

Conclusioni

Riprendendo i concetti iniziali, il fatto di avere selezionato i rialzi marini a Venezia, riferendosi di volta in volta al livello annuo ed eliminando la parte astronomica, fornisce un criterio scientificamente oculato per indagare su mezzo secolo di mareografia. È ormai evidente che il realizzarsi di un'inondazione a Venezia e negli altri centri lagunari dipende in modo casuale dal maggiore o minore accordo tra la marea astronomica (regolarissima) e il rialzo meteorologico (che, forse ingiustamente, chiamiamo casuale).

Analizziamo dunque i rischi pratici che ne derivano. I rialzi sono, come si è già accennato, un fenomeno nettamente autunnale (essenzialmente tra ottobre e dicembre, con quasi la metà dei casi in novembre), ma rialzi di almeno 90 cm si sono prodotti occasionalmente (due casi su 23) anche in febbraio.

In numerosi casi i momenti di massimo rialzo non coincidono con quelli di un'alta marea astronomica sostenuta, il che attenua gli effetti potenziali di allagamento causato dalla perturbazione meteorologica. Ma si tratta di casi fortunati ed è comunque necessario rendersi conto del rischio che si è corso. Per esempio, se il massimo rialzo del novembre 1966 fosse avvenuto in corrispondenza ad un'alta marea di sizigia, invece che al momento di una marea calante di quadratura, l'acqua alta registrata (+194 cm) avrebbe potuto essere ancora più alta di alcuni decimetri.

Un altro fattore importante è la durata della perturbazione, che aumenta la probabilità che vari fattori negativi possano aggiungere i loro effetti. Con l'eccezione dei casi del novembre 1977 e dell'ottobre 1982, il residuo (ossia il rialzo medio, senza tener conto delle oscillazioni delle sesse) raggiunge sempre almeno 50 cm (con un massimo di 112 cm nel novembre 1966) e può rimanere al disopra di questa quota anche durante qualche decina di ore consecutive (41 ore nel novembre 1966, 36 ore nel dicembre 1992). Ciò aumenta le probabilità che gli effetti di una perturbazione meteorologica coincidano con un'alta marea astronomica sostenuta, aggravando gli effetti dell'allagamento.

Quanto alla permanenza dei livelli di marea osservati al disopra della quota critica di +110 cm rispetto allo zero del 1897, si può osservare che essa supera in più casi la durata di sei o sette ore, ossia del tempo che intercorre, normalmente, tra una bassa ed un'alta marea astronomica. In questi casi, soprattutto se ci si trova in periodo di sizigia, aumenta il rischio di un allagamento importante.

Una domanda cruciale, stante la preoccupazione per le pratiche conseguenze di questi rialzi, riguarda la tendenza del fenomeno, temendo una possibile accelerazione.

Conclusions

Returning to the introductory conceptions, we recall the selection adopted for the anomalous water levels in Venice.

Since, for each case, the yearly mean has been used for reference by including it in the astronomical part, which had been separated, a reliable criterion is available for the analysis of fifty years of hydrography. It is clear that a flood occurrence in Venice (and in neighboring centers) has a random dependence on the relative timing of the tide (which is regular) and the surge (that we assume random).

The practical risks deriving from this must be considered.

Surges, as it has been pointed out, are a typical phenomenon of autumn (between October and December, with almost one half of the cases in November), but events of at least 90 cm have been observed (two out of 23) also in February.

In many cases the surge peak does not coincide with a strong high tide, and this damps the potential flooding effects of a meteorological perturbation.

But being lucky cannot nullify our concern for risk. For example, should the surge of November 1966 have occurred at the time of a spring tide, instead of an ebb neap tide, the recorded level (194 cm) could have been higher by dozens of centimeters.

Another important element is the duration of the perturbation, which can increase the probability that unpleasant factors can add their effects.

Except for the cases of November 1977 and October 1982, the residual (i.e. the average surge, eliminating the seiche oscillations) always reaches at least 50 cm (with a maximum of 112 cm in November 1966) and can remain over this level continually for dozens of hours (41 hours in 1966, 36 in December 1992). This increases the probability that the effects of a meteorological perturbation coincide with a very high flood tide, producing substantial damage.

Considering the permanence of the observed level over the critical 110 cm (using the 1897 Datum), it exceeds in many cases six or seven hours, which is the time usually separating the ordinary high and low extremes. In these cases, particularly corresponding to spring tide, the risk of a dangerous flood is increased.

A vital question, due to the concern for the practical consequences of the surges, is the trend of the phenomenon, keeping in mind the possible increase of it.

Se si guarda dunque la frequenza, si nota che i cinque decenni che coprono il periodo ricevono i seguenti numeri: quattro casi ciascuno i primi tre, poi cinque casi, poi sei. Aumento nel tempo? Chiunque conosca la statistica rileva che i numeri sono troppo piccoli per confermare questa conclusione.

Se, all'interno di ogni decennio, si calcola l'altezza media dei rialzi (che, ripetiamo, sono tutti non minori di 90 cm), si ha una sequenza piuttosto casuale (in cm): 98,5 - 114,25 - 102,25 - 105,4 - 100,66.

Tornando alle frequenze, si trova che, raggruppando in modi vari gli eventi considerati, si ottiene sempre una tendenza all'aumento nel tempo. Infatti, il modo più sbrigativo per avere numeri ricchi, e quindi statisticamente più stabili, è quello di dividere in due parti uguali il cinquantennio, e si ottengono così otto casi nella prima metà contro i quindici della seconda. Se si preferisce dire così, i primi trent'anni (1951-80) hanno lo stesso numero di casi dei successivi vent'anni (1981-2000).

Ancora, sospettando l'influenza dei cicli solari di undici anni (cui si attribuiscono effetti climatici) si possono prendere solo quattro periodi di tale lunghezza (1953-63, 1964-74,...) e si lasciano perdere così il primo e l'ultimo caso. Si ottengono allora delle frequenze (3, 4, 6 e 7) la cui successione, anche se sempre con numeri piccoli, porta ancora nel senso della crescita temporale. Si può ricordare che ciò è in accordo con l'osservato aumento del vento di scirocco sul medio Adriatico, che ha chiaramente incrementato la frequenza dei rialzi di almeno 10 cm e di quelli di almeno 20 cm, soprattutto in mare aperto (Pirazzoli e Tomasin, 1999) ed è stimolo agli studi attualmente rivolti all'evoluzione della "burrascosità" (storminess).

Coerentemente con una precedente osservazione, se si controlla l'altezza media dei rialzi nei vari periodi, si ottiene ad esempio, nella partizione in venticinque e venticinque anni, 106,4 e 102,7 cm: va sempre osservato che il valore fuori classe del 1966 rende sempre dominante il periodo in cui cade.

Altre considerazioni riassuntive riguardano la presenza di venti di bora nettamente presenti almeno nelle ore che precedono il rialzo massimo: se ne possono isolare sette casi (su 23 in totale) con altri quattro male definiti, e nel complesso nessuna tendenza evolutiva.

Il più ripido fronte di salita dei rialzi è quello del primo caso considerato (novembre 1951) con una crescita media di oltre 17 cm per ora su tutta l'impennata. Si è accennato (più esattamente, per la marea osservata) che in questo caso, come in vari altri caratterizzati da un impulso meteorologico rapido, un aumento delle resistenze idrauliche nelle bocche di porto potrebbe tranciare la cuspide della marea, come recentemente dimostrato da Umgiesser (1999), attenuando notevolmente la gravità degli allagamenti. Nondimeno si è segnalato che in alcuni casi ciò non si applica.

Then, if the frequency is observed, the five decades in our time span have the following numbers: four cases in each of the first three periods, then five events, then six. Is it an increase in time? An elementary knowledge of statistics suggests that the abundancies are too small for any conclusion.

If, within each decade, the mean height of surges is computed, a random-looking sequence is obtained (in cm): 98.5, 114.25, 102.25, 105.4, 100.66.

Getting back to frequencies, grouping the events in various ways, a constant tendency to increase in time is obtained. Indeed, the fastest way to have abundant numbers (hence a more credible statistics) is to divide our fifty years into two equal parts. Eight cases are obtained in the first half and fifteen in the second.

Another way to express the result is that the same number of cases has occurred in the first thirty years (1951-80) as in the remaining twenty.

To maintain the sequence adopted above, the mean height of surges is reported for the partition of two 25-year periods: 106.4 and 102.7 cm are found. The exceptional surge of 1966 makes the interval in which it falls dominant in all cases.

Additionally, considering the influence of the eleven-year solar cycles (that should have climatic effects), one can consider only four periods of this length (1953-63, 1964-74,...) and disregard the first and last cases.

The frequencies obtained (3, 4, 6 and 7) are again tending, even if small numbers, to a time increase.

All this is consistent with the observed increase of the sirocco over the central Adriatic, causing an increment in the frequency of the surges that exceed 10 cm and the ones above 20 cm., mainly offshore (Pirazzoli and Tomasin, 1999). Studies on this observed "storminess" are developing.

Other compendious considerations concern the presence of bora (NE wind) blowing at least in the hours preceding the surge peak: seven out of 23 occurrences are found, with, in addition, four questionable cases, and in general no apparent trend is observed.

The steepest rise of a surge was observed in the first event (November 1951) with an average increase of more than 17 cm per hour for the whole rise time.

It was observed (more precisely, for the observed levels) that in many cases like the one of 1951, showing a quick meteorological pulse, an increase in the hydraulic resistance at the lagoon inlets could cut the top of the tidal curve, as it was recently demonstrated by Umgiesser (1999), making floods less severe.

Nevertheless, other events have shown, where this intervention would have no effect.

Con attribuzioni qualitative, si è cercato di ripartire tra vento e depressioni la causa dei rialzi studiati: in nove eventi le due cause sembrano equilibrarsi, mentre per il resto il vento ha il doppio di casi attribuiti rispetto alle depressioni.

L'escursione della sessa di 22 ore, che è compresa tra 43 e 104 cm nei casi considerati, con una media di 66 cm, risulta essere dello stesso ordine di grandezza dell'escursione della marea astronomica.

L'escursione più elevata (104 cm nel novembre 1966) non è però un massimo assoluto, dato che un valore di 112 cm è stato raggiunto il 12 marzo 1958 (Tomasin e Pirazzoli, 1999, Fig. 9), un evento che qui non è riportato non avendo le caratteristiche richieste. Da notare anche che in cinque dei casi qui considerati la sessa raggiunge il massimo valore nella parte negativa, mentre va ricordato l'evento relativamente fortunato dell'ottobre 1976, nel quale la sessa di 22 ore manifesta la sua massima ampiezza con netto ritardo rispetto al momento del massimo rialzo.

La sessa di 11 ore mostra, in tutti i casi esaminati, un'escursione più limitata, compresa tra 15 e 41 cm, con una media di 24 cm. Il massimo valore registrato (41 cm, di nuovo nel novembre 1966) è però ancora inferiore al massimo assoluto che è stato raggiunto il 13 dicembre 1967 con 46 cm (Tomasin e Pirazzoli, 1999, Figure 6 e 10), ancora un caso non riportato qui. In quella circostanza, l'ampiezza della sessa di 11 ore è risultata più che doppia rispetto a quella della sessa di 22 ore. Ciò è sorprendente se si pensa che nei casi qui considerati l'oscillazione principale è essa stessa come minimo doppia (approssimativamente) di quella di 11 ore, fino ad essere circa dieci volte superiore (dicembre 1957).

Con uno sguardo al futuro e riprendendo le precedenti considerazioni sul rischio derivante dalla durata delle perturbazioni, si rileva che essa non è trascurabile per l'eventuale progettazione di opere di protezione della laguna di Venezia contro l'acqua alta, soprattutto nel caso di un aumento eustatico del livello marino. Infatti, l'ultimo rapporto pubblicato dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), prevede che, in seguito all'aumento in atto dell'effetto serra, l'innalzamento del livello marino globale sarà compreso tra 20 e 86 cm, con un valore centrale di 49 cm (senza tener conto di eventuali effetti locali di subsidenza) per il 2100 (Warrick et al., 1996). Si può prevedere quindi che nei prossimi decenni gli effetti della marea astronomica e delle perturbazioni si svilupperanno attorno ad un livello medio marino più elevato dell'attuale.

Qualitatively, a separation between wind and low-pressure was sought as the cause of the surges considered here: in nine of the events both factors seem to be responsible, whilst, in the residual sample, wind has twice the number of predominances with respect to depression.

The range of the 22-hour seiche, spanning between 43 and 104 cm in the cases included here, is of the same order of magnitude of the tidal range. But the largest occurrence (104 cm in November 1966) is not an absolute maximum, since a 112-cm event was recorded on March 12, 1958 (Tomasin and Pirazzoli, 1999, fig.9), a case not considered here since it did not fulfill the conditions.

It is remarkable that in five of the present cases the principal seiche reaches its maximum value in the negative side, and the peculiar fact of October 1976 is worth noticing, when fortunately the 22-hour seiche deploys its largest amplitude well behind the maximum surge.

The 11-hour seiche shows, in all events considered, a smaller range, between 15 and 41 cm, with an average of 24 cm. The maximum value occurred here (41 cm, again in November 1966) does not reach the historical maximum, recorded on December 13, 1967, with 46 cm (Tomasin and Pirazzoli, 1999, fig. 6 and 10), another case not considered here.

In this latter event, the amplitude of the secondary seiche was more than twice the principal one: this is surprising, considering that in all the situations shown in the present work, the 22-hour seiche is at least twice (in the usual approximations) the 11-hour one, reaching a ratio close to 10:1 (December 1957).

Looking to the future and keeping in mind the risk posed by the duration of the perturbations, its relevance is stressed when planning possible protections of the lagoon from floods, particularly in case of eustatic increase of sea level. Indeed, the report of the Intergovernmental Panel on Climatic Change (IPCC), due to the rise caused by greenhouse effect, warns that the global increase will be between 20 and 86 cm, with a medial value of 49 cm (forgetting local subsidence phenomena) for 2100 (Warrick et al., 1996). What we can expect for the next decades is that tides, surges and seiches will develop around a mean sea level higher than the present one.