
Cambiamento climatico e protezione delle coste

Because waves are the prime destructive force, to design a safe structure, facts must be obtained about the expected waves and their action.

Ira Augustus Hunt

Marco Delle Rose

Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima, CNR, Lecce

Corrado Fidelibus

Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione, Università del Salento, Lecce

Mario Marcello Miglietta

Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima, CNR, Padova

Le aree costiere sono particolarmente sensibili al cambiamento climatico perché, oltre alle conseguenze legate alle variazioni di temperatura e precipitazioni, subiscono direttamente anche quelle dovute agli aumenti del livello medio del mare e dell'altezza delle onde. Le proiezioni dei modelli climatici prevedono che, entro la fine del XXI secolo, il livello medio del Mediterraneo potrebbe essere più alto di oltre mezzo metro rispetto all'attuale. Un altro effetto del riscaldamento dell'atmosfera terrestre nel Mediterraneo, ossia l'aumento dell'intensità e/o della frequenza di fenomeni meteorologici estremi, come i cicloni con caratteristiche tropicali (noti come *medicane*), potrebbe inoltre accelerare alcuni processi di erosione costiera. Tutto ciò comporterebbe notevoli impatti ambientali ed economici. Verranno qui illustrati alcuni esempi e discusse le conseguenze sulle opere e sulle attività dell'uomo.

La previsione degli impatti

Prevedere le conseguenze ambientali ed economiche del cambiamento climatico è un'attività scientifica complessa. Ovvio prerequisito è la disponibilità di ipotesi attendibili circa le variazioni dei parametri meteorologici (temperatura e umidità dell'aria, pressione atmosferica, radiazione solare) e dei fenomeni atmosferici (evaporazione, precipitazioni, vento). La previsione degli impatti sulle coste nel prossimo futuro necessita poi di un ulteriore dato, ossia di accurate stime della quota del livello medio marino. Uno dei metodi più utilizzati per questo scopo consiste nell'elaborare le serie di dati idrometrici disponibili per stabilire quantitativamente le tendenze in funzione di determinate variazioni climatiche. Per ciò che attiene l'innalzamento globale del mare calcolato in base a misure reali (dall'inizio del XIX secolo, cioè da quando sono in funzione un discreto numero di stazioni sparse per gli oceani e i mari), esso è compreso tra 16 e 21 centimetri, di cui circa 7 negli ultimi 30 anni [1]. Quest'ultimo dato indica un'evidente accelerazione del feno-

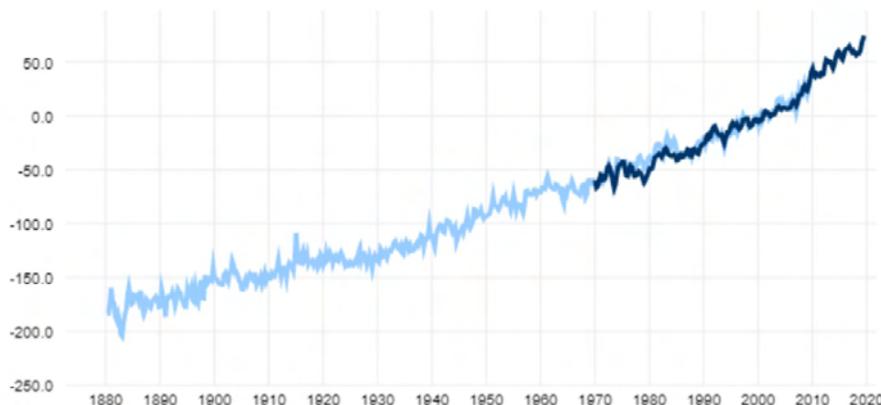


Figura 1: La linea azzurra mostra l'innalzamento del livello medio marino (in mm) in base a dati satellitari e misure idrometriche [2]. La linea blu si basa sui dati recentemente elaborati dalla Università delle Hawaii (<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level>).

meno [2] (figura 1), dovuta sia allo scioglimento dei ghiacci continentali (Antartide, Groenlandia), sia alla dilatazione delle masse d'acqua oceaniche (causata, a sua volta, dal riscaldamento delle loro superfici).

Per quanto riguarda le proiezioni del livello del Mar Mediterraneo, è stato stimato che esso potrebbe salire, in media, fino a 20 centimetri entro il 2050 e fino a 57 centimetri entro il 2100 [3]. Questi innalzamenti determineranno incrementi della vulnerabilità delle aree costiere ai fenomeni di allagamento, giacché le condizioni idrodinamiche potenzialmente più dannose risultano dalla combinazione dei livelli massimi di alta marea con le onde più alte prodotte durante le tempeste più estreme [4]. Di pari passo, aumenteranno anche i rischi di erosione delle coste e i relativi impatti socio-economici [5].

Il concetto base che unisce gli eventi estremi al riscaldamento climatico è l'aumento dell'energia immagazzinata nell'atmosfera, che renderà più ricorrenti le ondate di calore. Numerose ricerche scientifiche hanno mostrato la proporzionalità diretta tra riscaldamento climatico e numero, o intensità, degli eventi estremi attesi, ivi comprese le tempeste marine [6, 8, 7]. Vari tipi di eventi estremi sono stati analizzati attraverso diversi metodi di ricerca. Ad esempio, soluzioni analitiche e simulazioni Monte Carlo sono state utilizzate per quantificare l'effetto prodotto sul numero delle ondate di calore [9]. È stata così definita una relazione quasi lineare tra il numero di estremi caldi e la tendenza al riscaldamento. Tuttavia, per eventi che superano un valore soglia di deviazioni standard dalla media delle serie temporali utilizzate per le simulazioni, la dipendenza dal riscaldamento risulta fortemente non

lineare. Ciò a testimoniare la complessità delle risposte del sistema climatico terrestre alle variazioni di ogni singola componente. L'insieme delle simulazioni prodotte dai modelli di cambiamento climatico utilizzati negli studi dell'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) fornisce interessanti indicazioni sullo scenario climatico atteso al termine del secolo in corso [6]. Le simulazioni mostrano, in modo concordante, aumenti sia del numero dei giorni caldi, sia della durata delle ondate di calore, mentre gli estremi freddi sono previsti in diminuzione. Maggiori incertezze vi sono invece per ciò che riguarda gli eventi estremi di aridità e di pioggia, con l'eccezione di alcune aree geografiche. Pertanto, l'aumento di aridità nel bacino del Mediterraneo e quello delle precipitazioni eccezionali alle alte latitudini nell'emisfero settentrionale, risultano tra gli scenari con maggiori probabilità.

L'evoluzione nel tempo dell'intensità dei sistemi ciclonici di origine tropicale, in funzione dei cambiamenti climatici, è da tempo oggetto di particolare attenzione da parte degli studiosi. Il quadro delineato è piuttosto variegato. I record geologico-paleoclimatici (serie stragrafiche) mostrano variazioni secolari del numero di cicloni tropicali, sebbene non si identifichino tendenze significative per l'intero arco temporale coperto dalle misure idrometriche. Tuttavia, negli ultimi decenni sono stati osservati trend significativi, ad esempio, per quanto riguarda l'Oceano Atlantico [10]. Inoltre, i modelli climatici prevedono per il prossimo futuro una riduzione del numero atteso di cicloni tropicali su scala globale, unitamente però all'incremento delle intensità di quelli estremi [11]. Anche la letteratura scientifica che si occupa degli effetti del riscaldamento

damento climatico sulla tempestosità nel Mar Mediterraneo è ricca di contributi. Vari modelli oceanografici hanno implementato simulazioni barometriche con serie di misure del livello marino registrate, nell'ultimo secolo, da apposite stazioni di monitoraggio. A scala dell'intero bacino, vi è accordo in questi studi nel prevedere una tendenza generale di diminuzione della tempestosità, relativamente alla frequenza dei picchi locali e alla durata ed estensione areale delle mareggiate [12, 13]. A scala di maggior dettaglio, le previsioni basate su questo tipo di modellistica risultano invece di segno opposto per diversi mari del Mediterraneo, tra cui l'Adriatico meridionale e il Tirreno. Peraltro, la suddetta tendenza generale non risulta completamente giustificata dalla variazione del livello del mare indotta dalla pressione atmosferica.

Altre simulazioni utilizzano **modelli climatici accoppiati** (oceano-atmosfera) su scala globale o regionale ma comunque con alta risoluzione. Con questo approccio, e considerando diversi scenari di riscaldamento al termine dei prossimi 50 anni, si trovano importanti aumenti (rispetto ai valori attualmente misurati) delle altezze d'onda prodotte dalle tempeste sulle coste direttamente colpite dai cicloni tropicali [8]. Altri studi condotti sull'area mediterranea giungono ad analoghe conclusioni, sia mediante l'uso di modelli climatici accoppiati [14], sia attraverso altre metodologie quali analisi statistico-deterministiche [15]. Insomma, anche per le coste che si affacciano sul *Mare Nostrum* ci sono ragionevoli elementi per porre ancora più attenzione, già nell'immediato futuro, al problema della protezione dagli eventi estremi associati a intense tempeste. Nella sezione successiva, vengono quindi descritte le caratteristiche principali di perturbazioni atmosferiche tipiche del Mediterraneo, i *medicane*.

I *medicane*

A causa delle sue peculiari caratteristiche, il bacino del Mediterraneo è una delle aree nel mondo con più frequente genesi di cicloni. Molti di questi vortici sono a scala sinottica (scala orizzontale di migliaia di km), e sono responsabili delle perturbazioni atmosferiche che interessano comunemente le medie latitudini. Tuttavia,

le immagini satellitari hanno mostrato che esistono occasionalmente cicloni a mesoscala (scala orizzontale di decine/centinaia di km), che mostrano caratteristiche simili ai cicloni tropicali, sebbene siano più deboli e piccoli. Essi sono generalmente chiamati *medicane*, acronimo per uragani mediterranei [16]. Questi cicloni mostrano da satellite la presenza di un occhio privo di nubi sopra il loro centro, da cui si estendono bande a spirale di precipitazione. Inoltre, a differenza dei cicloni extra-tropicali, tipici delle nostre latitudini, hanno un nucleo centrale caldo, soprattutto in prossimità della superficie del mare, dove essi si sviluppano. Infatti, i processi di interazione aria-mare, attraverso gli intensi flussi superficiali che trasferiscono energia dall'oceano all'atmosfera, sono fondamentali per la loro intensificazione, insieme con il rilascio di calore latente dovuto alla convezione [17].

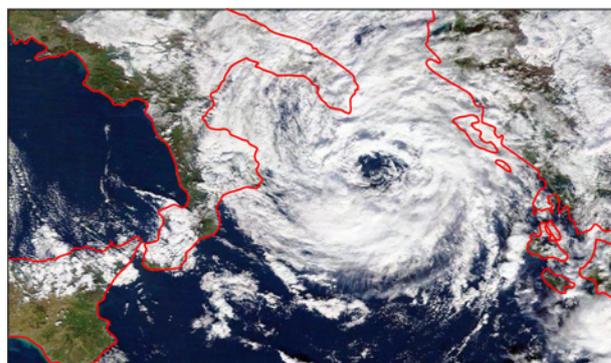


Figura 2: Immagine del satellite Terra MODIS, 18 Novembre 2017, ore 11.30 (ora locale).

Due sono le regioni più interessate da questo tipo di cicloni: la zona delle isole Baleari e quella del mar Ionio. I cicloni appartenenti a quest'ultima categoria si formano generalmente sottovento alla catena dell'Atlante, poi si spostano sul Mediterraneo meridionale, dove prendono energia dalla calda superficie del mare. Mentre alcuni di questi si spostano da ovest verso est, spingendosi sulle coste del Mediterraneo orientale, la maggior parte mostra una traiettoria verso nord-est, interessando la Sicilia, la Grecia, oppure spingendosi sino al Salento. Il 26 settembre 2006 un intenso Medicane attraversò in poche decine di minuti la penisola Salentina dallo Ionio verso l'Adriatico con un vento massimo misurato presso l'aeroporto di Galatina di 145 km/h [18]. Più recentemente, il 18 Novembre 2017 il ciclone "Numa" ha lambito le coste del sud Salento [19],

producendo venti intensi e forti precipitazioni (figura 2).

Negli ultimi anni, si è registrato un rinnovato interesse sui *medicane*, dovuto al forte impatto di questi vortici, spesso associati a venti e precipitazioni particolarmente intensi sulle aree costiere del Mediterraneo. Talvolta, i forti venti determinano onde molto alte. Ad esempio, il ciclone "Rolf", che ha interessato il Mediterraneo occidentale tra il 5 e il 9 novembre 2011, ha causato venti a 10 m di quota superiori a 108 km/h responsabili di altezze d'onda significativa sino a 8 m, che hanno in parte interessato la costa francese del Mediterraneo [20].

Un altro argomento di forte interesse sono le implicazioni del cambiamento climatico per l'intensità e la localizzazione geografica dei *medicane*. Recenti studi, che utilizzano simulazioni con modelli climatici regionali e globali, concordano nel prevedere nel clima futuro un aumento di intensità di questi cicloni, ma una leggera diminuzione del loro numero [7]. In altri termini, le condizioni favorevoli al loro sviluppo saranno meno frequenti, ma aumenterà il numero degli eventi molto intensi, grazie anche alla più alta temperatura del mare e, quindi, alla maggiore energia disponibile. Comunque, i risultati di questi studi dovranno essere verificati in futuro utilizzando modelli con risoluzioni più elevate, che sono diventate disponibili negli ultimi anni, possibilmente utilizzando sistemi modellistici accoppiati che rappresentano in modo coerente i processi di interazione aria-mare. I progressi nella formulazione dei modelli e nella loro risoluzione forniranno una più adeguata rappresentazione del rischio di cicloni intensi in un contesto di cambiamento climatico.

Su alcune recenti mareggiate

La costa ionica del Salento (Puglia) è stata colpita negli ultimi anni da intense mareggiate, i cui effetti sono stati evidenziati dai media con riferimento sia ai danni alle infrastrutture e agli arretramenti degli arenili, sia ai pericoli per la pubblica incolumità. Peraltro, dopo essere stato lambito dal *medicane* "Zorbas" [21], nell'autunno 2018 il Salento è stato anche interessato da altri fenomeni meteorologici estremi quali anomalie termiche e precipitazioni eccezionali [22]. Sei epi-

sodi di **mare agitato** e **molto agitato** sono stati registrati, tra Ottobre e Novembre, dalla stazione Liby dell'Aeronautica Militare di S. Maria di Leuca in base al codice aeronautico internazionale (*aeronautical Q-signal*) QUK, unitamente a elevati valori di lunghezza d'onda stabiliti mediante il codice QUL nei bollettini METAR di interesse per la meteorologia aeronautica. Oltre a numerosi danni a beni materiali, le mareggiate hanno anche causato lo spostamento di vari blocchi di roccia sulla piattaforma costiera. Uno di essi, con volume inferiore a 1 m³ (peso stimato inferiore alla 2 tonnellate), è stato staccato dalla massa rocciosa secondo piani di discontinuità stratigrafica e tettonica, lasciando ben in vista la nicchia di distacco a indicare la posizione del blocco precedente l'impatto delle onde di tempesta (figura 3).



Figura 3: Torre Suda; in alto, sono evidenziati il blocco staccato dalla massa rocciosa (in primo piano) e un suo frammento (sullo sfondo); in basso, la nicchia di distacco ubicata a circa 7 m dal blocco.

Questa singolare situazione ha permesso di effettuare uno specifico studio teorico-osservazionale [23]. In particolare, per deter-

minare l'altezza delle onde in mare aperto [24], la velocità del flusso sulla piattaforma (onda di *bore*) in corrispondenza della posizione iniziale del masso [25] è stata messa in relazione con le condizioni dinamiche per le quali lo stesso può essere rimosso [26]. Il risultato ottenuto (3.6 m) è paragonabile con le altezze delle onde significative registrate dalla stazione di S. Maria di Leuca (valori compresi tra 2.5 e 6 m) nel periodo considerato. Ciò suggerisce una bassa capacità del fondale antistante la costa a dissipare per attrito l'energia del moto ondoso. Occorre rilevare che per lo spostamento del blocco di figura 3 si può escludere come evento causativo l'impatto sulla costa di uno tsunami. Infatti, nel periodo considerato, il terremoto potenzialmente **tsunamigenico** più rilevante, quello di magnitudo Mw 6.8 verificatosi a largo di Zante il 26 Ottobre 2018 (per il quale la Protezione Civile nazionale ha dichiarato un'allerta arancione per le coste di Puglia e Calabria) ha prodotto solo un innalzamento di una decina di centimetri nel Golfo di Taranto [23].

Condizioni meteorologiche estreme si sono nuovamente manifestate sulla costa ionica del Salento il 12-13 Novembre 2019. Un profondo vortice ciclonico in moto verso nord nel Mediterraneo centrale, di cui alcuni modelli prevedevano un'evoluzione in medicane, ha portato venti di scirocco con raffiche di 100 km/h sul Salento ionico. I valori di QUL riportati presso la stazione di S. Maria di Leuca dal mattino del 12 novembre al pomeriggio del 13 sono compresi tra 6 a 8, quelli di QUK tra 7 e 9. La lunghezza delle onde morte ha quindi superato i 200 m. Lo stato del mare è stato da **grosso** a **tempestoso** con relative altezze delle onde significative comprese tra 9 e oltre 14 m. La tempesta scatenata dal ciclone ha causato danni alle infrastrutture e disagi alle attività. A Gallipoli, il lungomare è stato chiuso al traffico a causa di blocchi di roccia rimossi dalle barriere frangiflutti e frammenti di manufatti, trascinati nel mezzo della carreggiata dalla furia delle onde. Il blocco di dimensioni maggiori presentava un volume di circa 3 m³ e un peso stimato di circa 8 tonnellate (figura 4). In altre località, la tempesta ha divelto muretti del lungomare distanti dalla linea di costa sino a circa 25 metri. Risulta estremamente complesso determinare l'energia delle onde che può aver

spostato tali blocchi. Valutazioni orientative sono tuttavia possibili ricorrendo, anche in questo caso, a formule idrodinamiche **speditive**, per le quali forma dei blocchi e profilo della costa sono geometricamente semplificate, e conseguire a ritroso il valore di tale energia [23, 25]. Sulla base di queste formule, per i blocchi spostati durante la tempesta del 12-13 Novembre 2019, le altezze in mare aperto delle onde risultano comprese tra 3.8 e 6.8 m, valori congruenti con le altezze delle onde significative misurate dalla stazione di S. Maria di Leuca.

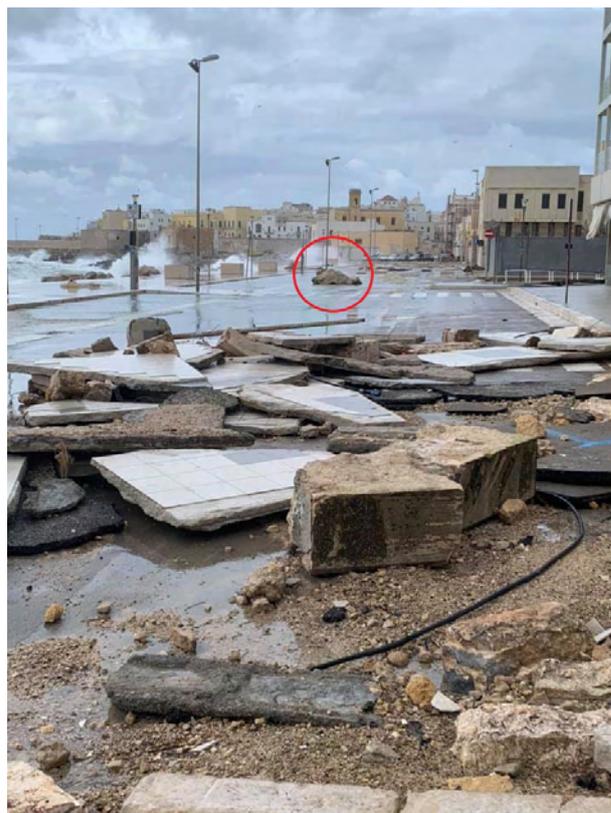


Figura 4: Gallipoli, lungomare della Giudecca; effetti della mareggiata del 12-13 novembre 2019. Il blocco asportato dalla barriera frangiflutti è evidenziato dal cerchio rosso.

Gli esempi descritti evidenziano comunque la necessità di proteggere le coste dalle onde di tempesta mediante la programmazione di adeguati interventi ingegneristici.

La protezione delle coste

L'innalzamento del livello marino e l'intensificazione delle perturbazioni cicloniche costituiscono motori meccanici dell'alterazione delle coste, che si sostanzia in danni diffusi a infrastruttu-

Lo spostamento di blocchi costieri per effetto di onde di tempesta

Nella letteratura scientifica non mancano episodi ben documentati di trasporto di blocchi di roccia causati da onde di tempesta (si vedano ad esempio [28, 29, 30]). Quello descritto da C. A. Süssmilch [31] ha un significato particolare, trattandosi dello spostamento per circa 50 metri di un masso di ben 235 tonnellate (volume 100 m^3). In base ai modelli idrodinamici e alle equazioni solitamente utilizzati, le onde di tempesta non dovrebbero possedere energia sufficiente per spostare un blocco di tali proporzioni. Ciò evidenzia come le semplificazioni modellistiche, pur necessarie per l'avanzamento delle conoscenze e per le applicazioni pratiche, possono talvolta non cogliere la reale complessità dei fenomeni naturali. Processi non considerati dai modelli possono essere determinanti, come ad esempio l'aumento di altezza dell'onda all'impatto con la costa per effetto di ben definite interazioni tra più onde frangenti in gruppo (*wave amplification*, teoricamente sino a oltre 5 volte l'altezza dell'onda significativa in mare aperto, [32]). Non a caso, quindi, alcuni ricercatori sostengono la necessità di definire un nuovo paradigma scientifico per l'analisi del processo idrodinamico in questione, anche avvalendosi di modelli tridimensionali che richiedono notevoli risorse computazionali [33, 34].

Infine, due precisazioni terminologiche. 1) L'altezza dell'onda significativa (H_s) corrisponde alla media delle altezze del terzo più alto delle onde. Tali altezze possono essere stimate da osservatori esperti oppure elaborate da misure ondametriche. Si tratta di un parametro di peculiare importanza sia in oceanografia, sia in ingegneria. Valga ad esempio il fatto che H_s è considerato nella progettazione delle opere di protezione delle coste. 2) Le onde che risalgono la terraferma, dopo aver sormontate le ripe costiere e in determinate situazioni topografico-batimetriche, assumono una forma simile a quella delle onde di marea che si muovono controcorrente lungo le foci dei grandi fiumi (*tidal-bore* della letteratura in lingua inglese). Ecco perchè sono denominate *bore-like waves* o, più semplicemente, onde di *bore*.

re ed edifici. Imperativo è ridurre i danni con specifici progetti di protezione costiera. In generale, due approcci possono essere utilizzati nella redazione di tali progetti: un approccio *hard* e uno naturalistico (*soft engineering approach*) [27]. Con il primo si concepiscono barriere frangiflutti, blocchi con muro di cemento a tergo e pennelli, con il secondo approccio ripascimenti, dune e paludi salmastre.

L'approccio *hard* è convenzionale e largamente usato e abusato nel passato, è intuitivo e provvede alla necessità di conseguire un risultato sicuramente nel breve termine. In molte situazioni le opere costruite con questo approccio hanno funzionato e continuano a funzionare; tuttavia, in assenza di una visione dilatata rispetto al problema locale, esse sovente comportano l'aumento di erosione e squilibri ecologici nei settori di costa confinanti. Inoltre, in base ai previsti tassi di innalzamento del livello del mare, mentre le quantità dei materiali e i costi associati per le opere di estensione limitata dovrebbero aumentare linearmente, per quelle di portata maggiore, quali ad

esempio le protezioni di grandi contesti urbani, i futuri incrementi dei costi dei materiali e del lavoro, potrebbero contribuire ad un aumento non lineare delle spese da sostenere [35].

Con le opere naturalistiche si dispiega una azione di mitigazione considerando importanti estensioni costiere per un orizzonte temporale nel medio/lungo termine, nel quadro di una analisi olistica dei fattori dominanti i processi di erosione e delle interazioni tra questi [36]. Esse costano meno delle strutture *hard* e possono garantire le stesse capacità di protezione. Tuttavia, il loro uso è condizionato da fattori ambientali e vincoli fisici ed è complessa la loro evoluzione, con modelli di previsione particolarmente incerti. I ripascimenti degli arenili, per esempio, sono applicati più volte con oneri addizionali particolarmente corposi.

Perciò può risultare conveniente ricorrere a un approccio ibrido, combinando la flessibilità dell'approccio *hard* con i benefici ecologici della *soft engineering* [37]. Ad esempio, in Olanda è in corso di attuazione il progetto *Sand Motor*, per il

quale si prevede di associare a barriere strutturali una penisola artificiale sabbiosa, che si prevede l'oceano rimodelli in spiagge e dune. Secondo l'approccio ibrido, barriere, blocchi e pennelli dovrebbero costruirsi insieme a strutture naturali, quali appunto paludi e dune, spostando gli edifici verso l'entroterra quando indispensabile. Tale modello potrebbe essere adattabile, peraltro, nell'area costiera compresa tra San Cataldo e Le Cesine (provincia di Lecce, figura 5), dove a ridosso degli specchi d'acqua salmastra, le barriere frangiflutti messe in opera a più riprese negli ultimi decenni, condizionano l'evoluzione delle dune e dei canali di collegamento con il mare (bocche). Questo approccio *soft* fornirebbe protezione nel medio/lungo termine contro eventi non estremi, mentre l'impatto dei cicloni dovrebbe trasferirsi alle strutture solide artificiali. Con progetti di questo tipo si incrementerebbe la resilienza della costa [38].

L'approccio naturalistico, anche ibridizzato, non è tuttavia applicabile nelle aree fortemente urbanizzate. L'innalzamento del livello del mare obbligherà comunque a rimuovere o spostare infrastrutture ed edificazione, pertanto potrebbe essere logico implementare in concomitanza strutture naturalistiche. Diverse città costiere si apprestano a modificare l'assetto delle loro zone costiere in questo modo, si veda l'esempio di Seoul in Corea.

Tuttavia, indipendentemente dal rapporto tra strutture naturali e artificiali, l'approccio ibrido nel contesto di una analisi olistica predispone al coinvolgimento di tutti i soggetti interessati alla protezione costiera relativamente a una estensione più ampia e nel medio/lungo termine. Inevitabilmente, la progettazione deve scalare a livello regionale o più che regionale nell'ambito di piani, i cui singoli elementi devono essere realizzati secondo programmazione con chiara disponibilità di fondi. Particolare importanza, soprattutto alla luce della evoluzione climatica, è l'osservazione e il monitoraggio durante e dopo la realizzazione delle opere, allo scopo di procedere se necessario con miglioramenti (figura 5).

Bisogna comunque scongiurare il ricorso al gigantismo strutturale cioè a un approccio *iperghard*, per il quale si procederebbe alla realizzazione di opere strutturali di enormi dimensioni. Per esempio, il Royal Netherlands Institute for

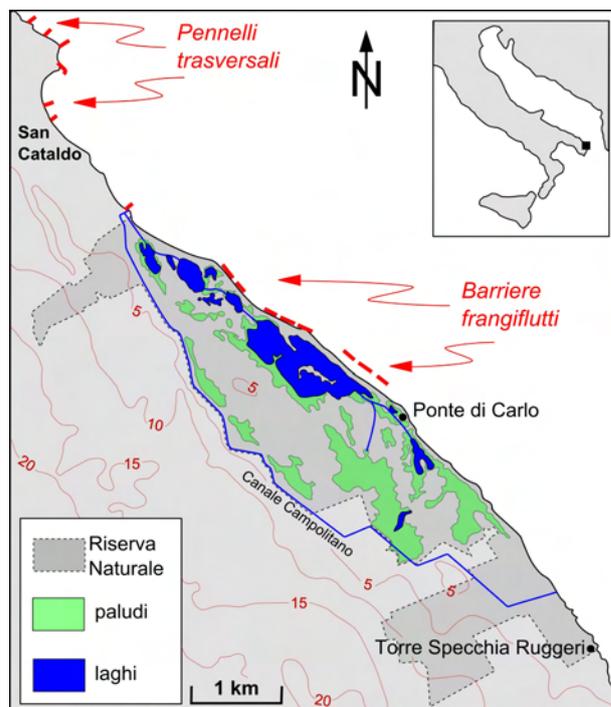


Figura 5: Carta schematica della zona San Cataldo - Le Cesine (Provincia di Lecce). Sono evidenziate le opere di protezione costiera che necessitano di osservazione e monitoraggio.

Sea Research ha recentemente proposto la costruzione di una prima diga di 475 km tra il nord della Scozia e la Norvegia e di una seconda diga di 160 km tra la Francia Occidentale e il sud-est dell'Inghilterra per segregare completamente il mare del Nord e proteggere circa 25 milioni di abitanti dai danni derivanti dall'innalzamento del livello del mare. Il costo di una tale opera si aggirerebbe tra 250 e 500 miliardi di euro. Risulta ben evidente che un'opera del genere, ancorché tecnicamente fattibile (la profondità del mare del Nord non supera i 130 m, si potrebbero quindi costruire delle barriere su piattaforme), comporterebbe un cambio drastico dell'ecosistema, con conseguenze difficilmente prevedibili, a parte alcuni complicati problemi economici. Si potrebbe derubricare facilmente la proposta a provocazione, tuttavia vi è la tentazione di procedere con il gigantismo strutturale che già nel passato per altre situazioni ha comportato problemi irreversibili e intollerabili, mentre sarebbe decisamente auspicabile istruire le popolazioni costiere verso la resilienza e procedere con progetti semplici, diffusi, pianificati e condivisi.



- [1] W.V. SWEET, R. HORTON, R.E. KOPP, A.N. LEGRANDE, A. ROMANOU; "Sea level rise", In: *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, U.S. Global Change Research Program 1* (2017) 333.
- [2] J.A. CHURCH, N.J. WHITE: "Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century", *Surveys in Geophysics* **32** (2011) 585.
- [3] A. VECCHIO, M. ANZIDEI, E. SERPELLONI, F. FLORINDO: "Natural Variability and Vertical Land Motion Contributions in the Mediterranean Sea-Level Records over the Last Two Centuries and Projections for 2100", *Water* **11** (2019) w11071480.
- [4] H.F. STOCKDON, R.A. HOLMAN, P.A. HOWD, A.H. SALLENGER: "Empirical parameterization of setup, swash, and runup", *Coastal Engineering* **53** (2006) 573.
- [5] E.J. THEUERKAUF, A.B. RODRIGUEZ, S.R. FEGLEY, R.A. LUETTICH: "Sea level anomalies exacerbate beach erosion", *Geophysical Research Letters* **41** (2014) 5139.
- [6] B. ORLOWSKY, S.I. SENEVIRATNE: "Global changes in extreme events: regional and seasonal dimension", *Climatic Change* **110** (2012) 669.
- [7] M. A. GAERTNER, J. J. GONZALEZ-ALEMAN, R. ROMERA, M. DOMINGUEZ, V. GIL, E. SANCHEZ, C. GALLARDO, M. M. MIGLIETTA, K. WALSH, D. SEIN, S. SOMOT, A. DELL'AQUILA, C. TEICHMANN, B. AHRENS, E. BUONOMO, A. COLETTE, S. BASTIN, E. VAN MEIJGAARD, G. NIKULIN: "Simulation of medicanes over the Mediterranean Sea in a regional climate model ensemble: impact of ocean-atmosphere coupling and increased resolution", *Climate Dynamics* **51** (2018) 1041.
- [8] B. TIMMERMANS, C. PATRICOLA, M. WEHNER: "Simulation and Analysis of Hurricane-Driven Extreme Wave Climate Under Two Ocean Warming Scenarios", *Oceanography* **6** (2018) oceanog.2018.218.
- [9] S. RAHMSTORE, D. COUMOU: "Increase of extreme events in a warming world", *Proceedings of the National Academy of Sciences* **108** (2011) 17905.
- [10] G. HOLLAND, C.L. BRUYÈRE: "Recent intense hurricane response to global climate change", *Climate Dynamics* **42** (2014) 617.
- [11] K.J.E. WALSH ET ALII: "Tropical cyclones and climate change", *WIREs Climate Change* **7** (2016) 65.
- [12] M. MARCOS, G. JORDÀ, D. GOMIS, B. PERÉZ: "Changes in storm surges in southern Europe from a regional model under climate change scenarios", *Global and Planetary Change* **77** (2011) 116.
- [13] Y.S. ANDROULIDAKIS, K.D. KOMBIADOU, C.V. MAKRIS, V.N. BALTİKAS, Y.N. KRESTENITIS: "Storm surges in the Mediterranean Sea Variability and trends under future climatic conditions", *Dynamics of Atmospheres and Oceans* **71** (2015) 56.
- [14] J.J. GONZALEZ-ALEMAN, S. PASCALE, J. GUTIERREZ-FERNANDEZ, H. MURAKAMI, M.A. GAERTNER, G.A. VECCHI: "Potential increase in hazard from Mediterranean Hurricane activity with global warming", *Geophysical Research Letters* **46** (2019) 1754.
- [15] R. ROMERO, K. EMANUEL: "Medicane risk in a changing climate", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **118** (2013) 5992.
- [16] M.M. MIGLIETTA: "Editorial, Mediterranean tropical-like cyclones (Medicanes)", *Atmosphere* **10** (2019) 206.
- [17] M.M. MIGLIETTA, R. ROTUNNO: "Development mechanisms for Mediterranean tropical-like cyclones (medicanes)", *Quaternary Journal of the Royal Meteorological Society* **145** (2019) 1444-1460.
- [18] A. MOSCATELLO, M. M. MIGLIETTA AND R. ROTUNNO: "Numerical analysis of a Mediterranean 'hurricane' over south-eastern Italy", *Monthly Weather Review* **136** (2008) 4373.
- [19] A.C. MARRA, S. FEDERICO, M. MONTOPOLI, E. AVOLIO, L. BALDINI, D. CASELLA, L. D'ADDERIO, S. DIETRICH, P. SANÒ, R. TORCASIO, G. PANEGROSSI: "The precipitation structure of Mediterranean tropical-like cyclone Numa: Analysis of GPM observations and numerical weather prediction model simulations", *Remote Sensing* **11** (2019)
- [20] A. RICCHI, M. M. MIGLIETTA, F. BARBARIOL, A. BENETAZZO, A. BERGAMASCO, D. BONALDO, C. CASSARDO, F. M. FALCIERI, G. MODUGNO, A. RUSSO, M. SCLAVO, S. CARNIEL: "Sensitivity of a Mediterranean tropical-like cyclone to different model configurations and coupling strategies", *Atmosphere* **8** (2017) 1.
- [21] R. PORTMANN, J.J. GONZALEZ-ALEMAN, M. SPRENGER, H. WERNLI: "Medicane Zorbas: Origin and impact of an uncertain potential vorticity streamer", *Weather and Climate Dynamics Discussion in review* (2019) wcd-2019-1
- [22] F. CONGEDO: "Autunno 2018: la stagione dei fenomeni estremi salentini", <https://www.supermeteo.com/autunno-2018-la-stagione-dei-protect\discretionary{\char\hyphenchar\font}{-}{fenomeni-estremi-salentini/>.
- [23] L. CIRICUGNO, M. DELLE ROSE, C. FIDELIBUS, L. ORLANDUCCI, M. MANGIA: "Sullo spostamento di massi costieri causato da onde "estreme" (costa ionica salentina)", *Geologi e Territorio* **2/19** (2019) 15.
- [24] I.A. HUNT: "Design of seawalls and breakwaters", *ASCE Journal of Waterways and Harbours Division* **85(WW3)** (1959) 123.
- [25] J.C COX, J. MACHEMEHL: "Overload bore propagation due to an overtopping wave", *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng* **112** (1986) 161.
- [26] N.A.K. NANDASENA, R. PARIS, N. TANAKA: "Reassessment of hydrodynamic equations: Minimum flow velocity to initiate boulder transport by high energy events (storms, tsunamis)", *Marine Geology* **281** (2011) 70.
- [27] H. HAUSMANN: "Soft vs Hard Engineering for Coastal Defense Adaptation", *A Climate Institute Publication* (2019).
- [28] G. MASTRONUZZI, P. SANÒ: "Large boulder accumulations by extreme waves along the Adriatic coast of southern Apulia (Italy)", *Quaternary International* **120** (2004) 173-184.
- [29] N. SAINTILAN, K. ROGERS: "Recent storm boulder deposits on the Beecroft Peninsula, New South Wales, Australia", *Geographical Research* **43** (2005) 429.

- [30] L.A. NAYLOR, W.J. STEPHENSON, H.C.M. SMITH, O. WAY, J. MENDELSSOHN, A. COWLEY: "Geomorphological control on boulder transport and coastal erosion before, during and after an extreme extra-tropical cyclone", *Earth Surface Processes and Landforms* **41** (2016) 685.
- [31] C.A. SÜSSMILCH: "Note on some recent marine erosion at Bondi", *Royal Society of New South Wales Journal Proceeding* **46** (1912) 71.
- [32] F. CARBONE, D. DUTYKH, J.M. DUDLEY, F. DIAS: "Extreme wave runup on a vertical cliff", *Geophysical Research Letters* **40** (2013) 3138.
- [33] A. ZAINALI, R. WEISS: "Boulder dislodgement and transport by solitary waves: Insights from three-dimensional numerical simulations", *Geophysical Research Letters* **42** (2015) 4490.
- [34] R. WEISS, A. SHEREMET: "Toward a new paradigm for boulder dislodgement during storms", *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* **18** (2017) 2717.
- [35] S.N. JONKMAN, M.M. HILLEN, R.J. NICHOLLS, W. KANING, M. VAN LEDDEN: "Costs of Adapting Coastal Defences to Sea-Level Rise - New Estimates and Their Implications", *Journal of Coastal Research* **29** (2013) 1212.
- [36] H. A. BATTJES: "Developments in coastal engineering research", *Coastal Engineering* **53** (2006) 121.
- [37] J. A. G. COOPER, J. MCKENNA: "Working with natural processes: the challenge for coastal protection", *The Geographic Journal* **174** (2008) 315.
- [38] A. E. SUTTON-GRIER, K. WOWK, H. BAMFORD: "Future of our coasts: the potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems", *Environmental Science and Policy* **51** (2015) 137.



Marco Delle Rose: è ricercatore in Scienze della Terra presso l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima del CNR. Ha fatto parte del Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche del Consiglio Nazionale delle Ricerche dal 2002 al 2009. Nel 2012 e nel 2019 ha partecipato a missioni scientifiche nel Deserto di Nazca (Perù) finalizzate allo studio degli effetti prodotti da mega-eventi *El Niño* avvenuti nel passato. Si occupa di idrogeologia, geomorfologia e cambiamenti climatici.

Corrado Fidelibus: è ricercatore presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione dell'Università del Salento e titolare dell'insegnamento di Geotecnica per il corso di Diploma di Laurea in Ingegneria Civile dello stesso ateneo. Dottore di ricerca in Geotecnica, è stato dal 2002 al 2007 assistente senior alla ricerca (Oberassistent) presso il Dipartimento di Scienze della Terra del

Politecnico Federale di Zurigo (ETH). La sua attività scientifica si inquadra nella meccanica delle rocce, nella geo-idrologia e nella geomeccanica computazionale con riferimento principalmente a problemi di carattere ambientale.

Mario Marcello Miglietta: è dirigente di ricerca presso ISAC-CNR, di cui è membro del Consiglio d'Istituto e tra i coordinatori dell'area strategica *Osservazioni e modelli per la meteorologia ed il clima*. Dottore di Ricerca in Fisica, ha fatto parte del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare dal 1993 al 2001. La sua attività scientifica si focalizza sugli eventi intensi nel contesto del cambiamento globale, in particolare precipitazioni orografiche, cicloni, supercelle e trombe d'aria nel Mediterraneo.

