

*Le acque si innalzarono sempre di più
sopra la terra e coprirono i monti più
alti che sono sotto tutto il cielo.*

Genesi 7,19

TSUNAMI

Come è vero che il fenomeno della craterizzazione è prontamente identificabile come la diretta e lampante prova dell'impatto di un oggetto asteroidale sulla crosta solida del nostro pianeta, altrettanto vero è l'insorgere di molti interrogativi allorché ci accingiamo a considerare ciò che può accadere nel caso di un impatto in mare.

Interrogativi tutt'altro che inutili, dal momento che, essendo la superficie della Terra per circa 7/11 ricoperta dall'acqua, l'eventualità di un impatto di questo tipo risulta statisticamente più probabile di un impatto sulla terraferma.

Di primo acchito potremmo essere portati ad escludere in modo categorico la possibilità di riuscire a trovare prove attendibili e segnali sicuramente riconducibili ad eventi di questo tipo avvenuti nel passato del nostro pianeta: è evidente, infatti, come sia altamente improbabile rinvenire una qualunque traccia di tipo craterico sul fondo marino sia per le grandi difficoltà nel tracciare mappe altimetriche accurate dei fondali, premessa indispensabile per il riconoscimento di qualche struttura da impatto, sia perché, spesso, proprio sui fondali oceanici sono situate zone estremamente attive dal punto di vista geologico e, di conseguenza, di formazione più recente.

Appare inoltre ragionevole ipotizzare che, nel caso di caduta in mare aperto, l'oggetto responsabile dell'impatto non avrebbe vita facile (tutti noi conosciamo quanto può diventare "resistente" l'acqua nel caso di un tuffo mal riuscito!), dal momento che dovrebbe fare i conti con uno spesso strato di liquido prima di giungere a toccare il fondo e lasciare eventualmente qualche traccia.

Una ulteriore considerazione, indubbiamente meno stringente delle precedenti, potrebbe essere suggerita dal fatto che non esiste alcuna memoria storica che riferisca anche solamente di un fenomeno di natura meteoritica in mare (mentre molti e di ogni epoca ve ne sono per la terraferma), circostanza che, naturalmente, dipende dalla scarsa "densità di popolazione" riscontrabile in mare, ma che, ad ogni modo si potrebbe interpretare quasi come una conferma che eventi di questo tipo non lasciano alcun segno, suggerendo la classica immagine del "buco nell'acqua"...

Si potrebbe, infine, essere indotti a considerare tali eventi meno pericolosi per la biosfera di quanto lo siano stati quelli verificatisi sulla terraferma, ma forse in questo gioca molto la nostra abitudine a considerarci abbastanza al sicuro (purché sufficientemente lontani da una zona costiera) dagli "avvenimenti marini".

Vedremo però che alcune di queste ragionevoli e sensate considerazioni si mostreranno inattendibili e, oltre alle considerazioni di natura statistica, scopriremo l'esistenza di alcuni importanti indizi in grado di confermare non solo che nel passato del nostro pianeta si verificarono eventi impattivi in mare, ma anche che tali impatti sconvolsero in modo radicale la biosfera terrestre.

Ma andiamo con ordine.

Come primo passo nell'analisi degli eventi associabili ad un impatto marino è indispensabile introdurre la descrizione e approfondire la conoscenza di un fenomeno naturale che, sebbene costituisca la prima e immediata conseguenza di un impatto asteroidale in mare aperto, non ha in tale eccezionale avvenimento l'unica causa, dal momento che può essere innescato anche dai ben

più frequenti fenomeni sismici, e proprio in tal senso è tristemente noto presso alcune popolazioni residenti nel bacino del Pacifico che lo hanno più volte sperimentato nel corso dei secoli.

Mi riferisco al fenomeno fisico dello **tsunami**.

Uno tsunami è costituito da una serie di onde oceaniche generate solitamente (ma non solo) da terremoti il cui epicentro si trova sul fondale marino o nelle immediate vicinanze e che, dopo aver percorso anche migliaia di chilometri attraversando interi oceani, si abbattono come giganteschi muri d'acqua sulle coste distruggendo tutto ciò che incontrano sul loro cammino.

Il termine è di origine giapponese (può essere tradotto letteralmente come “onda del porto”) e la ragione di un tale nome appare in modo lampante proprio considerando i terribili effetti che questo evento provoca sulle regioni della costa sulle quali si abbatte.



Qui accanto è riportato l'ideogramma con il quale in giapponese si indica questa parola: nella parte superiore il carattere “tsu” che significa “porto” e nella parte inferiore il carattere “nami” il cui significato è “onda”.

Dettagliate notizie e immagini riguardanti il fenomeno dello tsunami e le iniziative per difendersi da tale calamità naturale sono reperibili in Internet ai siti dell'*International Tsunami Information Center* e del *Pacific Tsunami Museum di Hilo – Hawaii*.

Nel passato, talvolta, il termine è stato tradotto con “onde di marea”, ma tale traduzione è fuorviante.

E' certamente vero che la situazione di alta o bassa marea presente nel momento in cui uno tsunami colpisce può influenzare notevolmente la sua azione, ma si tratta di due fenomeni fisici ben distinti e assolutamente non correlati. Il verificarsi delle maree, inoltre, è un evento completamente prevedibile in quanto dipende dall'azione gravitazionale del nostro satellite, mentre uno tsunami non ha tempi prefissati e cadenze ben precise...

A differenza di quanto si verifica per le maree, lo sviluppo di uno tsunami è caratterizzato da un tempo di preavviso molto limitato, e questo non fa che aumentare notevolmente la pericolosità della sua azione.

Un altro termine (impiegato soprattutto nella comunità scientifica) con il quale ci si riferiva a questo fenomeno era quello di “onda sismica marina”, ma anch'esso non è completamente corretto poiché quella sismica è solamente una delle possibili origini di uno tsunami.

Anche la traduzione con il termine italiano di “maremoto” è, in questo senso, parzialmente fuorviante, come suggerisce l'etimologia stessa del termine che richiama espressamente ad un fenomeno di natura sismica.

L'origine di uno tsunami non va, dunque, ricercata solamente in fenomeni sismici: in generale si può affermare che qualunque causa in grado di perturbare verticalmente una colonna d'acqua sufficientemente grande muovendola dalla sua posizione di equilibrio è in grado di originare uno tsunami, dunque possono a pieno titolo diventare causa di tsunami anche eruzioni vulcaniche, esplosioni, frane e movimenti tettonici sottomarini.

A queste cause di origine terrestre ne va aggiunta anche una esterna, costituita dal possibile impatto con oggetti cosmici.

Proprio per evitare le possibili inesattezze legate ai diversi termini impiegati per indicare il fenomeno è stato deciso, nel corso di una convegno scientifico internazionale tenutosi nel 1963, di introdurre la parola giapponese “tsunami” quale denominazione ufficiale.

Uno tsunami è profondamente differente dal comune moto ondoso che ha la sua origine nell’azione dei venti in mare aperto e come epilogo il ritmico, rilassante (e talvolta poetico) infrangersi delle onde sulla battigia delle coste.

Nel classico moto ondoso le onde sono caratterizzate da un periodo (intervallo di tempo tra due onde successive) solitamente di 5-20 secondi e da una lunghezza d’onda (distanza tra due creste successive) di circa 100-200 metri; le onde di uno tsunami, invece, hanno un periodo dell’ordine di un’ora e una lunghezza d’onda che può raggiungere anche il valore di alcune centinaia di km.

Ma i parametri fisici che più di ogni altro caratterizzano le onde di uno tsunami (chiamate anche “shallow-water waves” – onde d’acqua bassa – in quanto la loro lunghezza d’onda è di gran lunga maggiore della profondità dell’acqua in cui si sviluppano) sono la loro modesta ampiezza (altezza rispetto al piano medio della superficie marina) e l’elevata velocità con la quale si propagano in mare aperto.

La velocità di propagazione delle “shallow-water waves” è data dalla formula:

$$v = \sqrt{g \cdot d}$$

in cui d è la profondità dell’acqua in quel punto e g è l’accelerazione di gravità (9.8 m/sec^2).

Un semplice calcolo impiegando questa formula ci permette di trovare che, per esempio, in un oceano caratterizzato da una profondità di 4000 metri (quale può essere l’Oceano Pacifico) un’onda di tsunami si può propagare alla velocità di oltre 710 km/ora.

Si diceva che il secondo aspetto che caratterizza queste onde è la loro ridotta ampiezza (il cui valore è tipicamente dell’ordine di un metro) e questa particolarità fa sì che esse risultino praticamente “invisibili” per qualsiasi imbarcazione che le incroci in mare aperto.

L’estrema pericolosità di questo fenomeno può essere meglio compresa introducendo alcune considerazioni riguardanti l’energia trasportata dal moto ondoso.

Il tasso di perdita di energia di un’onda è strettamente correlato all’inverso della sua lunghezza d’onda e questo comporta che la propagazione di un’onda di tsunami avvenga con piccolissime dispersioni, dunque il treno d’onde può percorrere lunghissime distanze mantenendo praticamente inalterato il suo carico energetico.

E sono proprio l’elevatissimo contenuto energetico delle onde e l’ineluttabilità della legge di conservazione dell’energia che trasformano queste onde da piccoli e quasi impercettibili movimenti della superficie marina in mare aperto a gigantesche calamità naturali nel momento in cui si abbattono violentemente sulle coste.

Tutto dipende ancora dalla relazione tra la velocità e la profondità dell’acqua vista prima.

Avvicinandosi alle coste diminuisce la profondità del mare e dunque anche la velocità delle onde si riduce, ma questo comporta che, dovendo per necessità fisica rimanere costante l’energia, debba aumentare l’ampiezza del moto ondoso, cioè l’altezza delle onde.

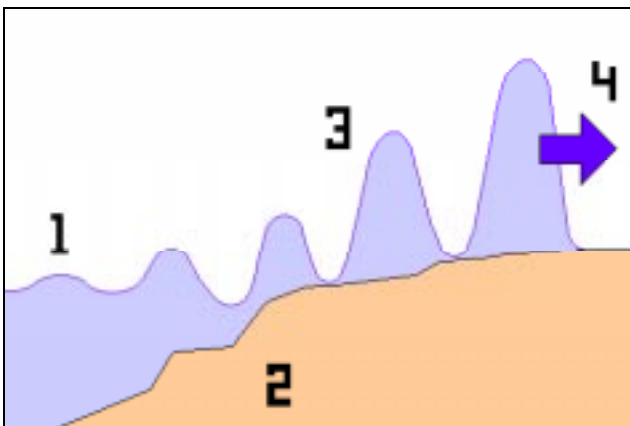
La massima altezza cui può giungere un’onda di tsunami viene indicata con il termine inglese di “runup” ed il suo valore è mediamente circa dieci volte maggiore dell’altezza dell’onda che lo ha originato, ma è evidente che tutto è legato all’andamento del profilo batimetrico.

Molta importanza nel limitare gli effetti devastanti di uno tsunami hanno, infine, la morfologia della costa e la configurazione del terreno (liscio o rugoso, ricco o privo di alberi), elementi in grado di rallentare o meno l'impeto dell'acqua che tende ad addentrarsi nella terraferma anche per centinaia di metri.

Vi è anche la possibilità che uno tsunami non si manifesti subito come la classica gigantesca onda che si abbatte sulla costa, ma come un improvviso fenomeno di bassa marea, un repentino ritirarsi delle acque fino a lasciare scoperto il fondale marino per decine di metri prima che, una dopo l'altra, le numerose ondate che costituiscono lo tsunami si abbattano con gigantesca violenza ed elevata velocità su chi, incautamente, si è attardato ad osservare lo strano fenomeno.

Le dimensioni finali del fenomeno sono, evidentemente, legate in modo molto stretto all'energia trasmessa all'oceano dall'evento scatenante (nel caso di terremoto, ad esempio, sarà la sua magnitudine a determinare l'ampiezza iniziale del moto ondoso), ma hanno la loro importanza anche altre caratteristiche quali la rapidità delle deformazioni del fondo marino, il profilo batimetrico e la profondità del mare nella zona dell'epicentro.

Nella figura seguente viene illustrato in modo schematico il fenomeno dello tsunami: l'immagine, naturalmente, è solamente indicativa e dunque non ha alcuna pretesa di mostrare i fenomeni ondosi in scala. L'intento è quello di descrivere la situazione che si viene a creare allorché un'onda di tsunami proveniente dal mare aperto si avvicina alla costa, si innesca il fenomeno del runup ed una montagna d'acqua si abbatte violentemente sulla regione costiera.



Nel disegno è stata schematizzata la limitata ampiezza dell'onda in mare aperto (1), tanto che potrebbe passare inosservata per chiunque dovesse trovarsi su una imbarcazione lontano dalla costa.

Al diminuire della profondità del fondale oceanico (2) si innesca il fenomeno del runup (3) ed il muro d'acqua si riversa sulla costa (4) spingendosi nell'entroterra.

Alcuni dati raccolti in occasione dello tsunami che si è abbattuto sulle Hawaii nel 1960 a seguito del terremoto del 22 maggio in Cile ci possono dare un'idea più concreta della violenza del fenomeno.

Il terremoto venne stimato di magnitudine 8.6 ed il suo epicentro fu localizzato al largo delle coste del Cile centro-meridionale, ad una profondità di 33 km.

I primi effetti devastanti dello tsunami si manifestarono, come è ovvio, sulle coste cilene nei minuti immediatamente seguenti alla registrazione del terremoto, ma le onde innescate dall'evento stavano ormai propagandosi a grande velocità anche in direzione opposta, raggiungendo, circa 15 ore dopo, le coste hawaiane distanti 10.000 km dall'epicentro.

Il porto di Hilo (città collocata sulle coste della maggiore delle isole dell'arcipelago hawaiano, a 300 km in linea d'aria dalla capitale Honolulu in direzione sud-est) fu sommerso dall'oceano, che si abbatté sulle costruzioni con un fronte d'acqua alto 10.7 metri: un'idea della violenza del fenomeno si può avere osservando i supporti dei parchimetri, piegati dalla forza dell'onda, ed il desolante spettacolo delle costruzioni abbattute.

Non si è trattato, però, di un evento assolutamente insolito ed unico: nella storia di queste isole, infatti, data la posizione particolarmente esposta, si sono verificati spesso tali fenomeni di violenta interazione tra mare e terra e proprio la città di Hilo è stata frequentemente interessata da onde di tsunami, tanto da meritarsi la reputazione di "capitale dello tsunami" degli Stati Uniti.

Lo tsunami più distruttivo nella storia recente di questo arcipelago si è verificato il 1 aprile 1946, in occasione del terremoto di magnitudine 7.1 con epicentro in Alaska (Isole Aleutine); il massimo runup misurato fu di 16.8 metri a Pololu Valley (Big Island), con le onde che, in alcune aree, penetrarono per quasi un chilometro nella terraferma.

Proprio per ridurre al minimo la perdita di vite umane nell'arcipelago delle Hawaii e nei propri territori del Pacifico, gli Stati Uniti hanno attivato, a partire dal 1948, il ***Pacific Tsunami Warning System***, un sistema di osservazione e monitoraggio che, combinando rilevazioni sismologiche con misurazioni dei cambiamenti del livello dell'acqua in stazioni di rilevamento sparpagliate nell'Oceano Pacifico, è in grado di prevedere il possibile insorgere di uno tsunami e, in caso di pericolo, lanciare l'allarme per attivare le procedure di evacuazione della popolazione.

Ma non è sicuramente questa l'unica zona del pianeta in cui uno tsunami può portare il suo carico di devastazione, come eloquentemente dimostra quanto è accaduto il 17 luglio di quest'anno in Nuova Guinea.

Certo è che le Hawaii, con la loro collocazione geografica che le vede immediatamente a ridosso della zona sismicamente più attiva dell'intero pianeta, il cosiddetto "anello di fuoco" situato nell'Oceano Pacifico, sono fatalmente destinate a sperimentare più di ogni altro luogo le conseguenze degli eventi sismici.

Ora che abbiamo qualche elemento in più per comprendere il fenomeno dello tsunami possiamo passare ad occuparci direttamente di ciò che avviene nel caso di una caduta asteroidale in una zona marina, e se le descrizioni appena fatte per quanto riguarda gli tsunami sismici ci danno immagini terribili di distruzione, già possiamo immaginare quanto più tremendo sarà il quadro nel caso di un evento la cui energia è smisuratamente più elevata.

Uno studio accurato dello tsunami generato dalla caduta nell'Oceano Atlantico di un piccolo asteroide (diametro inferiore al chilometro) è stato compiuto da Jack Hills e Charles Mader del Los Alamos National Laboratory e presentato nella Conferenza Internazionale sulla Difesa del Pianeta svoltasi a Livermore (California - USA) dal 22 al 26 maggio 1995.

Nel loro lavoro ipotizzano la caduta di un asteroide in un punto qualunque dell'Oceano Atlantico analizzando le dimensioni dello tsunami prodotto da tale evento (si veda la Nota Matematica per una trattazione più approfondita) ed i risultati che emergono sono davvero impressionanti.

Nel caso di un impatto con un asteroide del diametro di 400 metri, si produrrebbero onde oceaniche di 4 metri che, una volta giunte in prossimità delle coste, si trasformerebbero in onde di tsunami di 40 metri destinate a penetrare per molti km all'interno della terraferma.

Se poi, aggiungono i ricercatori, si dovesse ipotizzare la caduta di un asteroide del diametro di 5 km (un oggetto decisamente grande, in grado di formare una cavità transiente larga 150 km e profonda come l'oceano, ma che, comunque, sarebbe di un ordine di grandezza meno massiccio di quello che si ritiene il responsabile dell'evento K/T), si innescherebbero onde oceaniche caratterizzate da una ampiezza dell'ordine del centinaio di metri che, interagendo con la terraferma, darebbero origine a vere e proprie montagne di acqua in grado di ricoprire la costa orientale degli Stati Uniti spingendosi fino alle pendici dei Monti Appalachi.

Grazie alla conformazione della piattaforma continentale in grado di contenere il moto ondoso, l'Europa sarebbe colpita in minore misura, ma con risultati ugualmente devastanti.

La zona che risentirebbe maggiormente degli spaventosi effetti dello tsunami innescato da questa caduta nel centro dell'Atlantico sarebbe, con molta probabilità, la penisola Iberica, dal momento

che non presenta praticamente piattaforma continentale; questa situazione particolarmente sfavorevole potrebbe quasi essere giudicata prevedibile, visto quanto accadde in occasione del terremoto che rase al suolo Lisbona il 1° novembre del 1755 provocando 40.000 vittime, con la città portoghese inondata dall'oceano ed un runup valutato di oltre 12 metri.

Proprio considerando che ambedue le coste dell'oceano sarebbero ugualmente interessate dal fenomeno, i due ricercatori suggeriscono che sarebbe fondamentale il rinvenimento di tracce coeve di inondazioni sia lungo la costa orientale degli Stati Uniti che lungo quelle dell'Europa: sarebbe veramente la prova schiacciante che eventi come quello ipotizzato possano essere accaduti nel passato.

E non è fantascienza ipotizzare un tale rinvenimento, dal momento che sul nostro pianeta è già stata scoperta più di una traccia di giganteschi tsunami avvenuti nel passato, basti per tutti citare il ritrovamento (lo studio, del 1993, è dei ricercatori C. Johnson e D. King) di depositi corallini non consolidati ad una quota di 326 metri sul livello del mare nell'isola di Lanai nell'arcipelago hawaiano.

Non per campanilismo, ma spinto esclusivamente dalla curiosità e dal desiderio di fare qualche conto tutto sommato attendibile, ho provato ipotizzare un impatto nel Mediterraneo, impiegando nei calcoli le formule presentate nel lavoro citato in precedenza e riportate nella Nota Matematica.

Ho semplificato notevolmente il problema, applicando le formule così come sono ed ipotizzando due diverse località d'impatto: la prima nel Bacino Algerino-Provenzale (tra la Sardegna e le Isole Baleari) nel punto di massima profondità (2800 metri) e la seconda nel Bacino Ionico (tra la Sicilia e Creta) in una zona in cui la profondità del mare raggiunge i 4300 metri.

La mappa sottostante riporta, approssimativamente, le due zone considerate:



Non mi sono discostato dalle ipotesi di Hills e Mader neppure per ciò che riguarda la scelta del responsabile dell'impatto, vale a dire un asteroide di tipo roccioso (diametro di 400 metri), dotato di una velocità di 20 km/sec e, pertanto, di un carico energetico dell'ordine di 5 Gton.

La situazione descritta si può configurare come un impatto in acque basse, dal momento che le dimensioni verticali della cavità transiente (nel caso di un asteroide con dimensioni di 400 metri è ipotizzabile un valore di 4800 metri) superano la profondità del mare, e questo anche nel caso del Bacino Ionico.

I dati numerici ottenibili dall'applicazione delle formule sono riportati nelle tabelle seguenti, in merito alle quali è opportuno introdurre alcune note esplicative:

- Il valore dell'altezza dell'onda oceanica è riferito al livello medio iniziale della superficie marina; trattandosi di un moto ondoso, a questa "salita" seguirà, naturalmente, anche un avvallamento all'incirca di pari altezza.
- Il runup è stato calcolato semplicemente valutandolo 10 volte l'onda oceanica, dunque affidandosi a valori medi e senza considerare l'andamento batimetrico dei fondali.
- La distanza alla quale può spingersi nell'entroterra l'acqua dello tsunami è stata calcolata ipotizzando una morfologia superficiale intermedia (né troppo liscia né troppo rugosa), con un Numero di Manning $n = 0.03$ e senza tenere conto dell'andamento orografico delle regioni costiere considerate.

A. BACINO ALGERINO-PROVENZALE

Località (*)	Onda oceanica	Runup	Distanza
1	> 15 m	> 150 m	> 51 km
2	12 m	120 m	38 km
3	15 m	150 m	51 km
4	7.5 m	75 m	20.5 km
5	5 m	50 m	12 km

(*) Le località considerate in questa prima simulazione sono:

- | | |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| 1. Isole Baleari | 4. Costa francese (Marsiglia) |
| 2. Coste dell'Algeria | 5. Costa ligure (Genova) |
| 3. Coste della Sardegna occidentale | |

B. BACINO IONICO

Località (*)	Onda oceanica	Runup	Distanza
1	11.6 m	116 m	36.5 km
2	7.7 m	77 m	21 km
3	13.3 m	133 m	43.7 km
4	6.2 m	62 m	15.8 km
5	9.3 m	93 m	27 km
6	3.1 m	31 m	6.3 km

(*) Le località considerate in questa seconda simulazione sono:

- | | |
|----------------------------------|--------------------------------|
| 1. Coste della Sicilia orientale | 4. Costa Tunisina |
| 2. Golfo di Taranto | 5. Costa Libica (Tripoli) |
| 3. Peloponneso | 6. Costa Israeliana e Libanese |

Al di là delle considerazioni sulla completa attendibilità dei risultati numerici proposti (ci sono infatti troppi parametri ignorati o assunti con valori medi), resta il fatto che se si verificasse un impatto nel Bacino del Mediterraneo le regioni costiere dei Paesi che si affacciano su di esso verrebbero spazzate via dalla violenza delle acque, situazione resa ancor più drammatica dal fatto che gran parte degli insediamenti umani sono collocati proprio nelle immediate vicinanze delle regioni costiere.

Ci mette un po' il cuore in pace il fatto che, accettando per buona la frequenza di 100.000 anni per la caduta di un oggetto del diametro di 400 metri, il calcolo statistico della frequenza di un impatto come quelli da me ipotizzati (ottenuto semplicemente rapportando la superficie occupata dal Bacino del Mediterraneo alla superficie totale della Terra) porta l'intervallo tra due eventi a più di 20 milioni di anni.

Certamente più frequente (valutato dell'ordine di un evento ogni qualche centinaio di anni su tutta la superficie terrestre) è considerato l'impatto di un oggetto di dimensioni paragonabili a quelle ipotizzate per il responsabile dell'evento Tunguska del 1908, un corpo caratterizzato, cioè, da un diametro di una cinquantina di metri.

Se per tale oggetto scegliamo, anziché una composizione di tipo condritico come quella proposta da alcuni per l'impattore siberiano, una tipologia roccioso-metallica con densità di 3.5 g/cm^3 ed una velocità di impatto ancora di 20 km/sec, otteniamo un contenuto energetico di 10.9 Mton.

Ripetendo i calcoli, sempre considerando una caduta nel Bacino del Mediterraneo, per valutare i fenomeni marini indotti da questa tipologia di impattori, si ottengono i seguenti risultati:

A. BACINO ALGERINO-PROVENZALE

Località	Onda oceanica	Runup	Distanza
1	> 2.3 m	> 23 m	> 4.2 km
2	1.9 m	19 m	3.3 km
3	2.3 m	23 m	4.2 km
4	1.2 m	12 m	1.8 km
5	0.8 m	8 m	1 km

B. BACINO IONICO

Località	Onda oceanica	Runup	Distanza
1	1.2 m	12 m	1.8 km
2	0.8 m	8 m	1 km
3	1.3 m	13 m	2 km
4	0.6 m	6 m	0.7 km
5	0.9 m	9 m	1.2 km
6	0.3 m	3 m	0.3 km

L'identificazione delle Località è la stessa delle tabelle precedentemente presentate, come pure le annotazioni generiche colà riportate in merito al calcolo del runup e della distanza di penetrazione nell'entroterra.

Per quanto riguarda il calcolo dell'onda oceanica, invece, è necessario precisare che, trattandosi di un evento configurabile come impatto in acque profonde, è stata utilizzata la formula appropriata e non più quella per bassi fondali impiegata in precedenza.

Anche semplicemente da una analisi sommaria dei risultati ottenuti si può notare l'entità già sufficientemente elevata dei fenomeni innescati da un avvenimento che, tutto sommato, può essere considerato "frequente" anche su scale temporali umane.

Ed il pensiero, inevitabilmente, non può a che rivolgersi all'episodio biblico del Diluvio Universale (ecco spiegata la citazione all'inizio dell'articolo), confortato anche dal fatto che la descrizione di episodi analoghi si trova un po' in tutte le culture, suggerendo che alla base di tutto ci possa essere stato effettivamente, in epoca pre-storica, un episodio realmente accaduto, una spaventosa inondazione la cui descrizione – con gli inevitabili arricchimenti tipici dei racconti tribali – è stata tramandata di padre in figlio per sfociare, una volta introdotta la scrittura quale più sicuro veicolo della memoria, nei racconti biblici e nelle saghe mitologiche di altre culture.

Alla luce di quanto detto finora, l'idea di associare queste inondazioni allo tsunami causato da un impatto in mare può essere qualcosa di più di una fantasia senza fondamento...

Ma qui ritengo doveroso fermarmi, lasciando ad altri (Immanuel Velikovsky prima di tutti e, più recentemente, Victor Clube, Bill Napier ed altri studiosi) l'onore e l'onere di interpretare in "chiave impattiva" (non a caso la scuola di pensiero viene detta del Neo-Catastrofismo) molti eventi (ad essere sincero, forse troppi...) la cui eco, spesso sotto forma di racconti mitologici, è giunta fino ai nostri giorni; e non si può negare che qualche coincidenza sia veramente sorprendente e alcuni degli scenari proposti siano molto, molto attraenti...

TSUNAMI PRODOTTO DA UN IMPATTO

Nella simulazione presentata nel Workshop di Livermore del 1995, Jack G. Hills e Charles L. Mader si riferiscono, quale dato di partenza, all'energia posseduta dall'oggetto (si tratta dell'energia cinetica dell'asteroide diretto verso la Terra) e, basandosi su dati provenienti dagli studi di esplosioni nucleari sottomarine, giungono a determinare l'altezza dell'onda oceanica generata nell'impatto, secondo la formula:

$$h = 4.5 \cdot Y^{1/2} \cdot \left(\frac{1000}{r} \right) \quad (1)$$

In essa: h = altezza dell'onda oceanica (espressa in metri);
 Y = energia dell'impatto (espressa in Gton);
 r = distanza dal punto d'impatto (espressa in km).

Tale formula non è più utilizzabile, però, nel caso in cui l'interazione con il proiettile cosmico avvenga in acque poco profonde, vale a dire nel caso in cui la profondità della cavità transiente – che, ricordiamo, è il cratere iniziale originatosi in seguito all'impatto – supera la profondità dell'oceano in quel punto.

Dal momento che la profondità di un cratere in acqua è stimabile in circa 12 volte il diametro dell'impattore (valore proposto da Schmidt e Holsapple in uno studio del 1982), questo significa che i risultati numerici ottenuti grazie alla (1) sono corretti fino al caso limite di un proiettile del diametro di 400 metri dotato di velocità di 20 km/sec che impatta la superficie oceanica in una zona in cui la profondità è di 5 km (che è poi la profondità media oceanica).

Nel caso di acque poco profonde (o di oggetti con dimensioni superiori ai 400 metri) l'altezza dell'onda oceanica generata dall'impatto sarà inferiore poiché, come è stato confermato da test nucleari in acque con profondità limitata, in tale situazione la quantità di energia trasferita alle acque è inferiore rispetto al caso di acque profonde; per tale motivo l'altezza dell'onda oceanica dovrà essere calcolata ricorrendo ad una nuova formula, e precisamente quella proposta in un lavoro del 1977 da S. Glasstone e P.J. Dolan:

$$h = 725 \cdot \left(\frac{d}{r} \right) \cdot Y^{0.25} \quad (2)$$

Il significato dei simboli è quello già evidenziato nella (1), come pure le unità di misura impiegate. Oltre alle grandezze già note, nella (2) compare anche il valore della profondità dell'acqua nel luogo dell'impatto (d), espresso nelle stesse unità di misura utilizzate per la distanza (r).

E' interessante, in questa seconda situazione, notare che, all'aumentare dell'energia dell'impatto, l'altezza dell'onda oceanica aumenta più lentamente di quanto non avvenisse nel caso di acque profonde e ciò dipende dal fatto che interviene, quasi come parziale dissipatore di energia, l'interazione con il fondale oceanico con l'innesco dei fenomeni già incontrati nella descrizione della craterizzazione.

Oltre al calcolo dell'altezza dell'onda oceanica (parametro dal quale dipende il calcolo del runup dello tsunami), Hills e Mader si propongono anche di riuscire a determinare fin dove si spingerà l'ondata all'interno della terraferma.

La situazione è molto complessa, dal momento che nel calcolo intervengono numerosi fattori, non ultimo il grado di "ruvidità" del terreno, parametro espresso attraverso il Numero di Manning (n) il cui valore può variare da circa 0.015 nel caso di terreni molto lisci e ghiacciati fino a 0.070 per aree costiere caratterizzate da fitta vegetazione e formazioni laviche molto ruvide.

Hills e Mader, pertanto, assumono come validi i valori presentati in una ricerca del 1977 da Bretschneider e Wybro (dai calcoli dei quali, nel caso di $n = 0.03$ e con un runup di 15 metri, la massima distanza di penetrazione sulla terraferma (X_{\max}) risultava di 2.5 km) e, scalando opportunamente tali valori, ricavano la seguente espressione:

$$X_{\max} = 1.4 \cdot \left(\frac{h_o}{10} \right)^{4/3} \quad (3)$$

In essa: X_{\max} = distanza massima di penetrazione nella terraferma (espressa in km)
 h_o = valore del runup (espresso in metri).

Ipotizzando alcuni valori del runup nel caso di un'area sviluppata (caratterizzata da un Numero di Manning $n = 0.03$) ed inserendoli nella (3) otteniamo che un'onda di tsunami di 40 metri potrebbe spingersi per circa 9 km nell'entroterra, una di 100 metri potrebbe arrivare a 30 km e nel caso di runup di 200 metri l'acqua potrebbe raggiungere i 76 km di distanza.

Se poi si trattasse di una zona costiera costituita da pascoli o aree coltivate ($n = 0.015$) i valori ottenuti sarebbero (pur nell'incertezza dovuta all'estrapolazione dell'equazione a tali valori estremi) 4 volte maggiori.

TABELLA 1

Contiene l'elenco degli tsunami (dei quali si è in possesso di documentazione sufficientemente precisa e attendibile) caratterizzati da un runup superiore a 50 m.

Non è automatico che tali eventi siano in assoluto quelli che hanno provocato il maggior numero di vittime dal momento che, ovviamente, è la densità di popolazione che gioca un ruolo fondamentale in quel tragico bilancio. E' comunque un ottimo set di dati per notare non solo la violenza che può caratterizzare uno tsunami, ma anche la dislocazione geografica delle zone più frequentemente interessate.

Data	Località	Nazione	Runup max
29.09.1650	Patmos	Grecia	50 m
17.02.1674	Hila, Tseit, Lima	Indonesia	100 m
17.10.1737	Isola Bering	Giappone	60 m
29.08.1741	Isola Sado	Giappone	90 m
24.04.1771	Ara	Giappone	56.5 m
24.04.1771	Isola Ishigaki	Giappone	85.4 m
24.04.1771	Shiraho	Giappone	60 m
01.05.1792	Shimabara	Giappone	55 m
1853	Lituya Bay	Alaska	120 m
20.10.1880	Lituya Bay	Alaska	60 m
10.09.1899	Lituya Bay	Alaska	60 m
02.03.1933	Kaalualu	Hawaii	303 m
27.10.1936	Lituya Bay	Alaska	150 m
07.12.1944	Nachi River	Giappone	200 m
10.07.1958	Lituya Bay	Alaska	525 m
28.03.1964	Insenatura di Valdez	Alaska	70 m
09.08.1979	Isola Lombok	Indonesia	120 m

TABELLA 2

Contiene i dati relativi ad alcuni tsunami più recenti e più distruttivi, non solo per quanto riguarda i danni al patrimonio, ma, più drammaticamente, per il loro pesante bilancio di perdite di vite umane. Nell'ultima colonna è riportato il valore dell'intensità del terremoto (gradi della scala Richter) che ha innescato lo tsunami.

Località	Data	Morti	Runup max	Terremoto
Nicaragua	02.09.1992	170	9.7 m	7.2
Indonesia (Flores)	12.12.1992	1000	26 m	7.5
Mar del Giappone	12.07.1993	330	31 m	7.6
Indonesia (Est Giava)	03.06.1994	250	14 m	7.8
Isole Kurili	Ottobre 1994	11	9 m	8.1
Filippine (Mindoro)	15.11.1994	62	10 m	7.1
Papua Nuova Guinea	17.07.1998	3000	7-10 m	7.1