulla verticale della boa, viene situato infatti un misuratore di pressione con il compito di individuare onde sicuramente di tsunami in quanto quelle prodotte dagli uragani e dalle navi in transito non si spingono mai fino al fondo degli oceani. Quando il registratore sistemato sul fondo registra variazioni di pressione invia dei segnali sonori alla boa galleggiante la quale a sua volta li trasmette, via satellite, ad una stazione a terra. Una volta ricevuti i dati, i tecnici addetti alla sorveglianza devono decidere se è opportuno diffondere l'allarme a tutte le località che si affacciano sul mare eventualmente interessate da onde anomale (a questo proposito bisogna infatti tener presente che spesso le onde di tsunami si esauriscono prima di arrivare lungo la linea di costa) perché possano comunicare alla popolazione il pericolo imminente affinché questa si rechi con sollecitudine verso le vicine zone sopraelevate e ordinare

alle imbarcazioni di prendere il largo dove, come abbiamo visto, il pericolo è assai minore o del tutto inesistente. Spesso è capitato in passato di lanciare falsi allarmi anche perché le boe (fra l'altro presenti solo nell'Oceano Pacifico) sono in numero insufficiente per monitorare l'intero fondo oceanico.

Nell'ultimo maremoto che ha colpito l'estremo oriente la prevenzione però non ha funzionato che parzialmente e soprattutto non ha funzionato in Indonesia dove, per mancanza di organizzazione, per le infrastrutture inadeguate e per una burocrazia farraginoso che ha impedito che la notizia venisse valutata nella sua reale gravità, si è avuto il maggior numero di vittime e di danni materiali. In alcune località dei quel Paese mancava perfino il telefono attraverso il quale comunicare il pericolo incombente.

In alcuni casi tuttavia non basta che la sirena suoni, bisogna anche che la gente sappia come comportarsi. Bisogna infatti tener conto del fatto che una evacuazione su larga scala soprattutto nelle zone turistiche costa milioni di dollari e che basta lanciare un paio di falsi allarmi perché il terzo non venga ascoltato dalla maggior parte dei residenti. Alcuni ritengono che la creazione di un sistema di allarme globale costerebbe un sacco di soldi e non darebbe quelle garanzie assolute che ci si attende. I medici che lavorano nei paesi del Terzo Mondo reputano ad esempio che sarebbe molto più utile investire le risorse disponibili per debellare la malaria che tormenta vaste zone dell'Asia e dell'Africa e che in un anno fa molte più vittime di uno tsunami.

Vi è poi un altro problema, per quanto riguarda la previsione e la prevenzione di eventi catastrofici, di non secondaria importanza. Per quanto riguarda il sisma che genera lo tsunami, ad esempio, è necessario che esso si verifichi vicino alla costa, che sia di forte intensità e con ipocentro non molto profondo. La costa inoltre su cui andrà ad infrangersi l'onda deve avere una particolare conformazione perché non è nemmeno l'onda in sé a produrre i danni maggiori, ma l'inondazione che segue.

Infine merita un cenno la costruzione, in Giappone e in India, di alcuni muri e portoni di acciaio che si chiudono automaticamente qualora scatti l'allarme i quali hanno

mostrato la loro efficacia in occasione di tsunami seguiti a pochi minuti dal terremoto o in ore notturne in cui non è possibile avvertire con tempestività la popolazione. Le costruzioni sistemate sulla spiaggia non sono certo un bel vedere ma hanno dimostrato la loro efficacia in passato in Giappone e in India proprio in occasione dell'ultimo tsunami.

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.

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 è 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 è 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 è stato generato, se allertati tempestivamente, hanno in genere tempo sufficiente per evacuare le zone costiere. Il migliore esempio è 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. Ciò vuol dire che uno tsunami raggiungerà le Hawaii almeno quattro ore dopo che è 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) è stato creato dall'Agenzia statunitense NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Esso è 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 . Quando nella regione si registra un terremoto, il Centro analizza immediatamente i dati cercando indicazioni relative alla possibilità che venga generato uno tsunami e, se tale possibilità 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 impossibilità di allerta tempestivo per le aree ubicate in un raggio di 7-800 km dal punto di origine dello tsunami.

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 più 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 capacità delle autorità locali di rendersi conto dell'esistenza del pericolo e di diffondere capillarmente e rapidamente l'informazione tra tutti i potenziali interessati, nonché dalla educazione della popolazione a recepire l'avviso e a spostarsi tempestivamente dalle aree di potenziale pericolo.

August 26 - 28 - Krakatau volcano eruption (local time)- 163 villages destroyed, 36380 dead.

