Venezia, 6 novembre 2026 · Palazzo Franchetti, Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti

CONVEGNO · 60 ANNI DALL'ALLUVIONE DEL 04/11/1966

Non solo eventi estremi

Il ruolo delle oscillazioni multiscala nell'acqua alta della Venezia del XXI secolo

Alvise Benetazzo[1], Christian Ferrarin[1], Paola Malanotte Rizzoli[2]

[1] CNR-ISMAR, Istituto di Scienze Marine, Venezia
[2] MIT, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (USA)



Si ringraziano Alvise Papa e Angela Andrigo (Comune di Venezia)

Alcune rappresentazioni schematiche sono state prodotte con l'ausilio dell'intelligenza artificiale.

Acque Alte ripetute e allagamenti diffusi

Sessant'anni dopo il 1966, il problema non è solo il singolo evento estremo:
→ è la ripetizione di livelli elevati e il loro effetto sulla vita della città.

Acque alte ripetute

30 attivazioni del Mose dal 28 gennaio al 20 febbraio 2026 (Autorità per la Laguna)

Rive della città

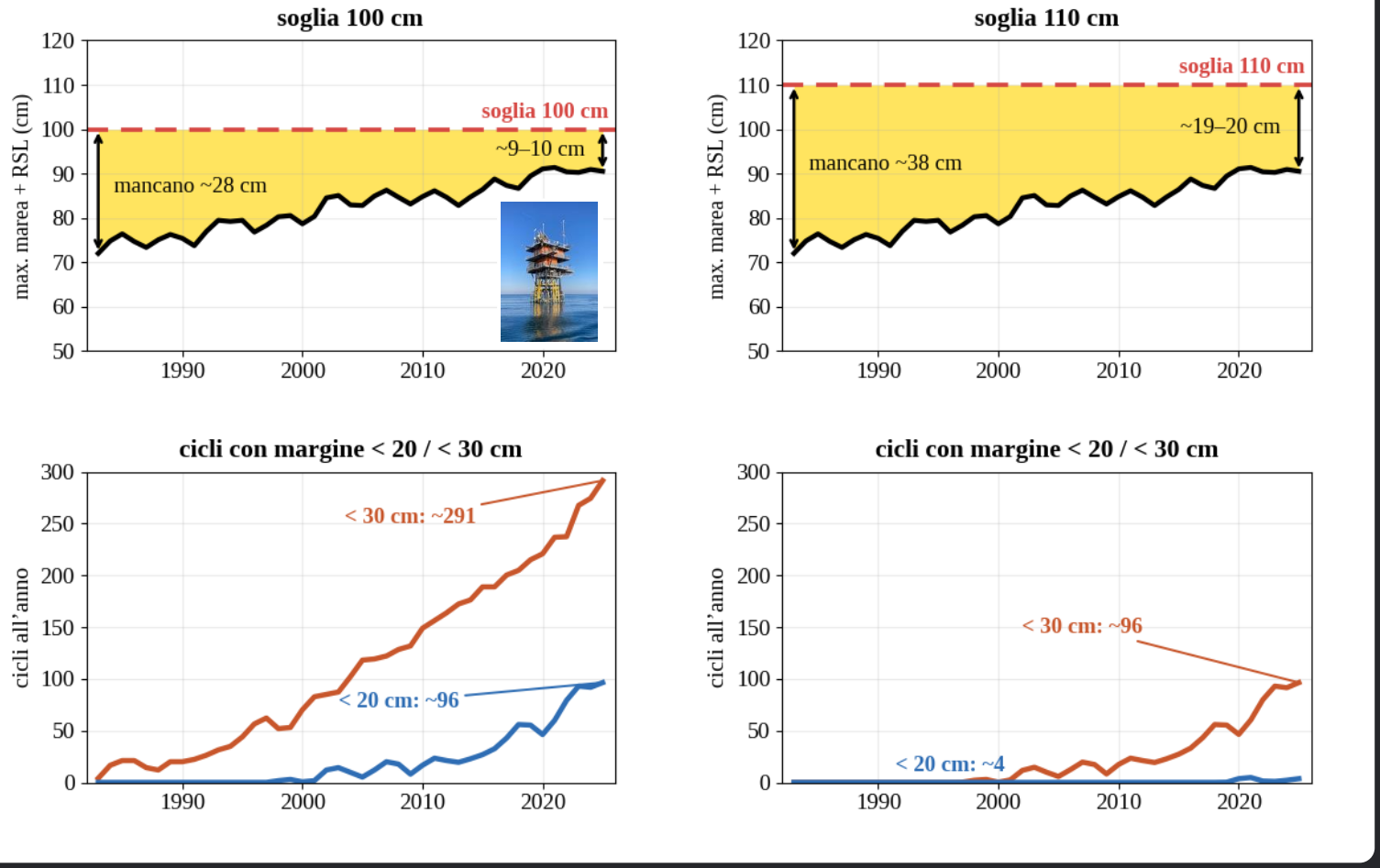
Le rive si allagano ripetutamente

Rianalisi degli eventi di marea tra gennaio e febbraio 2026

Nei primi mesi dell'anno, Venezia è stata interessata da una serie anomala di eventi di acqua alta, che ha portato a 30 attivazioni del sistema Mose, tra il 28 gennaio e il 20 febbraio 2026.



Evidenza: il livello relativo del mare sale e il margine per l'allagamento si riduce



→ a 100 cm si allaga il 5% della città di Venezia, a 110 cm il 12%.

Il margine

Margine = soglia − (massimo di marea + RSL): il rialzo non mareale necessario per superare la soglia.

Si è ridotto

Margine minimo annuo (soglia 100 cm): da circa 28 cm nel 1983 a 9–10 cm nel 2021–2025.

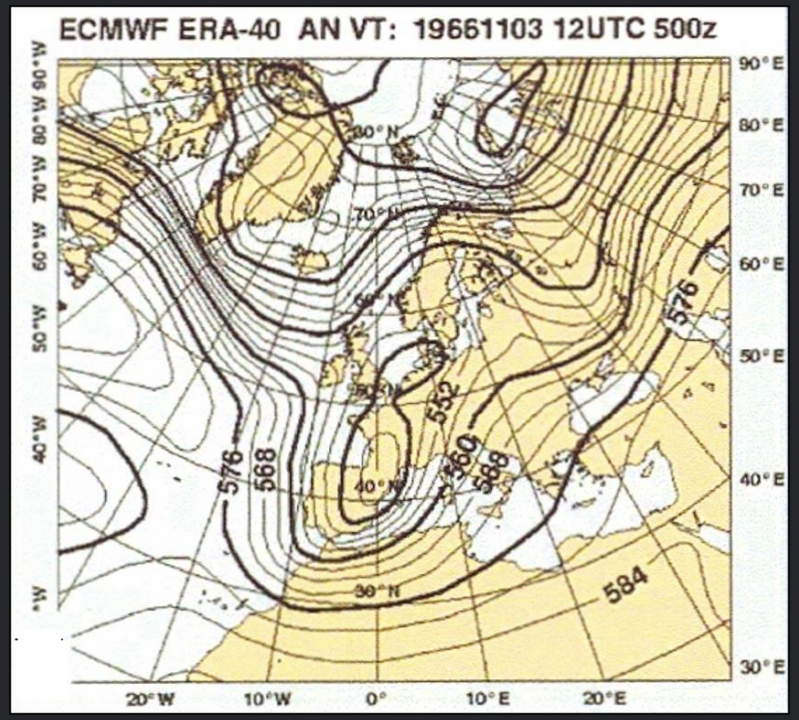
Cicli a portata di allagamento

Margine < 20 cm: da 0 a circa 97 cicli all'anno (1983→2025). Margine < 30 cm: da circa 20 a circa 290.

La forzante atmosferica è ANCORA necessaria

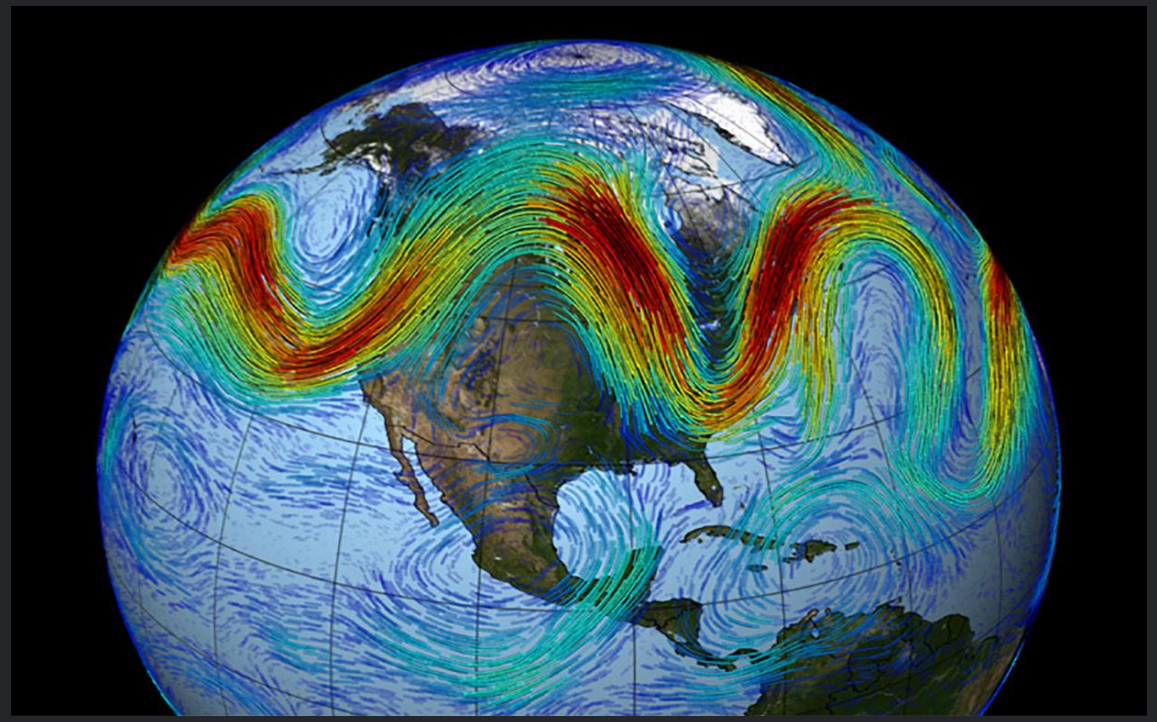
→ Marea e RSL da sole non superano mai le soglie (massimo < 100 cm).

Le scale delle forzanti atmosferiche



Scala sinottica (≈ 1000 km)

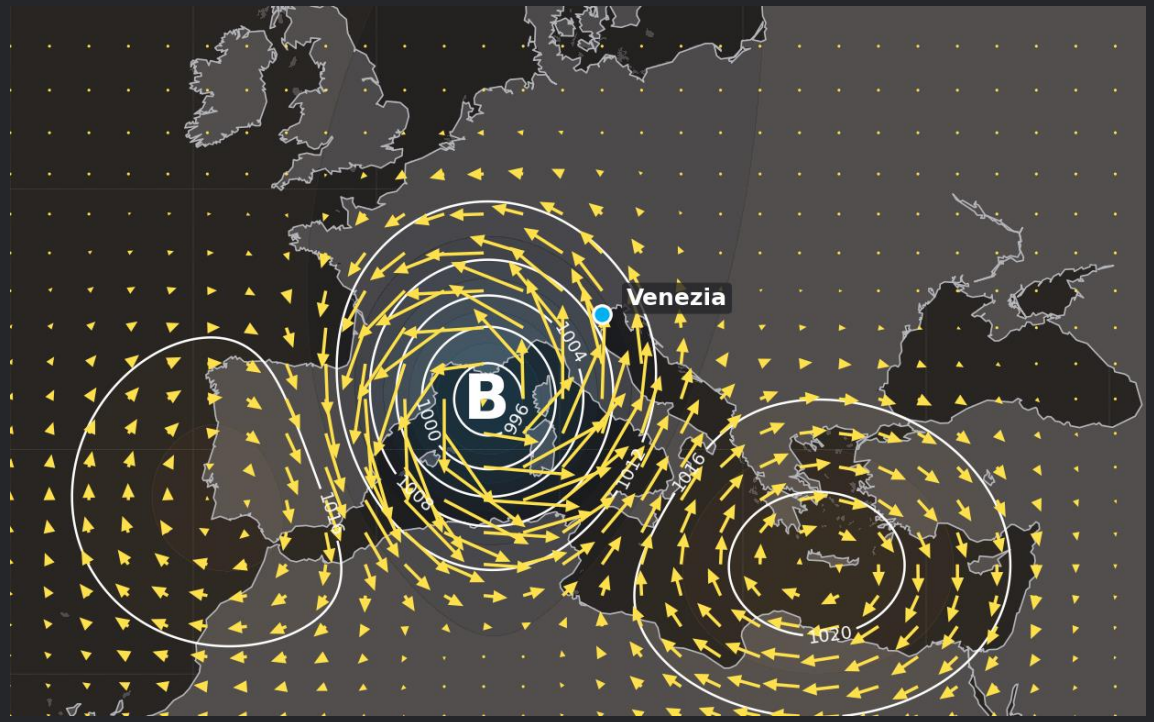
Geopotenziale a 500 hPa, 3/11/1966 ore 12 UTC (ERA-40): profonda saccatura sull'Europa sud-occidentale.



Scala planetaria (≈ 10000 km)

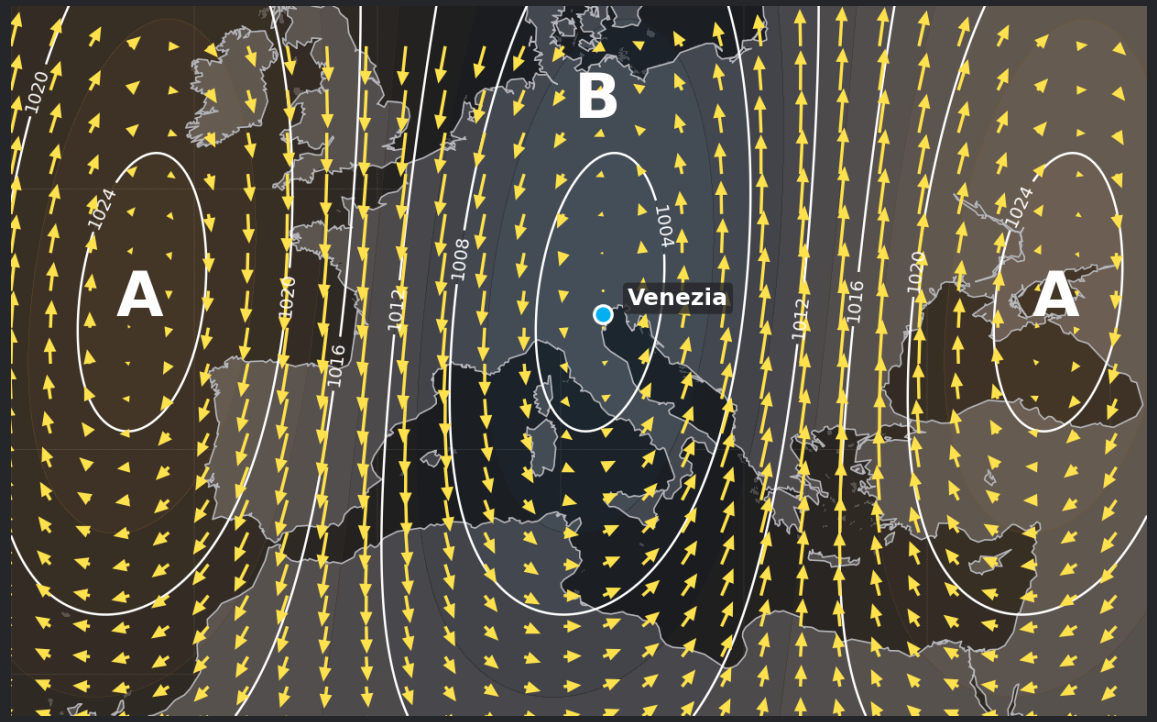
Onde di Rossby: meandri di migliaia di km che portano per settimane pressione bassa o alta sull'Italia.

Scirocco e campi di pressione persistenti



Scirocco

Bassa pressione a ovest e alta a est: vento da sud-est lungo l'Adriatico (fino a 70–80 km/h).



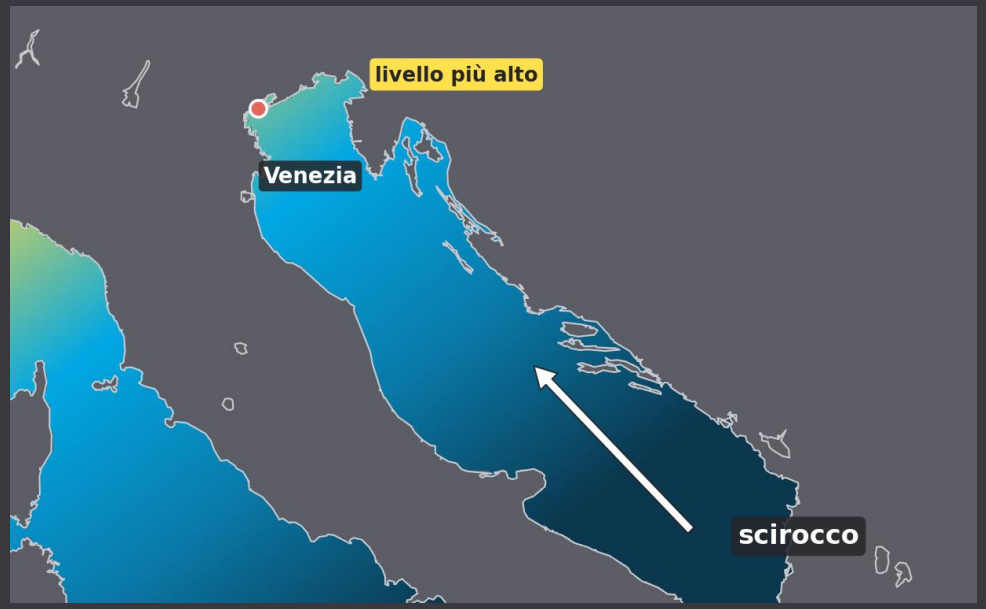
Onde atmosferiche planetarie (PAW)

Saccatura di migliaia di km sull'Italia: bassa pressione persistente per giorni–settimane.

Schema illustrativo (non dati reali): isobare in bianco, vento in giallo. B = bassa, A = alta pressione.

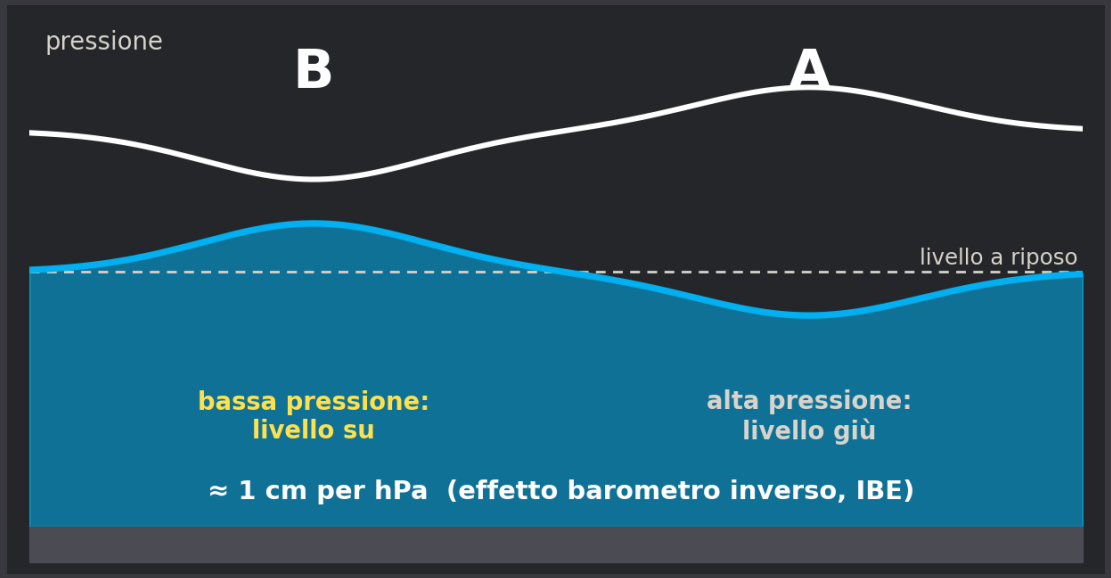
Accoppiamento atmosfera–mare

A ogni scala della forzante atmosferica corrisponde una risposta diversa del livello del mare



Storm Surge (SS): il vento spinge il bacino

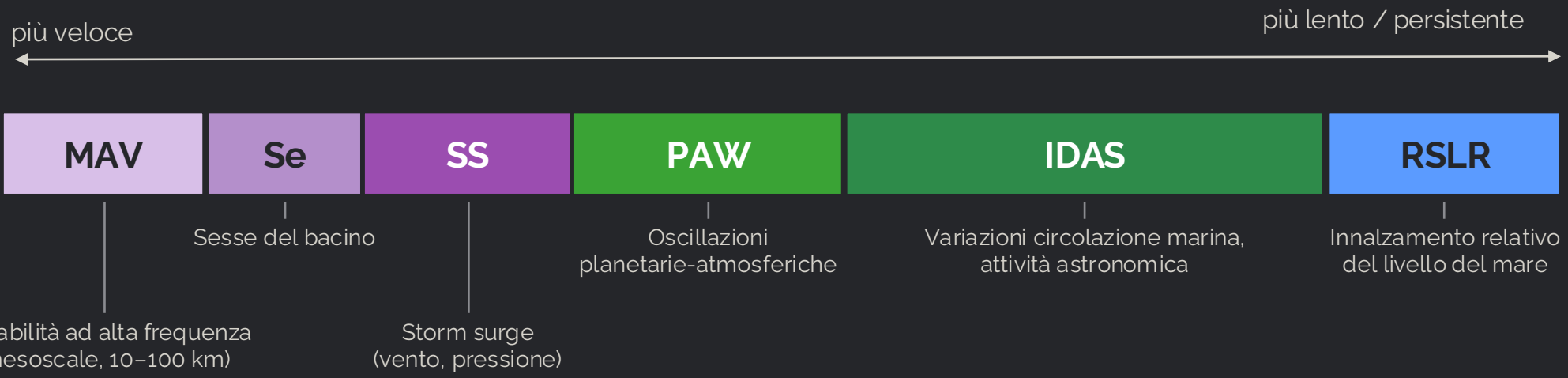
Il vento da sud-est lungo l'asse del bacino, stretto e allungato, accumula acqua a nord: è lo storm surge, che si somma a marea e RSL.

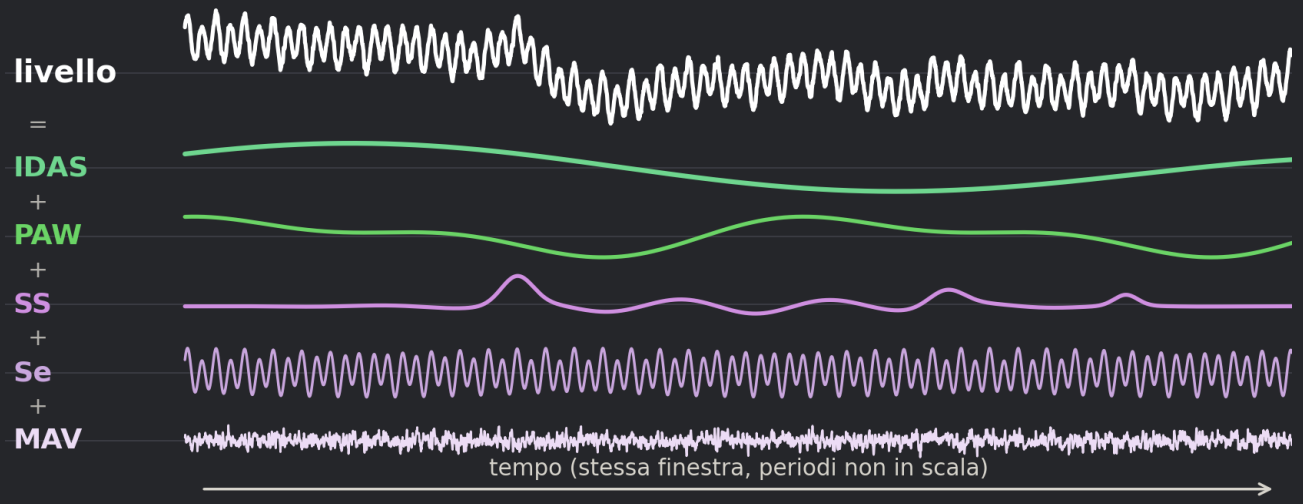


Onde planetarie: effetto barometrico inverso (IBE)

La pressione varia su migliaia di km per giorni: il mare risponde con circa 1 cm per hPa, anche senza vento forte.

Dal meteotsunami al livello medio





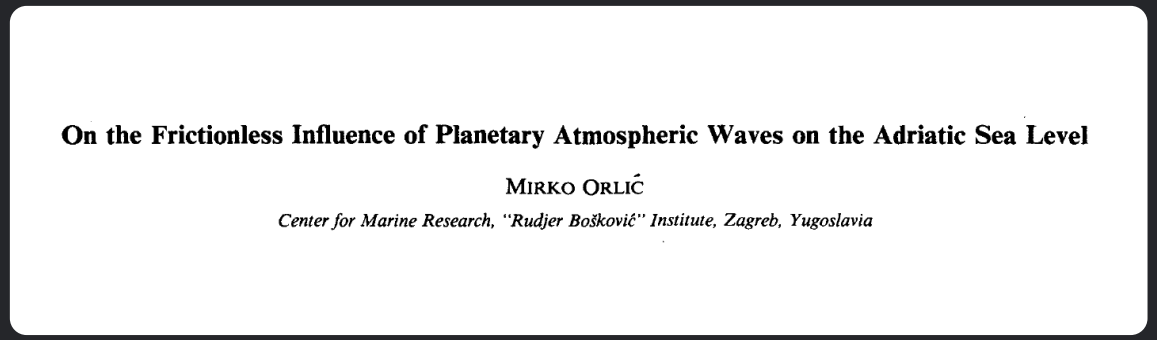
Veloce (MAV+Se+SS) Meteotsunami, sesse, storm surge: ore–giorni.

PAW Variabilità intrastagionale: circolazione atmosferica di larga scala.

IDAS Variabilità interdecadale, interannuale e stagionale.

RSLR Innalzamento relativo del livello del mare: tendenza di fondo.

Chi ha già studiato le onde planetarie nell'Adriatico

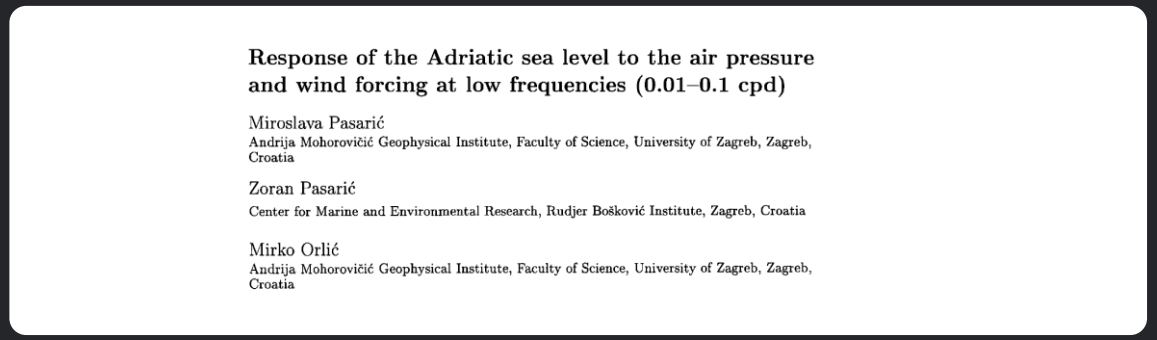

On the Frictionless Influence of Planetary Atmospheric Waves on the Adriatic Sea Level

MIRKO ORLIĆ

Center for Marine Research, "Rudjer Bošković" Institute, Zagreb, Yugoslavia

Orlić (1983)

Uno dei primi studi sull'effetto delle onde planetarie sull'Adriatico.


Response of the Adriatic sea level to the air pressure and wind forcing at low frequencies (0.01–0.1 cpd)

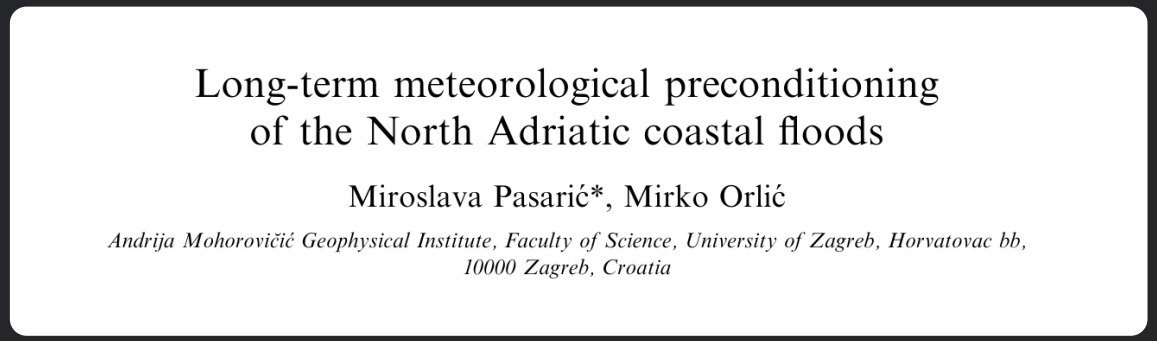
Miroslava Pasarić
Andrija Mohorovičić Geophysical Institute, Faculty of Science, University of Zagreb, Zagreb, Croatia

Zoran Pasarić
Center for Marine and Environmental Research, Rudjer Bošković Institute, Zagreb, Croatia

Mirko Orlić
Andrija Mohorovičić Geophysical Institute, Faculty of Science, University of Zagreb, Zagreb, Croatia

Pasarić, Pasarić e Orlić (2000)

Risposta a bassa frequenza (0,01–0,1 cpd) del livello adriatico a pressione e vento.


Long-term meteorological preconditioning of the North Adriatic coastal floods

Miroslava Pasarić*, Mirko Orlić

Andrija Mohorovičić Geophysical Institute, Faculty of Science, University of Zagreb, Horvatovac bb, 10000 Zagreb, Croatia

Pasarić e Orlić (2001)

Le onde planetarie spiegano circa un terzo della variabilità del livello e precondizionano le inondazioni.

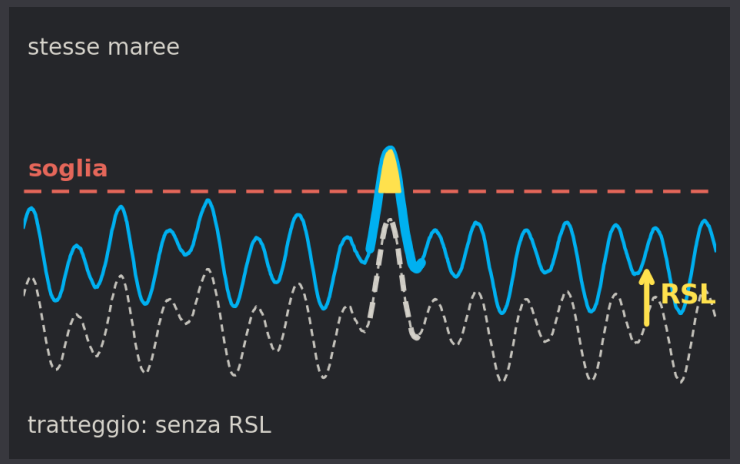

Venice as a paradigm of coastal flooding under multiple compound drivers

Christian Ferrarin[1]✉, Piero Lionello[2], Mirko Orlić[3], Fabio Raicich[4] & Gianfausto Salvadori[5]

Ferrarin et al. (2022)

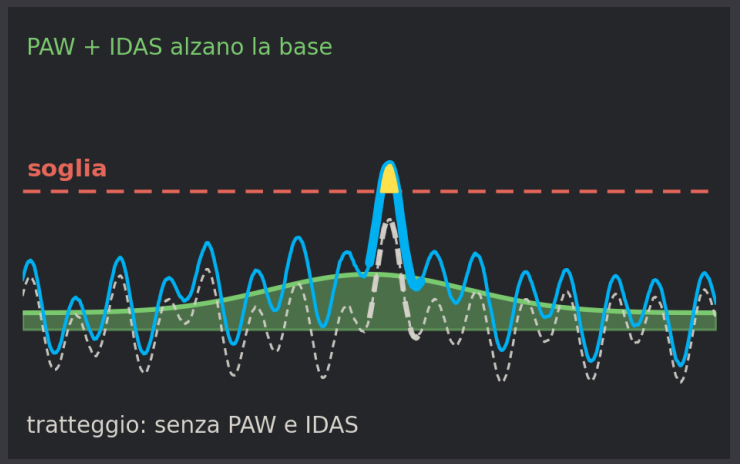
Venezia come paradigma di inondazioni da forzanti combinate, onde planetarie incluse.

Obiettivi della presentazione



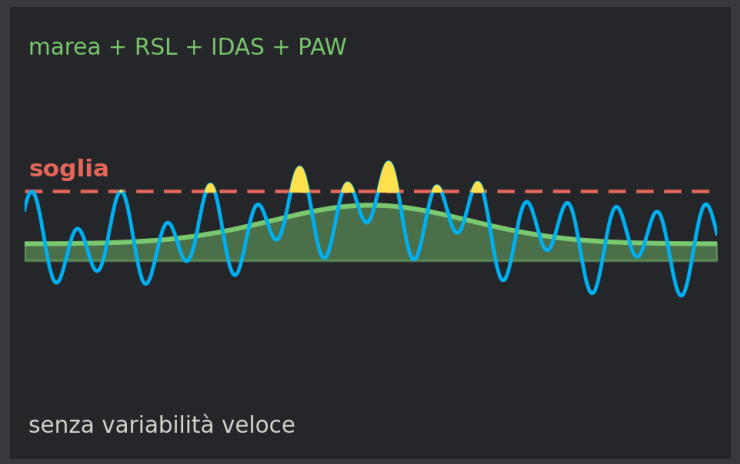
i Innalzamento relativo del livello del mare

L'innalzamento relativo del livello del mare è la condizione per l'aumento dei superamenti delle soglie (100 e 110 cm).



ii Oscillazioni lente come precondizionamento della variabilità veloce

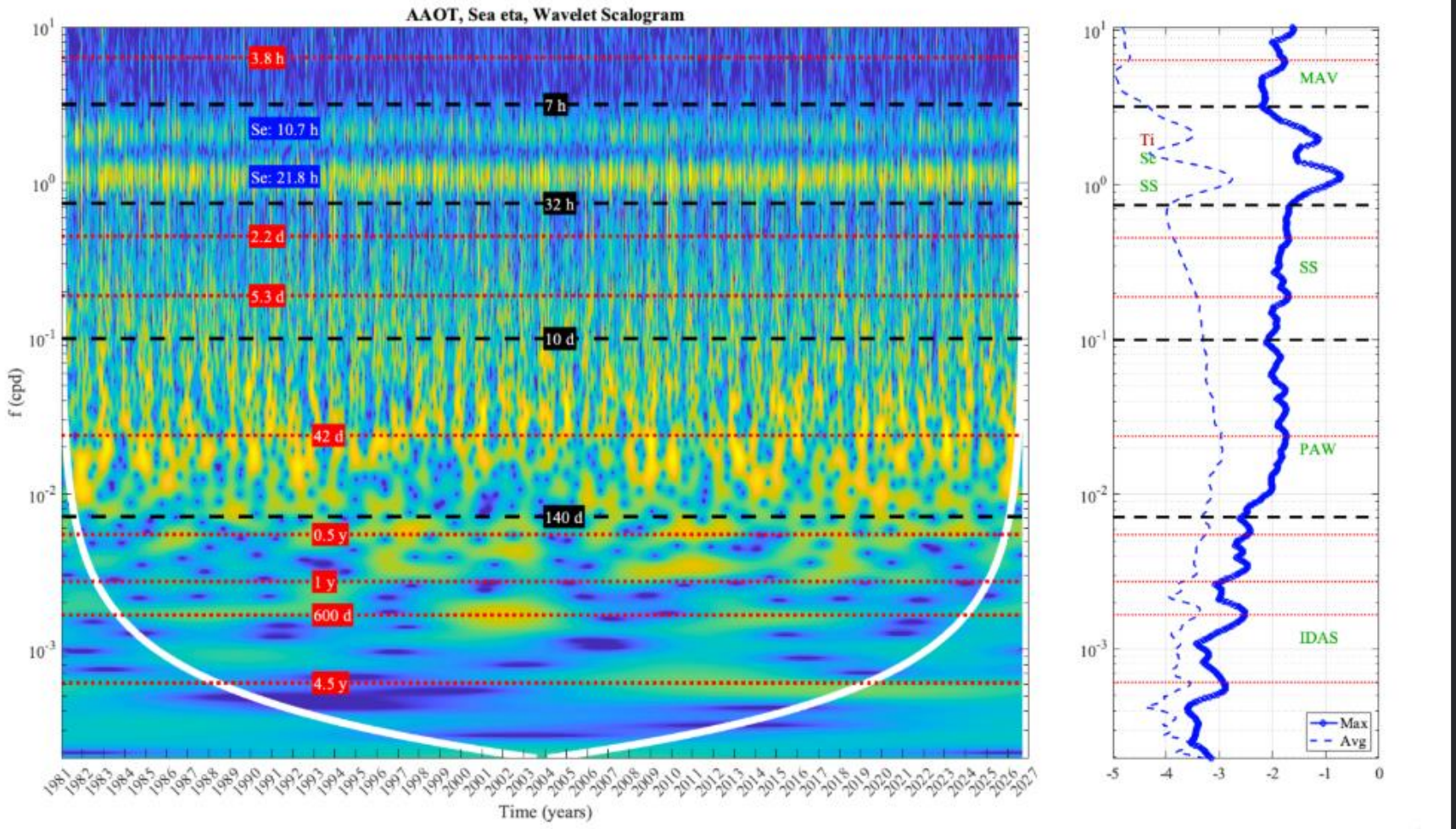
Alzano la base su cui agisce la variabilità veloce: è questa, con la marea, a far superare la soglia.



iii Oscillazioni lente come contributo sufficiente

A 100 e 110 cm, marea, RSL, IDAS e PAW bastano a superare la soglia anche senza variabilità veloce.

I dati di partenza (1981–2026, Piattaforma Acqua Alta, CNR)

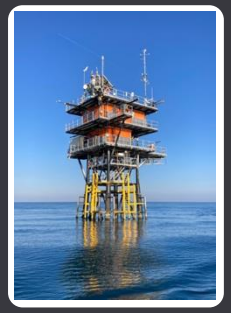


La serie

Livello del mare dal 1981

Piattaforma Acqua Alta (AAOT), CNR-ISMAR

RSLR: 4,6 mm/anno



Analisi wavelet

Come leggerlo: asse orizzontale = tempo, verticale = frequenza (in alto le oscillazioni veloci), colore = energia.

Linee nere: 7 h, 32 h, 10 d, 140 d, confini tra le bande.

Linee rosse: periodi caratteristici.

Scalogramma wavelet della serie di livello (1981–2026) e spettro medio e massimo.

Decomposizione del livello del mare

$$h(t) = h_{MAV}(t) + h_{Se}(t) + h_{SS}(t) + h_{PAW}(t) + h_{IDAS}(t) + \varepsilon(t)$$

h(t) è il segnale senza RSL e senza marea: il non-tidal residual (surge).

MAV	Se	SS	PAW	IDAS
< 7 h	7–32 h	32 h–10 d	10–140 d	> 140 d

Definiamo **FAST** = MAV + Se + SS (periodi minori di 10 giorni).

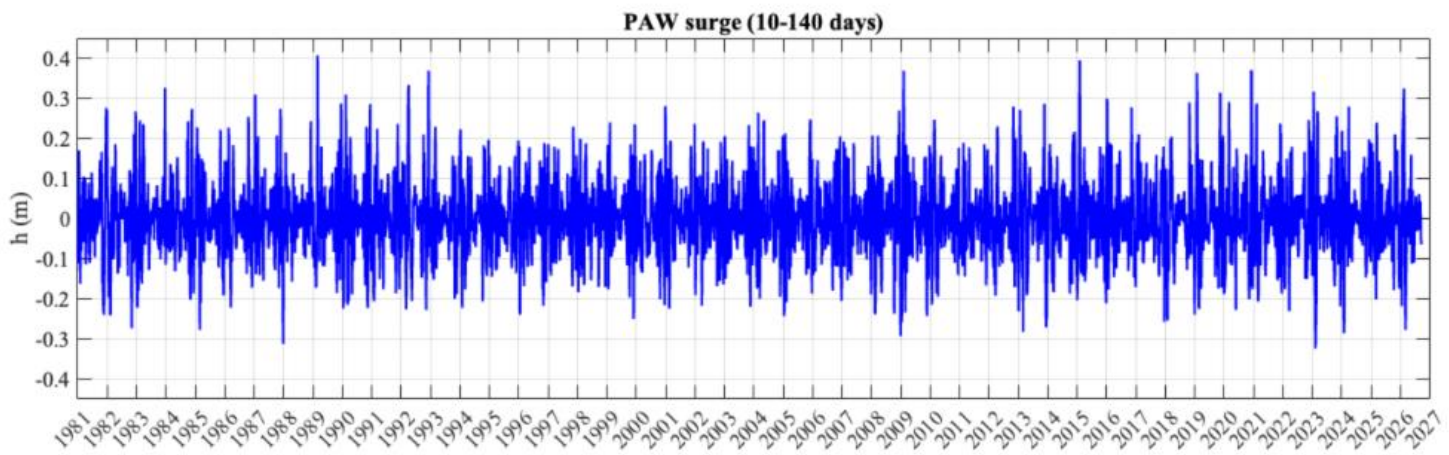
Ipotesi: scale separate

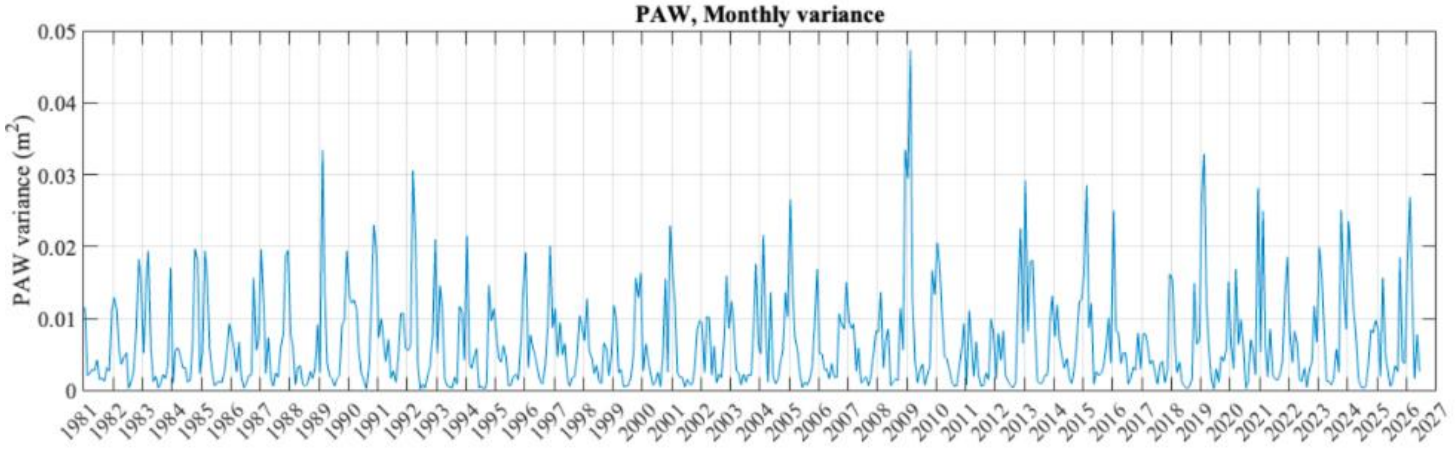
Ogni contributo occupa una banda di periodi distinta e non sovrapposta: per questo il livello si scrive come somma dei contributi.

Il residuo ε(t)

ε(t) = h(t) − Σ contributi: interazioni non lineari, rumore, effetti di bordo. Valore piccolo rispetto ai contributi.

PAW, variabilità (10–140 giorni)





Ampiezza

Tipicamente ±0,15 m, punte fino a +0,4 e −0,3 m.

Varianza mensile di norma < 0,02 m^2; massimo 0,047 m^2 (2009).

Periodicità

Ciclo annuale: varianza massima in inverno, minima in estate; dentro ogni picco fluttuazioni da settimane a mesi.

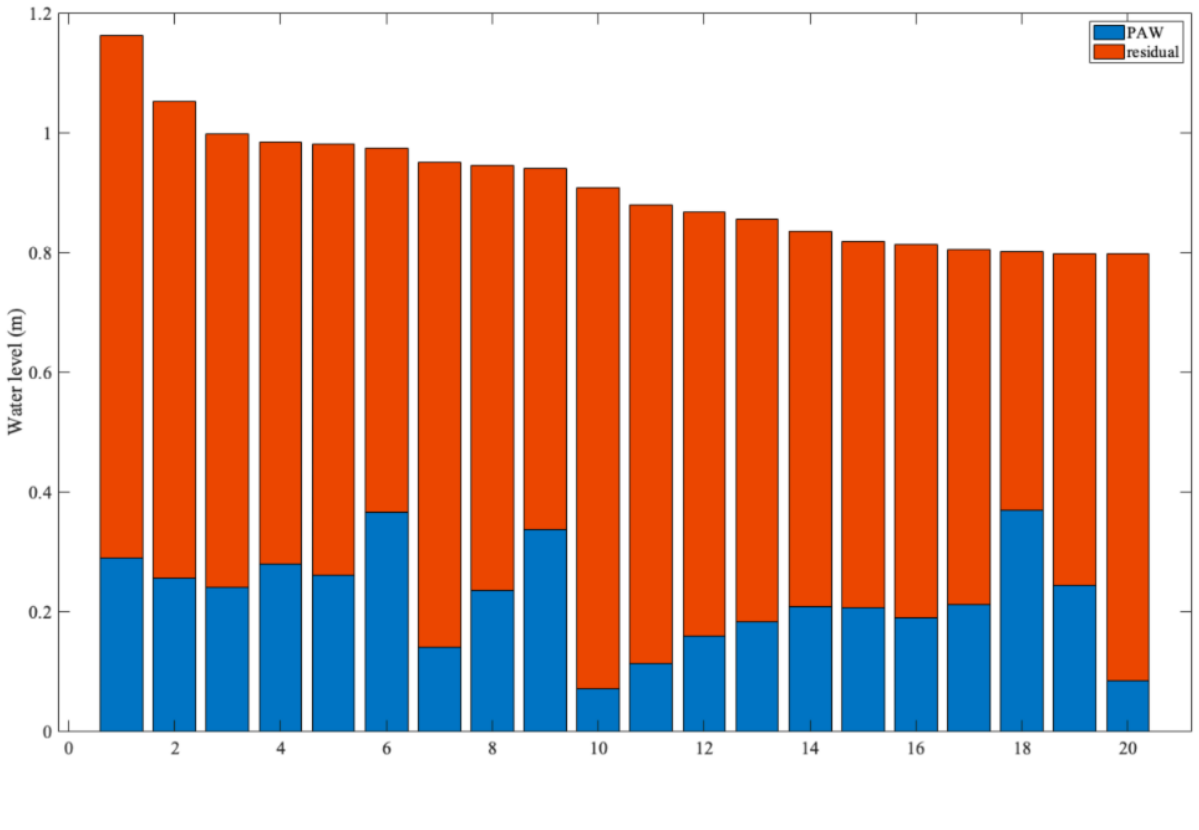
Nessuna tendenza significativa (1981–2026).

Gennaio-Febbraio 2026

Anomalia PAW di 20–30 cm di ampiezza.

Durata: per 4 settimane h_{PAW} > 10 cm.

Precondizionamento: il contributo di PAW agli eventi di acqua alta



Contributo di PAW (blu) e resto del livello (arancione) in 20 eventi all'AAOT, ordinati per livello totale.

Cosa significa precondizionamento

PAW alza il livello di fondo per giorni o settimane; su di esso si sovrappongono maree, sesse e variabilità sinottica.

Stesso livello, ricette diverse

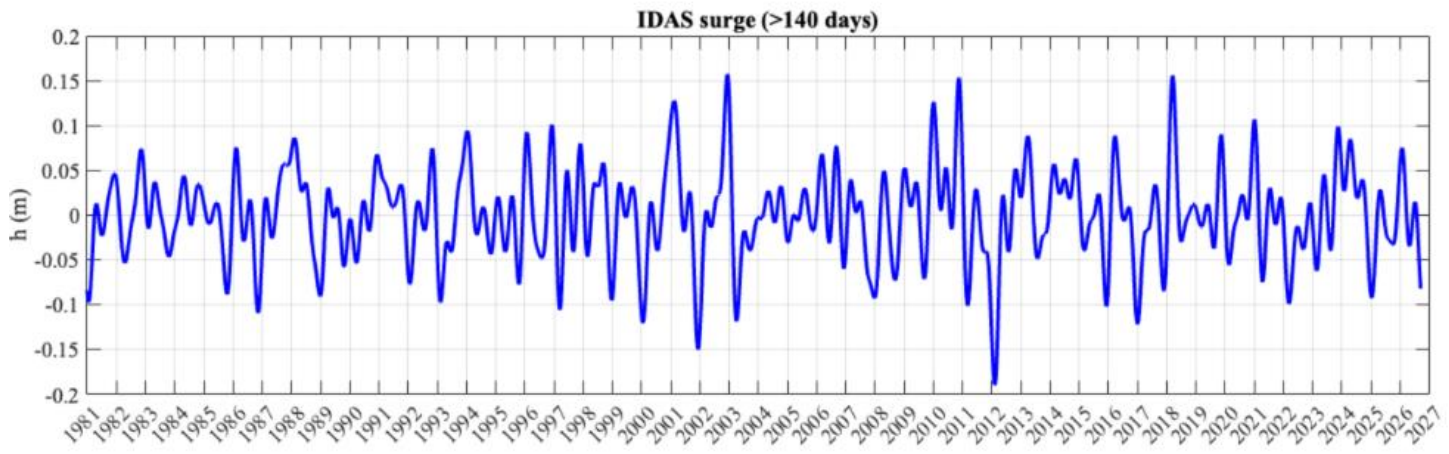
Nei 20 eventi PAW contribuisce da meno di 0,10 a circa 0,35 m.
→ livelli totali simili nascono da combinazioni diverse di PAW e processi veloci.

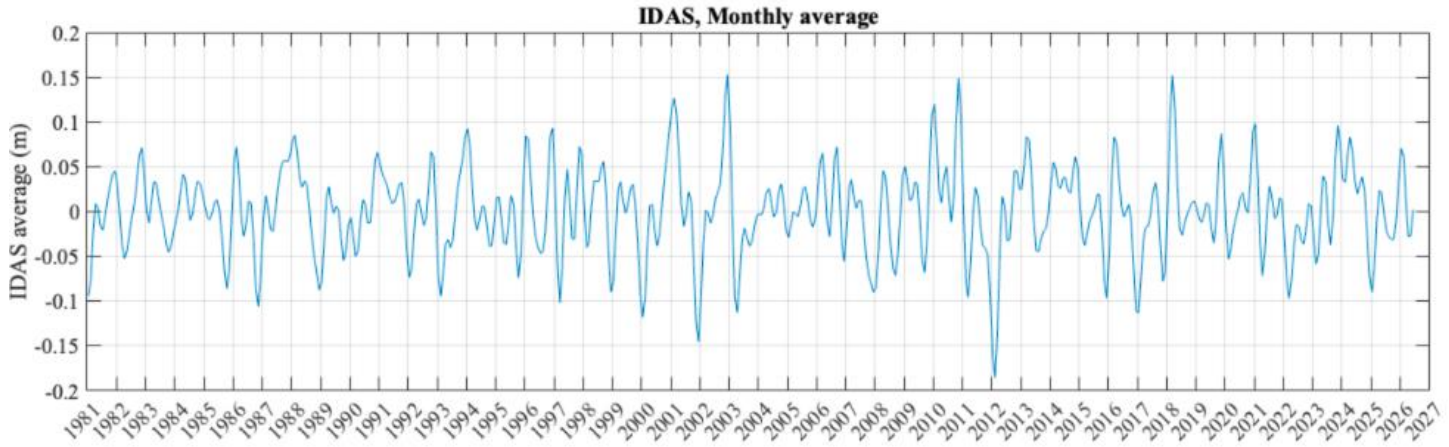
Spesso un contributo sostanziale

In diversi eventi PAW è una frazione rilevante dell'innalzamento totale.

(Ferrarin et al., 2022; Lionello et al., 2021)

IDAS, variabilità (> 140 giorni)





Ampiezza

Tipicamente entro ±0,05 m; massimi di circa +0,15 m (inizio anni 2000, 2010, 2018).

Minimo di circa −0,19 m (fine 2011).

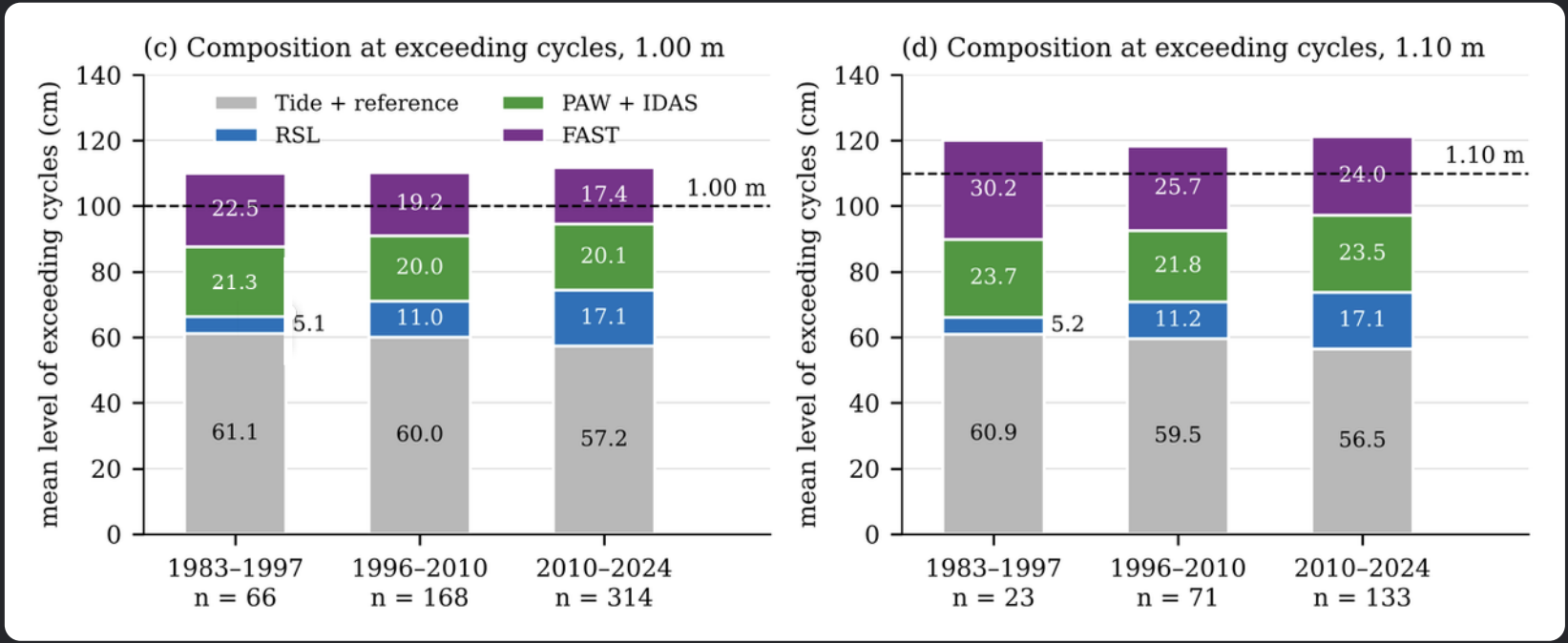
Periodicità

Oscillazioni lente, da stagionali a pluriennali: cicli di circa un anno modulati su più anni.

Le medie mensili seguono quasi tutta la serie: variabilità lenta e persistente.

(Zanchettin et al., 2021; Lionello et al., 2021)

Soglie di 100 e 110 cm.
I contributi ai superamenti evolvono nel tempo?



L'innalzamento relativo del livello del mare sostituisce parte di surge e marea

→ oggi bastano maree più basse

Cosa dice e cosa non dice

Dice: RSL pesa sempre di più nei cicli che superano, al posto di surge e marea.

Non dice: se PAW e IDAS siano cambiati (peso simile, circa 20 cm); non indica una causa.

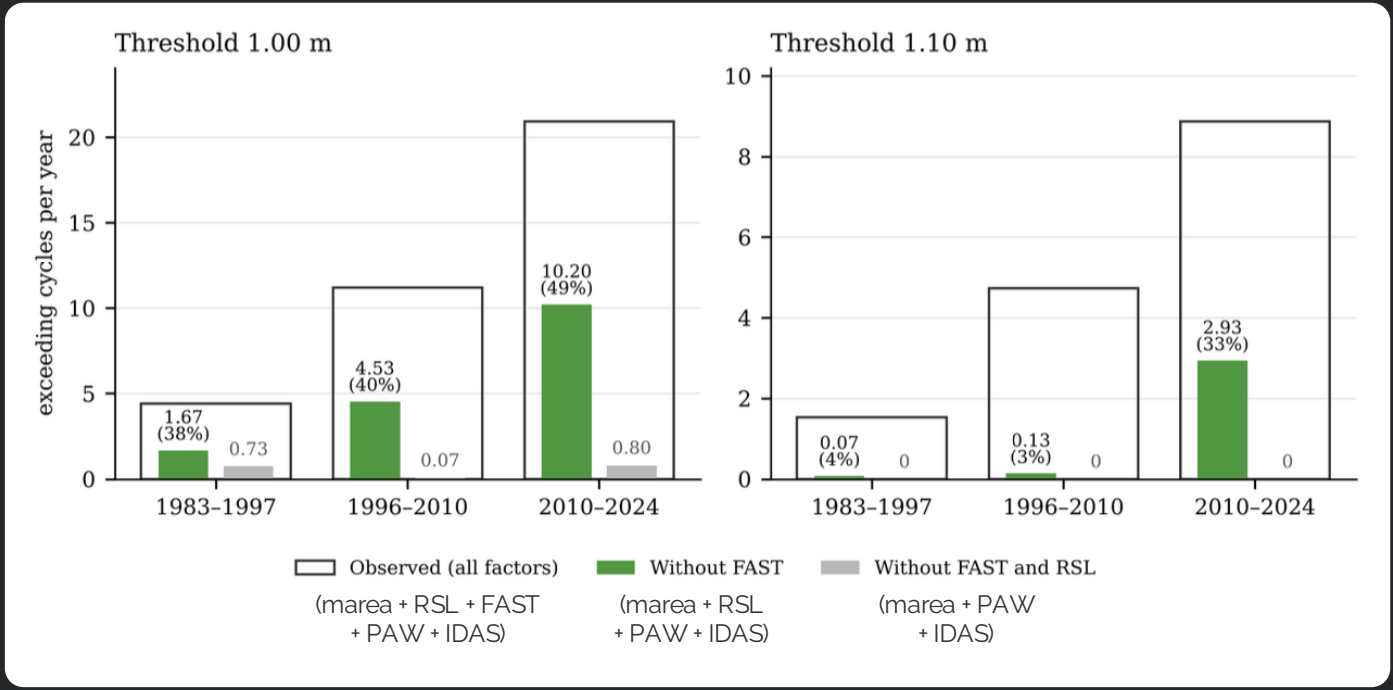
Come leggere la composizione

PAW + IDAS forniscono circa quanto la variabilità veloce (un poco di più a 100 cm nel 2010–2024).

Il contributo di PAW + IDAS non è aumentato (circa 20 cm): è cresciuto il numero di cicli.

n = cicli che superano: da 66 a 314 (100 cm) e da 23 a 133 (110 cm).

Solo variabilità lenta PAW + IDAS: da precondizionamento a sufficienza



≈ 1/3

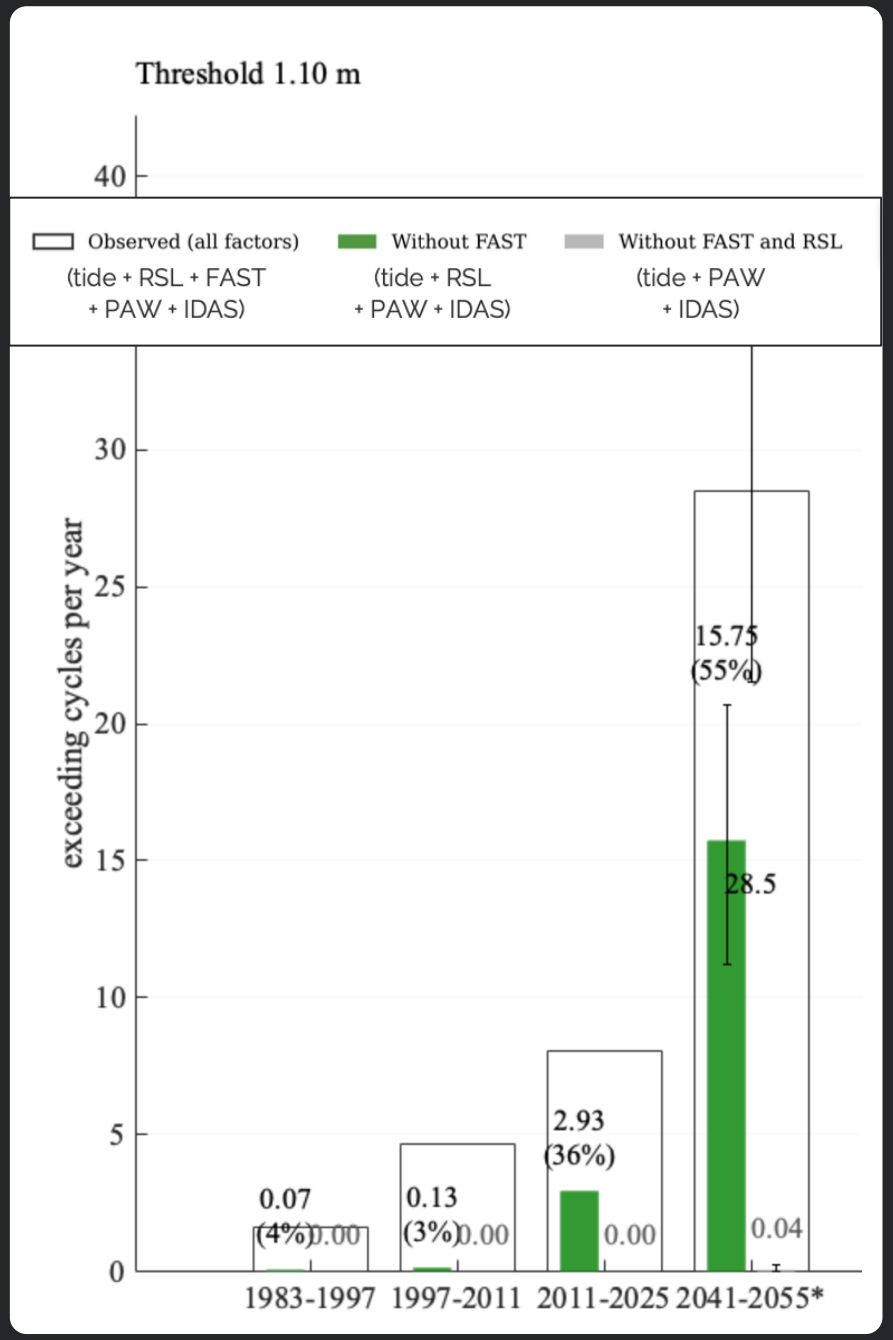
dei superamenti a 110 cm avviene anche senza variabilità veloce: da precondizionamento a sufficienza.

→ Non sostituisce la variabilità veloce.

-> **Ruolo crescente di PAW + IDAS a 100 e 110 cm.** **I superamenti raggiunti senza FAST crescono in quota**

→ **Serve l'innalzamento del livello del mare.** Senza FAST e RSL nessun ciclo supera 110 cm.

-> **La variabilità veloce resta necessaria.** Fornisce il resto, con un contributo più piccolo di prima.



Scenario futuro (2041–2055)

> 1/2

dei superamenti a 110 cm senza variabilità veloce (scenario 2041–2055*)
→ La sufficienza delle componenti lente continua a crescere.

Una quota crescente di PAW+IDAS. Trascurabile all'inizio, circa un terzo nel 2010–2024, oltre la metà nel 2041–2055*.

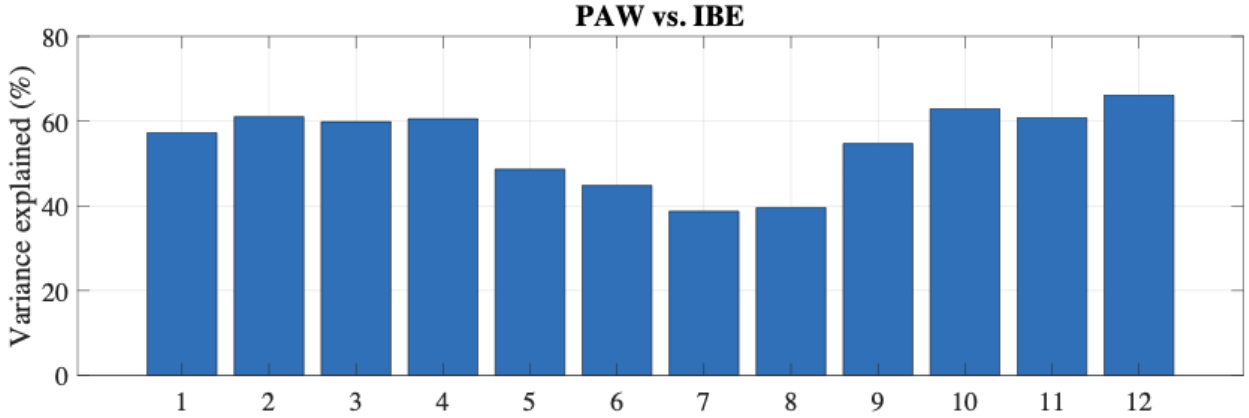
Serve ancora l'innalzamento del livello del mare. Senza RSL praticamente nessun ciclo supera 110 cm.

Grande incertezza. Il risultato è indicativo; la variabilità veloce fornisce comunque il resto.

Soglia 110 cm. Aperto: tutti i fattori; verde: senza FAST; grigio: senza FAST e RSL. *Scenario futuro, con barre di incertezza.

L'incertezza è l'intervallo tra il 2,5° e il 97,5° percentile del numero medio annuo di superamenti in 500 repliche: a parità di marea e di innalzamento del livello del mare, il meteo (IDAS, PAW e FAST) di ciascuno dei 15 anni è estratto a caso dagli anni osservati.

PAW: è predicibile?



Varianza di PAW spiegata dall'effetto barometrico inverso (IBE), per mese (1 = gennaio).

Correlazione alta. PAW–IBE > 0,8.

Scostamenti. Differenze dalla risposta di equilibrio: trasporto indotto dal vento, gradienti spaziali di pressione, forzanti remote, aggiustamento del bacino.

IBE spiega gran parte della varianza PAW

Dal 39% di luglio al 66% di dicembre; 57–66% da ottobre ad aprile.

Un ciclo stagionale

Nei mesi freddi PAW segue di più la pressione (perturbazioni di grande scala più attive e coerenti); in estate meno.

Predicibilità potenziale

Le anomalie di pressione evolvono in giorni–settimane: si può anticipare il livello di fondo, non il picco del singolo evento. L'IBE è un predittore fisico, non un modello di previsione.

Gennaio-Febbraio 2026

Nello stesso periodo la pressione al livello del mare (MSLP) ha oscillato tra 1000 e 990 hPa.

Conclusioni

Dal precondizionamento alla sufficienza: con marea e RSL, le oscillazioni lente bastano da sole per circa un terzo dei superamenti delle soglie di 100 e 110 cm.

Il livello di fondo conta

L'innalzamento relativo è la condizione per la crescita delle soglie superate.

Senza RSL, a 110 cm nessun ciclo supera la soglia, nemmeno con PAW e IDAS.

Lento e veloce insieme

PAW + IDAS pesano almeno quanto la variabilità veloce, e il loro ruolo cresce negli ultimi anni.

Non la sostituiscono: la variabilità veloce resta necessaria per metà–due terzi dei superamenti.

Previsioni stagionali?

L'effetto barometrico inverso spiega gran parte della varianza di PAW: predicibilità potenziale del livello lento.

Si anticiperebbe il livello di fondo, non il picco del singolo evento.

Durata. Le componenti lente persistono per giorni o settimane e tengono il livello vicino alla soglia per più cicli di marea consecutivi: il Mose serve per più cicli di seguito, non per un solo picco (p.e. Gen-Feb 2026).

Venezia, 6 novembre 2026 · Palazzo Franchetti, Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti

CONVEGNO · 60 ANNI DALL'ALLUVIONE DEL 04/11/1966

Grazie per l'attenzione



Fonti e crediti

Bibliografia

Orlić M. (1983). On the frictionless influence of planetary atmospheric waves on the Adriatic sea level.

Pasarić M., Pasarić Z., Orlić M. (2000). Response of the Adriatic sea level to the air pressure and wind forcing at low frequencies (0.01–0.1 cpd). J. Geophys. Res., 105(C5), 11423–11439.

Pasarić M., Orlić M. (2001). Long-term meteorological preconditioning of the North Adriatic coastal floods. Cont. Shelf Res., 21, 263–278.

Ferrarin C., Lionello P., Orlić M., Raicich F., Salvadori G. (2022). Venice as a paradigm of coastal flooding under multiple compound drivers. Sci. Rep., 12, 5754.

Dati e analisi

Serie di livello del mare dal 1981: piattaforma Acqua Alta (AAOT), CNR-ISMAR.

Attribuzione dei superamenti e analisi dei margini: analisi dell'autore, finestre mobili di 15 anni, proxy offshore della domanda del Mose (AAOT).

Mappa del geopotenziale a 500 hPa del 3 novembre 1966: ECMWF ERA-40.

Immagini

Screenshot sulle attivazioni del Mose: Autorità per la Laguna di Venezia.

Foto della riva della Giudecca e flusso a grande scala: fonti da completare.

Schemi (scirocco, effetto barometrico inverso, scale temporali, RSL, precondizionamento, sufficienza): prodotti con l'ausilio dell'IA.

Altro materiale

Le forzanti del livello del mare nel nord Adriatico

1 Marea astronomica

Onde periodiche e prevedibili (cicli diurni e semidiurni), con ampiezza massima nel Nord Adriatico (escursione ≈ 1 m)

2 Contributo atmosferico (surge)

Vento e pressione a scale diverse, da ore a decenni.

3 Sesse

Dopo un surge, oscillazioni del bacino: onde stazionarie con un antinodo a nord (periodi di circa 11 e 22 ore)

4 Innalzamento relativo del livello del mare (RSLR)

Tendenza lenta di fondo: innalzamento del mare + subsidenza, circa 4–5 mm/anno nella zona veneziana.

Quanto pesa ciascun fattore nei superamenti del Mose?

Metodo: attribuzione di Shapley, cosa può dire e cosa no

1 · Quattro fattori

RSL · IDAS · PAW · FAST

FAST = variabilità veloce

2 · Sedici scenari

Ogni fattore è acceso o spento (la marea è sempre presente).

3 · Media dei contributi

Effetto medio di accendere un fattore su tutti gli ordini possibili: i quattro contributi sommano al totale.

Cosa può dire

- Come ripartire i superamenti osservati tra RSL, IDAS, PAW e variabilità veloce (quote al 100%).
- Come la ripartizione cambia nel tempo (finestre mobili di 15 anni, bande di incertezza).
- Il peso di PAW + IDAS rispetto alla variabilità veloce.

Cosa non può dire

- Non è causalità: è una convenzione contabile.
- La quota di RSL non è l'effetto di RSL da sola: le interazioni sono divise tra i fattori.
- Usa scenari non fisici e componenti correlate in natura.
- Una quota più alta non prova che il fattore sia cambiato.

Shapley ripartisce, non spiega. Per sapere cosa sarebbe successo senza innalzamento serve il controfattuale.

3.6 Clustering of the exceedances

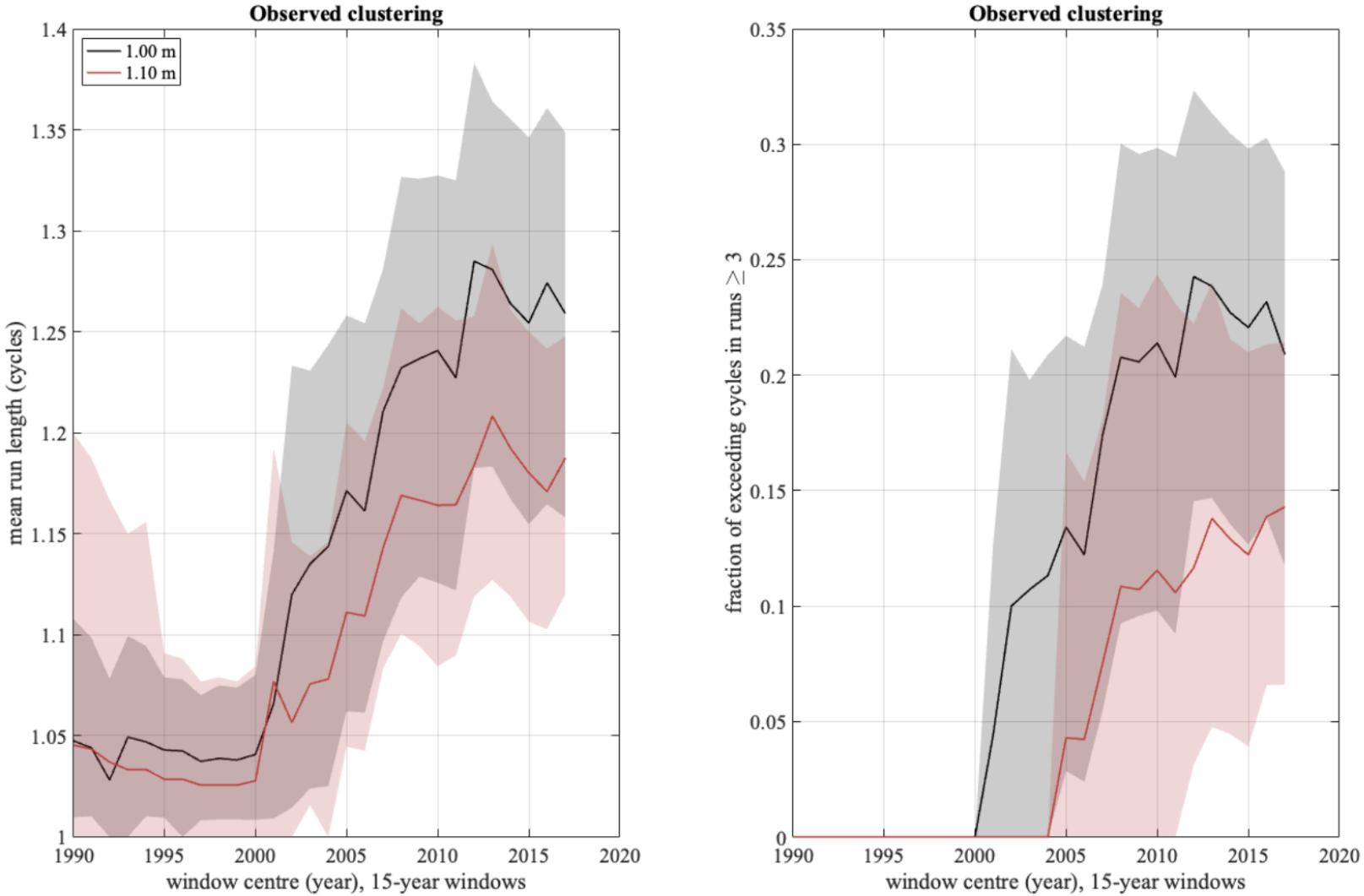
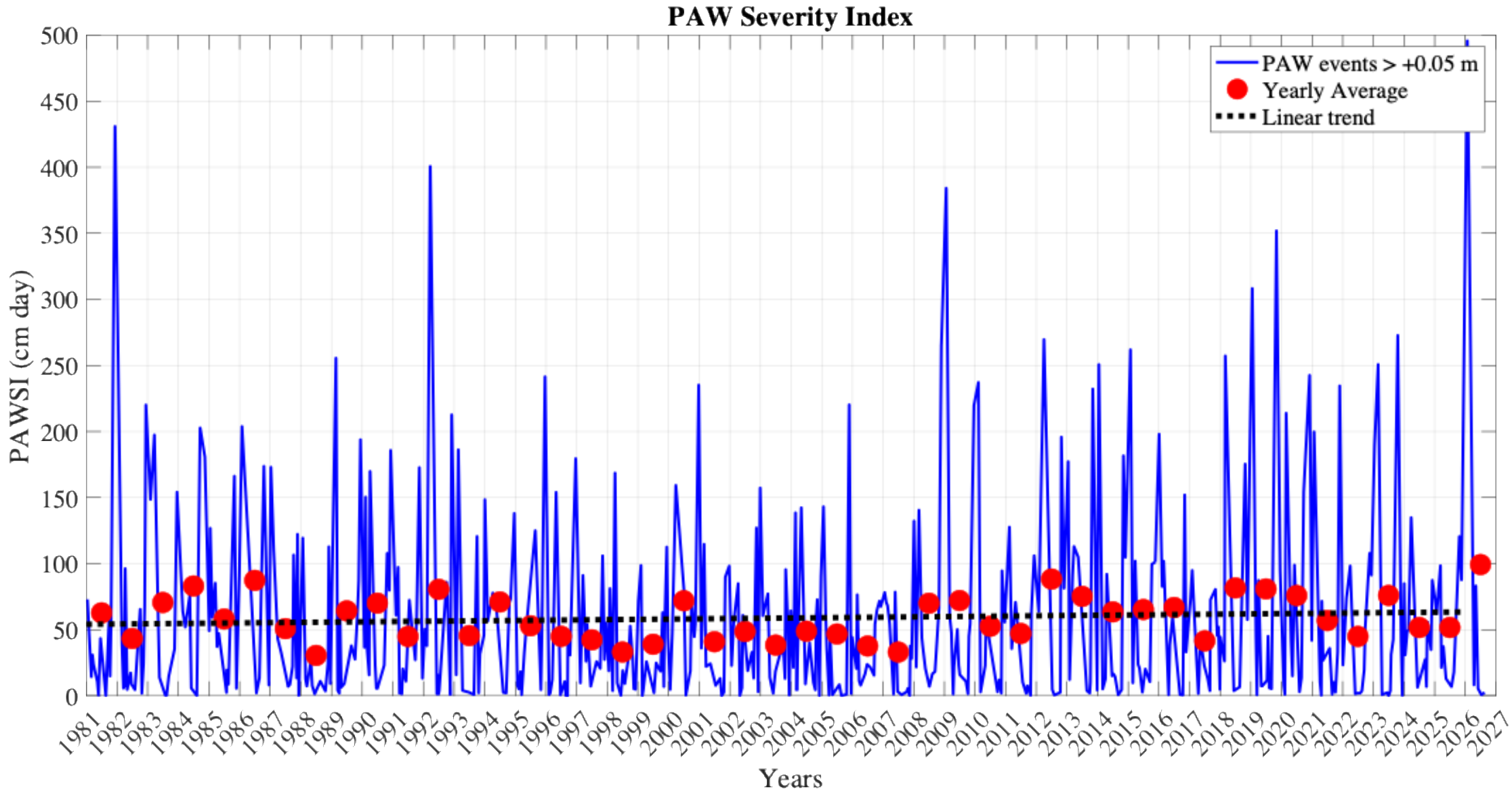
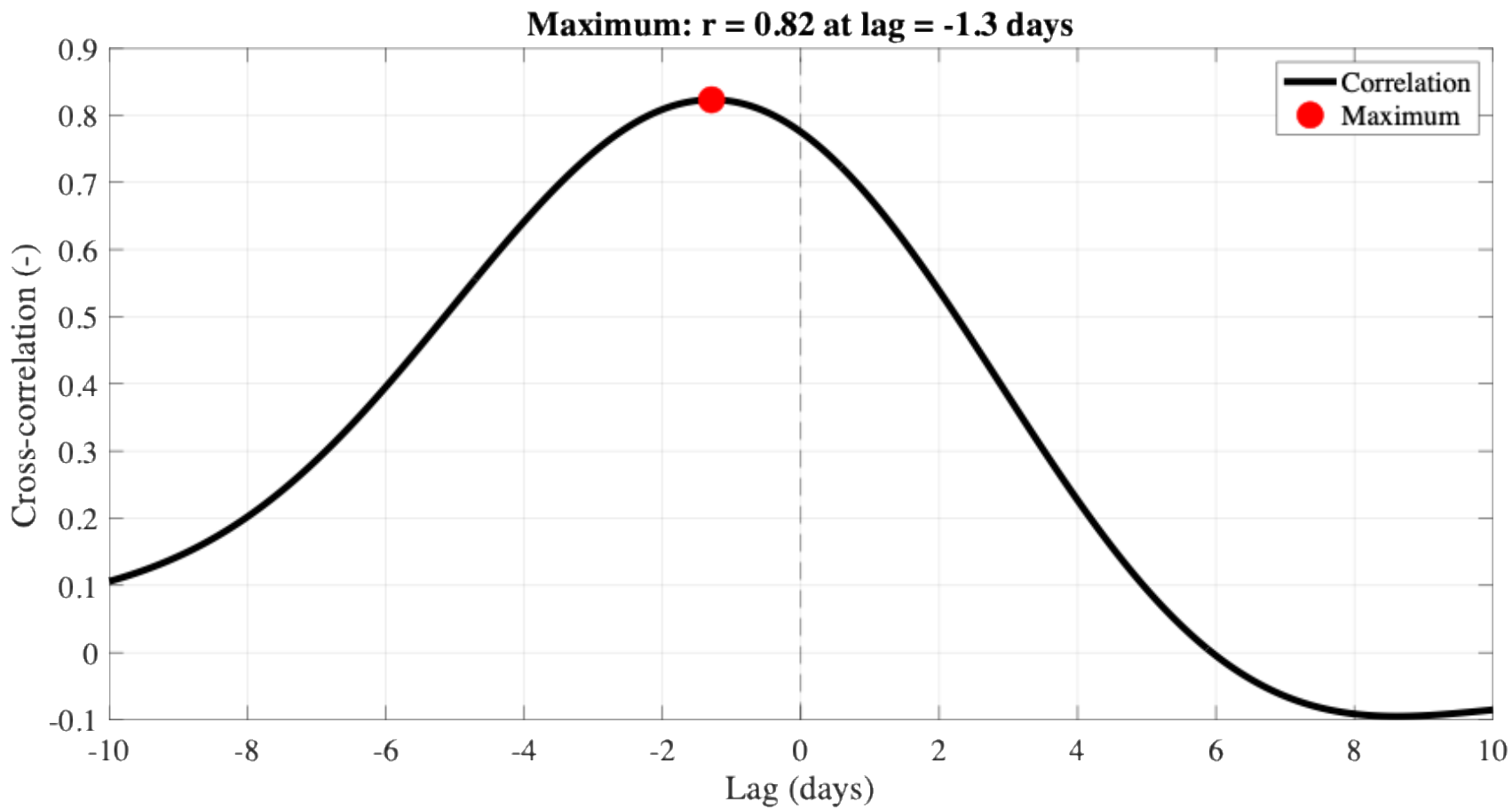


Figure 6 (420). Observed clustering for the thresholds 1.00 m (black) and 1.10 m (red). Left: mean run length of consecutive exceeding cycles. Right: fraction of exceeding cycles belonging to runs of at least three cycles. Bands as above.


PAW Severity Index
PAW events > +0.05 m
Yearly Average
Linear trend
PAWSI (cm day)
Years
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
1981
1982
1983
1984
1985
1986
1987
1988
1989
1990
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027


Maximum: r = 0.82 at lag = -1.3 days
Correlation
Maximum
Cross-correlation (-)
Lag (days)
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
-0.1
-10
-8
-6
-4
-2
0
2
4
6
8
10