

Variazioni relative del livello dei mari

Previsione degli impatti sulle coste italiane e del mondo

DOI 10.12910/EAI2014-103

di **Fabrizio Antonioli**, *ENEA*

Circa un anno fa la concentrazione atmosferica media di anidride carbonica ha raggiunto e superato le 400 parti per milione, non è questo il miglior viatico rispetto alle raccomandazioni negoziate con la COP21 tenuta a Parigi lo scorso dicembre. Per prevenire effetti dannosi sulle coste italiane è bene poter comprendere quali scenari e conseguentemente quali impatti sono attesi per i prossimi decenni. Ricostruire le diverse componenti che concorreranno a definire le variazioni relative del livello del mare in un dato settore costiero costituisce la base per la programmazione e la difesa del territorio dal cambiamento globale atteso: l'adattamento al clima del futuro.

Le cause delle variazioni relative del livello marino

Nel corso delle ere geologiche il livello del mare ha sempre subito delle

oscillazioni. Tutte queste oscillazioni possono essere connesse a cause astronomiche, climatiche o geologiche; si tratta della sommatoria di variazioni che interessano l'intero globo a cui vanno sommate variazioni locali che differiscono, anche sensibilmente, da settore a settore. Durante l'ultimo periodo "caldo" molto simile al nostro, occorso 125 mila anni fa, il livello del mare era più alto di 8 metri dell'attuale (con 290 ppm di anidride carbonica nell'atmosfera). Un solco di battente fossile del tutto simile a quello attuale (Figura 1) è rimasto scolpito sulle pareti carbonatiche della Sardegna occidentale (una delle più stabili aree costiere italiane).

Detto con parole semplici, i quattro diversi contributi che concorrono all'attuale sollevamento di livello dei mari italiani sono: lo scioglimento dei ghiacci, il riscaldamento superficiale delle acque, l'isostasia ed i movimenti tettonici verticali. Ciò che

misura il mareografo (registratore del livello del mare posizionato nei porti su strutture solide e fisse) è l'effettiva sommatoria di tutti i movimenti relativi del mare, non a caso i mareografi di Trieste (o Marsiglia) e di Venezia (entrambi con circa 100 anni di funzionamento) mostrano dei trend molto diversi tra loro: il primo indica poco più di 13 centimetri di sollevamento, il secondo 24 centimetri. Venezia infatti, oltre alla componente dello scioglimento dei ghiacci e quella isostatica (molto simile a Trieste e Marsiglia), è sottoposta a notevoli abbassamenti tettonici.

Movimenti verticali delle coste: tettonica e isostasia

L'Italia è un paese geologicamente "vivo" dove vulcani, terremoti e bradisismi si manifestano con grande frequenza anche in aree costiere. A scala locale i movimenti geofisici costieri indotti dalla situazione

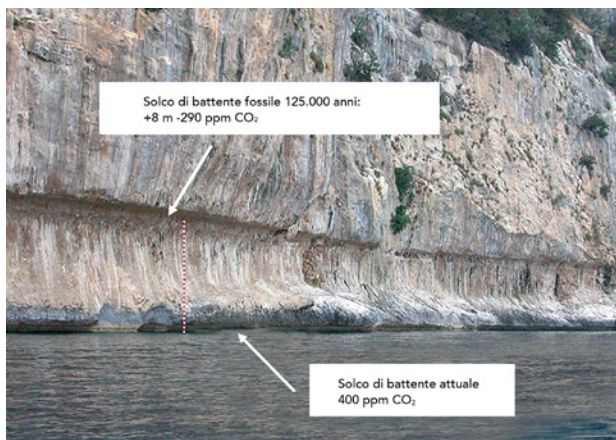


Fig. 1 Solco di battente fossile di 125mila anni rimasto scolpito sulle pareti carbonatiche del Golfo di Orseoi (Sardegna)

geologica locale costituiscono una componente da tenere presente nel computo delle variazioni relative del livello marino. Questi movimenti geofisici possono, infatti, sollevare o abbassare le coste italiane. È vero che non si tratta di variazioni dovute a oscillazioni climatiche, ma il loro effetto, nel computo del rischio futuro della costa, assume una grande importanza. I movimenti verticali tettonici sono stati riassunti nella Figura 2.

Appare chiaro come estese aree costiere in Toscana, Sardegna, Lazio meridionale, nonché porzioni della Sicilia occidentale, possono considerarsi sostanzialmente stabili. Il Friuli, il Veneto e l'Emilia-Romagna sono invece aree in grande subsidenza tettonica. Fra i principali settori attualmente in sollevamento lungo la penisola italiana vi sono la Calabria e la Sicilia orientale.

Da tali osservazioni si può facilmente dedurre come nelle aree costiere site in zone tettonicamente attive si instaurino movimenti tettonici di sollevamento o abbassamento i cui tassi oscillano fra -1 mm/anno +2.4 mm/anno.

La subsidenza nelle pianure costiere può essere correlata sia a cause naturali (per es. al costipamento dei sedimenti), sia connessa con le attività antropiche (bonifica idraulica, estrazione di fluidi, sfruttamento degli idrocarburi). A titolo di esempio, l'abbassamento della fascia costiera emiliano-romagnola ha fatto registrare tassi di subsidenza che hanno raggiunto i 70 mm/anno, di cui quelli riconducibili ad attività umane, per estrazione di gas ed emungimento di acqua, sono pari a 10-30 mm/anno.

Le previsioni sul livello marino futuro e gli impatti previsti sulle coste italiane

Nel 2004 è stata pubblicata una ricerca multidisciplinare che ha evidenziato come il livello del mare non ha mai subito accelerazioni così alte come quella avvenuta in questo secolo. Questa affermazione si basa sui dati archeologici relativi alla quota di piscine di allevamento di pesci di

epoca romana (2000 anni fa), oggi sommerse a -1,20 m nel mare Tirreno, e sull'analisi dei mareografi italiani (Lambeck et al., 2004).

Le previsioni di quanto si alzerà il livello marino nel prossimo futuro (anno 2100) sono basate sul riscaldamento del pianeta, sulle ricostruzioni paleoclimatiche, sui dati mareografici, sulle variazioni storiche della temperatura media della Terra, sulle masse di ghiaccio potenzialmente in scioglimento e sull'effetto dell'espansione termica degli oceani connesse al riscaldamento globale e conseguente concentrazione in CO₂. Il recente rapporto dell'IPCC 2013 (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change) ha affrontato lo studio dei cambiamenti climatici in atto, lo sviluppo di scenari futuri (Figura 3), la definizione della vulnerabilità dei sistemi naturali e sociali, nonché le strategie di adattamento e di mitigazione secondo i diversi scenari di emissione considerati, a seconda dei possibili mo-



Fig. 2 Movimenti tettonici verticali sulle coste italiane espressi in mm/anno

delli di sviluppo socio-economico mondiale.

Per la creazione di mappe di allagamento delle piane costiere oggi depresse (al livello zero o sotto) è necessario tenere conto di quanto pubblicato da IPCC a livello globale e sommarlo con i movimenti geofisici locali. Nella panoramica globale, alcuni studi e mappe sono state redatte per il Bangladesh (Karim and Mimura, 2008), per la costa occidentale degli Stati Uniti (Strauss *et al.*, 2012), ed in dettaglio per la città di New York (Rosenzweig *et al.*, 2011), ma fatta eccezione per le coste inglesi (Shennan *et al.*, 2008) dove oltre alle previsioni IPCC sono stati tenuti in conto anche i movimenti tettonici ed isostatici, gli altri esempi finora pubblicati sono carenti di questi dati.

ENEA ha affrontato queste problematiche fin dai primi anni 2000, mettendo a punto metodologie sempre più raffinate (Antonioli *et al.*, 2002, 2003, 2007, 2010, 2011) per la creazione di mappe di allagamento delle piane costiere, collaborando anche con la Fondazione ENI Enrico Mattei per la valutazione economica delle aree allagate nella Piana di Fondi (Figura 4).

Lambeck (Lambeck *et al.*, 2011) ha utilizzato lo scenario IPCC 2013 RCP 8.5 (700 ppm di CO₂ nel 2100) con previsioni di sollevamento comprese tra +0,53 e +0,97 metri. A questi valori sono stati aggiunti tutti i valori locali di isostasia e tettonica. Sulla base delle quote attuali in Italia vi sono 33 aree sensibili (Figura 5) che, sulla base della loro attuale posizione (oggi depresse, cioè sotto il livello del mare) sono particolarmente vulnerabili al futuro innalzamento del livello del mare: le aree più estese si trovano sulla costa settentrionale del mare Adriatico tra

Trieste e Ravenna, altre aree particolarmente vulnerabili sono le pianure costiere della Versilia, di Fiumicino, le Piane Pontina e di Fondi, le Piane del Sele e del Volturno, l'area costiera di Catania e quelle di Cagliari ed Oristano. Tale mappa è basata su un DEM a 20 metri, e si può osservare come le zone che presentano le problematiche maggiori, cioè con molti km² di superficie intorno a quota zero, si trovano soprattutto nel Nord Adriatico. Sono comunque molti i settori nazionali che mostrano aree con coste basse già oggi a rischio di essere allagate nei prossimi 100 anni (circa 7500 km²).

Infine nel 2015, una ricerca multidisciplinare coordinata da ENEA ha redatto con grande dettaglio per il progetto RITMARE (Antonioli *et al.*, 2016) la previsione di allagamento da parte del mare in 4 aree costiere: la costa settentrionale dell'Adriatico (tra cui la laguna di Venezia), i golfi di Oristano e di Cagliari in Sardegna e la zona Mar Piccolo (Taranto, Pu-

glia) (Figura 6). I risultati applicati alle quattro Piane costiere indicate mostrano come il previsto innalzamento del livello del mare, nella zona Nord Adriatico, potrebbe allagare 4957 km² (usando lo scenario IPCC 2013) o 5451 km² (usando lo scenario Rahmstorf 2007), con la conseguente perdita di territorio e impatto sulle infrastrutture locali.

Nella Figura 7 vengono indicati gli scenari di inondazioni per le coste sopracitate, in particolare per il Nord Adriatico, sulla base delle componenti eustatiche, tettoniche ed isostatiche.

Nella Tabella 1 sono elencati i valori di risalita del mare recentemente proposti dai vari modelli e scenari IPCC. Nelle Tabelle 2 e 3 sono elencati i valori di risalita del mare proposti per la ricostruzione delle mappe ENEA-Ritmare di Figura 9 (Antonioli *et al.*, 2016).

*Per saperne di più:
fabrizio.antonioli@enea.it*

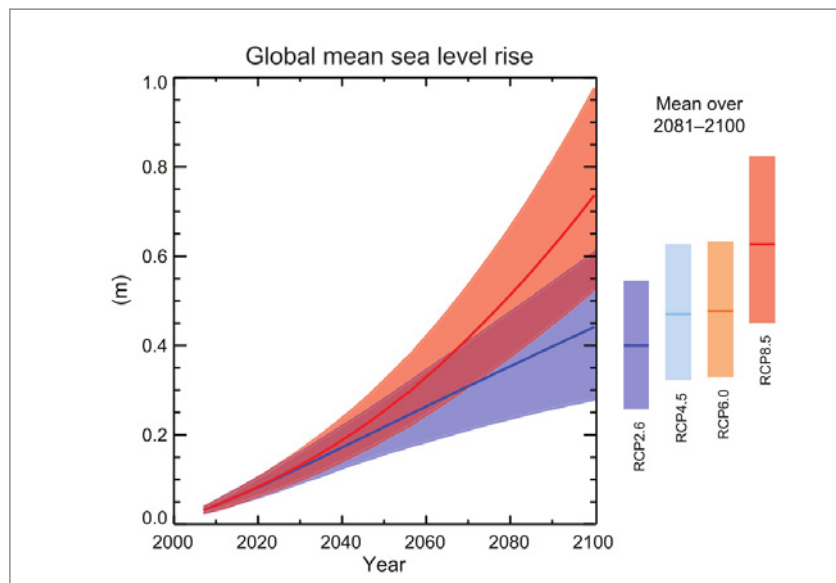


Fig. 3 Scenari di possibile risalita del livello del mare per il 2100
Fonte: IPCC 2013

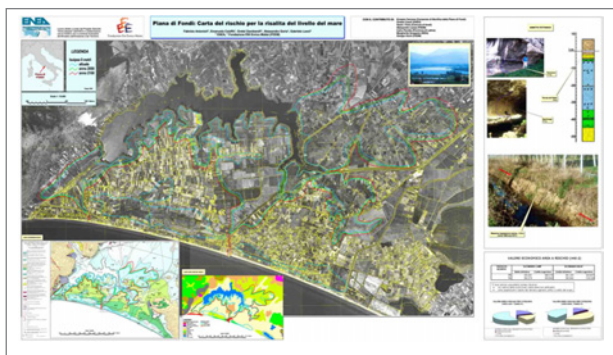


Fig. 4 Mappa di allagamento al 2100 della Piana di Fondi e stima economica della FEEM

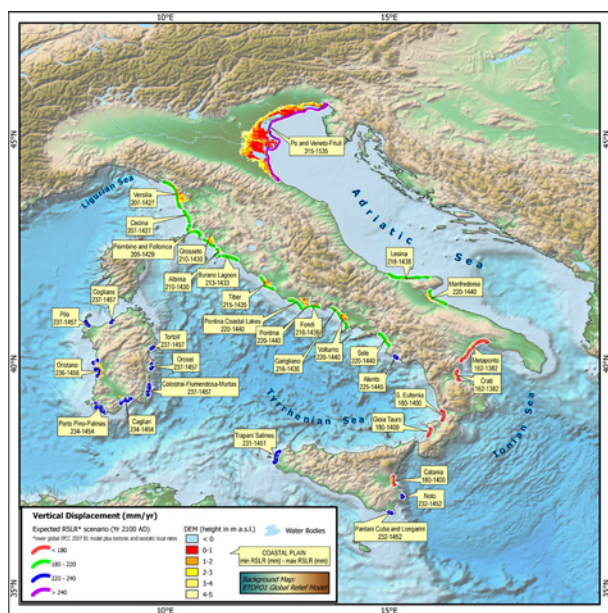


Fig. 5 Le 33 aree italiane a rischio di essere allagate al 2100. I valori utilizzati sono la somma dei movimenti isostatici, tettonici con la previsione IPCC 2007

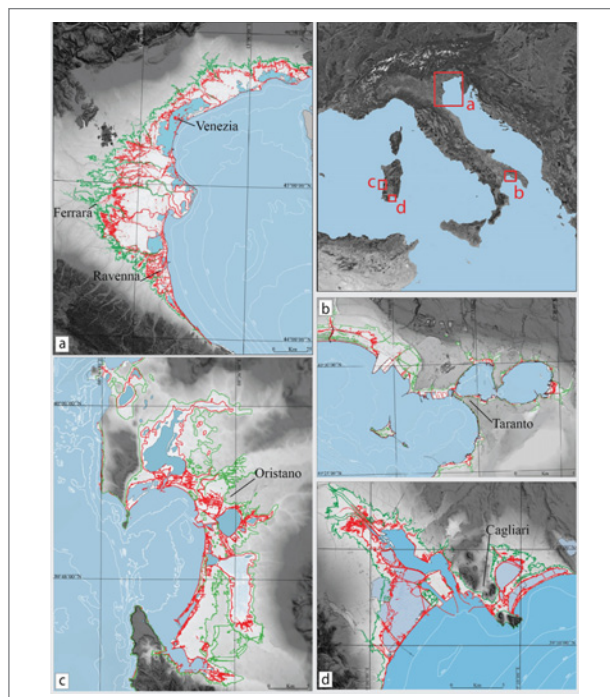


Fig. 6 Ipotesi di allagamento in 4 aree costiere (Nord Adriatico, Taranto, Oristano e Cagliari)
Fonte: Antonioli et al., 2016

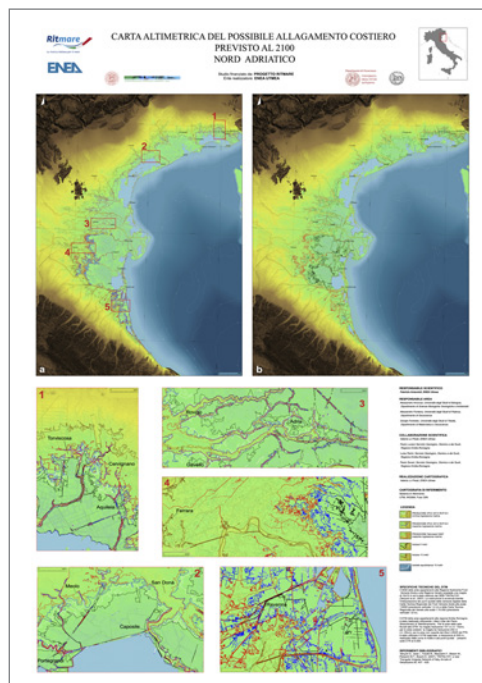


Fig. 7 Mappa di grande dettaglio sull'allagamento da parte del mare nel 2100 nell'area costiera del Nord Adriatico

| Scenario | IPCC 2013 | Kopp 2016 | Mengel 2016 | Horton 2014 |
|----------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| RCP 2.6 | 28-60 | 24-61 | 28-56 | 25-70 |
| RCP 4.5 | 35-70 | 33-85 | 37-77 | n.a. |
| RCP 8.5 | 53-97 | 52-131 | 57-131 | 50-150 |

Tab. 1 Variazione globale del livello del mare in centimetri attesa al 21 ° secolo secondo vari studi per i diversi scenari di emissione. Il primo scenario (RCP 2.6) assume le politiche climatiche di successo limitare il riscaldamento globale a circa 2 ° C; l'ultimo (RCP 8.5), con emissioni non calmierate, un riscaldamento di circa 5 ° C

Nota: gli intervalli indicano gli intervalli di confidenza al 90 per cento ad eccezione del IPCC, che ha fornito solo un intervallo di confidenza 66 per cento

Fonte: Kopp et al., 2016

| Proiezioni di sollevamento del mare | | | |
|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| Area | IPCC 2013 8.5 min scenario (cm) | IPCC 2013 8.5 max scenario (cm) | Rahmstorf 2007 max scenario (cm) |
| Nord Adriatico - area 2 | 58,4 | 101,1 | 142,8 |
| Golfo di Oristano | 54,5 | 94,9 | 134,5 |
| Golfo di Taranto | 51,6 | 92,1 | 131,7 |
| Golfo di Cagliari | 54,7 | 95,6 | 135,6 |

Tab. 2 Proiezione in centimetri della risalita del livello del mare attesa nelle diverse aree in studio

Fonte: da: Antonioli et al., 2016

| Area | IPCC 2013 scenario 8.5 700 PPM CO ² | | Rahmstorf 2007 scenario | |
|----------------------|--|--------------|-------------------------|--------------|
| | km ² | Distanza (m) | km ² | Distanza (m) |
| a) Nord Adriatico | 4957,6 | 59132,1 | 5451,7 | 61280,4 |
| b) Golfo di Taranto | 2,26 | 903,6 | 4,2 | 1730,6 |
| c) Golfo di Oristano | 104,20 | 9787,3 | 124,5 | 10374,5 |
| d) Golfo di Cagliari | 54,00 | 9137,5 | 61,2 | 12358,2 |

Tab. 3 Previsione dei km² allagati nelle 4 aree studiate da ENEA e RITMARE e distanza della linea di riva prevista nel 2100 rispetto a quella attuale

Fonte: Antonioli et al., 2016

BIBLIOGRAFIA

Antonoli F., Leoni G., Gambarelli G., Caiaffa E, Gorla A. 2002. Piana di Fondi carta del rischio di inondazione per innalzamento del livello del mare, calcolo del valore della perdita. Workshop ENEA Fondazione ENI Enrico Mattei, Volume Abstract, RT ENEA 04.07.2002

Antonoli F. 2003. "Vulnerabilità delle coste italiane: rischio di allagamento da parte del mare". In *La risposta al cambiamento climatico in Italia*. Ed. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, 17-21

Antonoli F., Leoni G. 2007. Mappa Nazionale delle aree a rischio di allagamento da parte del mare. Dossier ENEA per lo studio dei cambiamenti climatici e loro effetti. RT ENEA, 83 pp.

Antonoli F., Anzidei M., Lambeck K., Auriemma R., Gaddi D., Furlani S., Orrù P., Solinas E., Gaspari, A., Karinja, S., Kova V., Surace L., 2007. Sea level change in Italy during Holocene from archaeological and geomorphological data. *Quat. Sci. Rev.* doi:10.1016/j.quascirev.2007.06.022

Antonoli, F., Ferranti, L., Fontana, A., Amorosi, A., Bondesan, A., Braitenberg, C., Dutton, A., Fontolan, G., Furlani, S., Lambeck, K., Mastronuzzi, G., Monaco, C., Spada, G., Stocchi, P., 2009. Holocene relative sea-level changes and vertical movements along the Italian coastline. *Quat. Int.*, doi:10.1016/j.quaint.2008.11.008

Antonoli F., Lambeck K, Anzidei M., Ferranti L., Leoni G., Scicchitano G., Silenzi S., "Relative sea level rise for 33 Italian coastal plain". Invited for Ipcc Kuala Lumpur meeting for sea level rise report 2013. IPCC Workshop on Sea Level Rise and Ice Sheet Instabilities 21-24 June 2010, Kuala Lumpur, Malaysia

Anzidei M, Lambeck K, Antonoli F., Furlani S., Mastronuzzi G., Serpelloni E., & Vannucci G. 2014 Coastal structure, sea-level changes and vertical motion of the land in the Mediterranean Geological Society, London, Special Publications, volume 388. doi 10.1144/SP388.20

Antonoli F., Amorosi A., Anzidei M., Deiana G., De Falco G., Fontolan G., Fontana A., Lisco S., Lo Presti V., Marsico A., Mastronuzzi G., Moretti M., Orru P., Serpelloni E., Vecchio A. 2016. Sea flooding scenario at four Italian coastal plains for 2100, submitted *Quaternary International*.

Lambeck K., Anzidei M., Antonoli F., Benini A, Esposito E., 2004. Sea level in Roman time in the Central Mediterranean and implications for modern sea level rise *Earth Planet. Sci. Lett.* doi:10.1016/j.epsl.2004.05.031

Lambeck K, Antonoli F., Anzidei M., Ferranti L., Leoni G., Scicchitano G., Silenzi S., 2011. Sea level change along Italian coast during Holocene and a projection for the future. *Quat. Int.* 232,1-2, 250-257 doi:10.1016/j.quaint.2010.04.026

Shennan, I., Milne, G., and Bradley, S. 2012. Late Holocene vertical land motion and relative sea-level changes: lessons from the British Isles. *Journal of Quaternary Science*, 27, 64–70

Kopp R.E., Kemp A.C., Bittermann K., Horton B.P., Donnelly J.P., Gehrels W.R., Hay C.C., Mitrovica J.X., Morrow E.D., and Rahmstorf S., 2016. "Temperature-driven global sea-level variability in the Common Era", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, pp. 201517056, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1517056113>