



CENTRO STUDI SUGLI
IMPATTI DEI
CAMBIAMENTI
CLIMATICI

Evento Inaugurale – Rovigo, 11 Aprile 2024

IL FUTURO NON È PIÙ QUELLO DI
UNA VOLTA
Come preparararci?



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

*Evento inaugurale del Centro Studi sugli Impatti dei Cambiamenti Climatici
11 Aprile 2024, Rovigo*

PROGRAMMA

09:30 – Saluti introduttivi

09:45 – Finalità di CRITICAL, sua organizzazione e piano delle attività - **Marco Marani**

10:00 – Lectio Magistralis CRITICAL - **Bernhard Schrefler**, *Dinamica del suolo nell'Alto Adriatico e problemi ambientali*

10:45 – Coffee Break

11:00 – Sessione di contributi generali dei ricercatori sostenitori (10 minuti, inclusivi di eventuali domande) – Chair: **Marco Marani**

Mara Thiene, Marco Borga, Cristiano Franceschinis,
HORIZON EUROPE PROJECT “Cross-sectoral Framework for Socio-Economic Resilience to Climate Change and Extreme Events in Europe (CROSSEU)”

Antonio Annis, Fernando Nardi
Approcci idro-geomorfologici e idrologici-idraulici per la mappatura delle aree golenali: applicazioni per la stima dell'impatto potenziale delle piene sulla produzione agricola dalla scala globale a quella locale

Giulia Passadore, Elena Crestani, Mattia Pivato, F. Carraro, Daniele Viero, **Luca Carniello**,
Enrico Bertuzzo, Andrea Rinaldo
IMAGeOnFEWS: Sistema Integrato di Previsione in Tempo Reale nel Veneto

Andrea Brenna, Nicola Surian
Dinamica d'alveo in risposta ad eventi estremi: processi geomorfologici ed implicazioni per la mappatura della pericolosità

Maria Francesca Caruso, Pietro Devò, Santa Andria, Eleonora Dallan, , Nathalia Correa Sanchez, Giuseppe Formetta, Alberto De Luca, Giorgia Fossier, Marco Borga, Marco Marani
Eventi estremi di variabili idrologiche: avanzamenti metodologici e applicazioni

Francesca Ceccato, Giorgia Dalla Santa, Fabio Gabrieli, Lorenzo Brezzi, Nicola Fabbian, Paolo Simonini, Simonetta Cola
Monitoraggio e modellazione geotecnica degli argini: strategie per la mitigazione del rischio di collasso

Eleonora Dallan, Francesco Marra, Marco Marani, Giorgia Fossier, Marco Borga,
Precipitazioni estreme da modelli climatici a convezione-permessa: valutazione e proiezioni

*Evento inaugurale del Centro Studi sugli Impatti dei Cambiamenti Climatici
11 Aprile 2024, Rovigo*

Andrea D'Alpaos, Luca Carniello, Alvise Finotello, Massimiliano Ghinassi , Alessandro Michielotto, Alice Puppini, Davide Tognin, Marco Marani

Progettare il futuro: riflessioni dalla Laguna di Venezia sulla resilienza dei sistemi costieri di fronte ai cambiamenti climatici e alla crescente pressione antropica

Pietro Carpanese, Luca Badin, Veronica Follador, Sara Mozzon, Elisa Saler, Marco Donà,
Francesca da Porto

Modelli e strumenti a supporto delle valutazioni di rischio per eventi sismici e alluvionali violenti

Francesco Marra, Marika Koukoula, Antonio Canale, Daniel B. Wright, Hayley J. Fowler, João P. Leitão, Ashish Sharma, Nadav Peleg,

Eventi di progetto per la valutazione di inondazioni urbane in climi futuri: un nuovo approccio fisicamente basato

Andrea Masiero, Francesco Pirotti, Alberto Guarnieri, Antonio Vettore

Le attività di ricerca del CIRGEO correlate allo studio degli impatti dei cambiamenti climatici

Giulia Passadore, Lorenzo Altissimo, Andrea Rinaldo

Gli Acquiferi dell'Alta Pianura Veneta, una "Fabbrica d'Acqua" in Difficoltà

Lorenzo Sanavia, Stefano Aretusini, Matteo Camporese, Tuanny Cajuhi, Laura De Lorenzis, Giulio Di Toro, Maria Lazari, Cheny Luo, Chiara Montorio, Bernhard Schrefler

Modellazione numerica di solidi porosi multifase con applicazione all'innescamento di frane e alla frattura per essiccazione.

13:15 – Pausa Pranzo

14:15 Il fiume Po e il suo Delta - Coordina: **Nicola Surian**

Aurora Ghirardelli, Eugenio Straffelini, Rodolfo Laurenti, Vincenzo D'Agostino, Paolo Tarolli,

Analisi della risalita del cuneo salino nel Delta del Po: Implicazioni sull'agricoltura costiera

Massimo Fabris, Mario Floris, Andrea Menin, Michele Monego, Guido Selvi, Umberto Trivelloni

Integrazione di dati GNSS e InSAR per il monitoraggio della subsidenza nell'area del delta del Po

Alvise Finotello, Valentina Marzia Rossi, Luca Carniello, Matteo Mantovani, Daniele Viero, Luca Zaggia

Ensuring resilience of the Po River Delta to rising relative sea levels using nature-based solutions for building land and mitigating subsidence (NatResPoNA)

15:15 Proiezioni di scarsità idrica: il caso del Fiume Adige - **Marco Borga**

Evento inaugurale del Centro Studi sugli Impatti dei Cambiamenti Climatici
11 Aprile 2024, Rovigo

15:45 – Tavola rotonda su Servizi Climatici di CRITICAL - tutti i ricercatori (coordinano: **Marco Borga, Marco Marani, Nicola Surian**)

16:15 – Fine dei lavori

Dinamica del suolo nell'Alto Adriatico e problemi ambientali

Bernhard Schrefler¹

¹Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università di Padova

First, I shall recall the evolution of the coastline and of the natural surface subsidence of the Po River Delta as it appears from the data of the EU Research program RAMWASS. Then the past subsidence due to methane water extraction will be addressed as well as the consequences for the Delta. I will show that in the case of groundwater extraction, the increase in subsidence induced by human activity generally stops as soon as the extraction from the layers is reduced. This is not the case for gas extraction, and I shall explain the different phases of subsidence due to this extraction. Based on data and modeling, I shall show that even by abandoning the exploitation of a reservoir, the induced subsidence does not stop, and that the residual subsidence can continue for several decades. Possible effects of this primary and delayed subsidence will be presented. The causes of the residual subsidence can be various. Here comes into play the necessity of modeling. The uncertainty of the physical model and the data, if considered through a Bayesian probabilistic method, can allow for better predictions, incorporating the measured data as they become available.

Approcci idro-geomorfologici e idrologici-idraulici per la mappatura delle aree golenali: applicazioni per la stima dell'impatto potenziale delle piene sulla produzione agricola dalla scala globale a quella locale

Antonio Annis¹, Fernando Nardi ²

¹WARREDOC, Università per Stranieri di Perugia

²Dipartimento di Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica, Università degli studi di Roma Tor Vergata.

* Corresponding Author, e-mail: antonio.annis@unistrapg.it

La delineazione dei corridoi fluviali, oggetto di fenomeni di esondazione, è di fondamentale importanza per la gestione e protezione degli ecosistemi naturali, degli insediamenti rurali ed urbani e della produzione agricola. Oltre ai modelli idrodinamici fisicamente basati che sono in grado di simulare efficacemente i processi di formazione e propagazione delle onde di piena, negli ultimi anni ci sono stati avanzamenti nello sviluppo e nell'applicazione di modelli idro-geomorfologici (Nardi et al., 2006), che si stanno affermando come valido strumento di mappatura delle aree a potenziale rischio idraulico per differenti finalità. In questo contributo vengono presentati i recenti sviluppi nella comprensione e nei limiti dell'applicazione delle leggi di scala alla base dei modelli idro-geomorfologici (Annis et al., 2019; 2022), che insieme ai modelli idrologici-idraulici hanno permesso di effettuare differenti analisi, quali quelle sulla distribuzione della popolazione in prossimità dei corridoi fluviali e sull'impatto potenziale delle piene nella produzione agricola, sia a scala globale (Figura 1) tramite l'utilizzo di dataset liberamente disponibili (Nardi et al., 2019; Portman et al., 2010), sia a scala locale grazie all'applicazione di modelli idrologici-idraulici ad altissima risoluzione spaziale (1 m). Le analisi presentate costituiscono un primo step nella comprensione dell'impatto degli eventi estremi attuali e futuri nella produzione agricola.

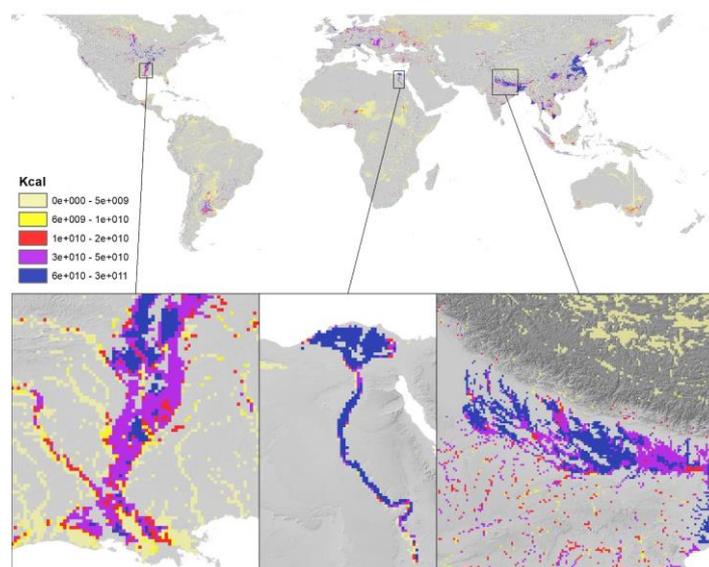


Figura 1: Distribuzione spaziale globale della produzione di Kcalorie cumulata data da 52 diverse colture agricole in aree suscettibili a inondazione. Fonte: Annis et al., 2024

References

- Annis, A., Nardi, F., Morrison, R. R. & Castelli, F., 2019. Investigating hydrogeomorphic floodplain mapping performance with varying DTM resolution and stream order. *Hydrol. Sci. J.*, 64 (5), 525–538. Taylor & Francis. doi:10.1080/02626667.2019.1591623
- Annis, A., Karpack, M., Morrison, R. R., & Nardi, F. (2022). On the influence of river basin morphology and climate on hydrogeomorphic floodplain delineations. *Advances in Water Resources*, 159, 104078.
- Annis, A., Chiarelli, D., Nardi, F., Rulli, M.C., (2024). Global assessment of crop production in floodplain areas. In preparation.
- Nardi, F., Annis, A., Baldassarre, G. Di, Vivoni, E. R. & Grimaldi, S., 2019. GFPLAIN250m, a global high-resolution dataset of earth's floodplains. *Sci. Data*, 6 , 1–6. The Author(s). doi:10.1038/sdata.2018.309
- Nardi, F., Vivoni, E. R. & Grimaldi, S., 2006. Investigating a floodplain scaling relation using a hydrogeomorphic delineation method. *Water Resour. Res.*, 42 (9), n/a-n/a. doi:10.1029/2005WR004155
- Portmann, F. T., Siebert, S. and Döll, P. (2010) 'MIRCA2000-Global monthly irrigated and rainfed crop areas around the year 2000: A new high-resolution data set for agricultural and hydrological modeling', *Global Biogeochemical Cycles*, 24(1). doi: 10.1029/2008gb003435.

Dinamica d'alveo in risposta ad eventi estremi: Processi geomorfologici ed implicazioni per la mappatura della pericolosità

Andrea Brenna^{1*}, Nicola Surian¹

¹Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova.

* andrea.brenna@unipd.it

Glie eventi di piena costituiscono un importante fattore di controllo sulla dinamica dei corsi d'acqua. La frequenza con cui eventi idrologici di elevata magnitudo, fino ad estremi, si verificano sul territorio italiano ha mostrato un sostanziale incremento nel corso degli ultimi decenni (Blöschl et al., 2020) sotto l'influenza dei cambiamenti climatici. È noto come durante tali eventi un corso d'acqua possa essere soggetto a processi geomorfologici in grado di trasformare profondamente l'assetto plano-altimetrico dell'alveo con implicazioni rilevanti in termini di pericolosità. Tali considerazioni riguardano soprattutto i contesti montano-collinari, ove la dinamica degli alvei (es., forti allargamenti) e i processi di trasporto solido inteso (es., *debris floods*) rappresentano sovente gli aspetti cruciali nel determinare la pericolosità complessiva indotta dai fenomeni alluvionali. Il presente contributo mira (i) a fornire una panoramica delle recenti ricerche volte alla comprensione delle dinamiche d'alveo indotte da eventi idrologici di elevata magnitudo e (ii) ad evidenziare le implicazioni di tali conoscenze per una mappatura più efficace della pericolosità geomorfologica.

In aggiunta alla componente idraulica (es., potenza unitaria della corrente) altri aspetti geomorfologici rivestono un ruolo fondamentale nel determinare le modificazioni d'alveo in risposta ad un evento di piena (Buraas et al., 2014). Sulla base dell'approccio integrato sviluppato da Rinaldi et al. (2016a), numerosi studi hanno analizzato la risposta geomorfologica di corsi d'acqua italiani ad eventi di piena estremi (e.g., Surian et al., 2016) osservando come il confinamento laterale e la disponibilità di sedimento rappresentino due fattori di controllo significativi sugli allargamenti dell'alveo. Studi recenti focalizzati sui reticoli idrografici colpiti dalla Tempesta Vaia (Figura 1) hanno dimostrato come le tipologie di flusso mediante le quali il sedimento viene trasportato durante una piena rappresentino un ulteriore fattore di controllo in grado di determinare differenti risposte morfologiche dei corsi d'acqua (Brenna et al., 2021). Nello specifico, a parità di condizioni al contorno, tratti fluviali interessati da *debris floods* sono caratterizzati da allargamenti maggiori rispetto a quelli dove si verificano flussi idrici con trasporto solido ordinario (Brenna et al., 2023).

La pericolosità indotta da eventi alluvionali in torrenti montani e, più in generale, in corsi d'acqua molto dinamici (es. a canali intrecciati) è costituita solo in parte dai fenomeni strettamente idraulici di esondazione, ai quali si associano le dinamiche d'alveo che possono assumere un ruolo anche dominante in tali contesti (Mazzorana et al., 2013). Le conoscenze scientifiche qui menzionate hanno il potenziale di incrementare significativamente la nostra capacità di mappare in modo efficace la pericolosità complessiva (idraulica e geomorfologica) legata ad eventi idrologici estremi. Alcuni strumenti geomorfologici sono già stati sviluppati in tal senso per il contesto italiano (es., fasce fluviali di dinamica morfologica; Rinaldi et al., 2016b). Le

attività di ricerca in corso mirano a implementare tali strumenti operativi sulla base delle nuove conoscenze acquisite.

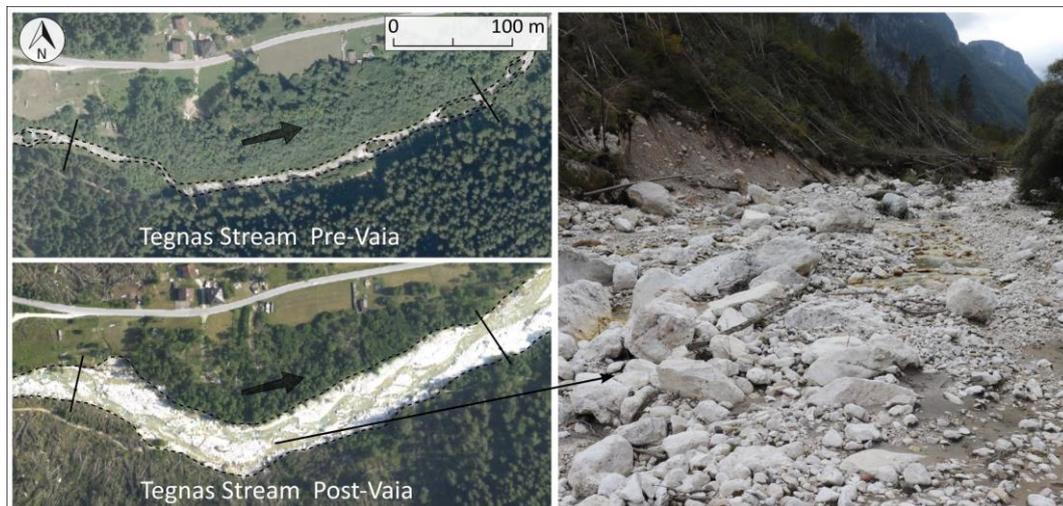


Figura 1: Trasporto di sedimento intenso e relativo allargamento dell'alveo indotti dalla Tempesta Vaia (Ottobre 2018) nel Torrente Tegnias (Bacino del Cordevole, Belluno).

References

- Blöschl, G., Kiss, A., Viglione, A., Barriendos, M., Böhm, O., Brzdil, R., Wetter, O. (2020), Current european flood-rich period exceptional compared with past 500 years. *Nature* 583 (7817), 560–566. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2478-3>.
- Brenna, A., Marchi, L., Borga, M., Ghinassi, M., Zaramella, M., Surian, N. (2021), Sediment–water flows in mountain catchments: insights into transport mechanisms as responses to high-magnitude hydrological events, *J. Hydrol.* 602, 126716 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126716>.
- Brenna, A., Marchi, L., Borga, M., Zaramella, M., & Surian, N. (2023), What drives major channel widening in mountain rivers during floods? The role of debris floods during a high-magnitude event, *Geomorphology*, 430, 108650. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108650>.
- Buraas, E.M., Renshaw, C.E., Magilligan, F.J., Dade, W.B. (2014), Impact of reach geometry on stream channel sensitivity to extreme floods, *Earth Surf. Process. Landf.* 39 (13), 1778–1789. <https://doi.org/10.1002/esp.3562>.
- Mazzorana, B., Comiti, F., & Fuchs, S. (2013), A structured approach to enhance flood hazard assessment in mountain streams, *Natural hazards*, 67, 991-1009. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9811-y>
- Rinaldi, M., Amponsah, W., Benvenuti, M., Borga, M., Comiti, F., Lucía, A., ..., Surian, N. (2016a). An integrated approach for investigating geomorphic response to extreme events: methodological framework and application to the October 2011 flood in the Magra River catchment, Italy, *Earth Surf. Process. Landf.* 41 (6), 835–846. <https://doi.org/10.1002/esp.3902>.
- Rinaldi, M., Surian, N., Comiti, F., Bussetini, M. (2016). IDRAIM - Sistema di valutazione idromorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua. ISPRA, Manuali e Linee Guida 131/2016.
- Surian, N., Righini, M., Lucía, A., Nardi, L., Amponsah, W., Benvenuti, M., ..., Viero, A. (2016). Channel response to extreme floods: insights on controlling factors from six mountain rivers in northern Apennines, Italy, *Geomorphology* 272, 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.002>.

IMAGeOnFEWS: Sistema Integrato di Previsione delle Piene in tempo reale nel Veneto

**G. Passadore¹, E. Crestani¹, M. Pivato¹, F. Carraro¹,
D. P. Viero¹, L. Carniello¹, E. Bertuzzo¹, A. Rinaldo¹**

¹Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università di Padova.

* Corresponding Author, e-mail: luca.carniello@unipd.it

Delft-FEWS è una piattaforma che permette di gestire dati idrometeorologici in tempo reale per produrre previsioni modellistiche. La possibilità di integrazione di qualsiasi modello numerico idrologico-idrodinamico, la natura modulare e l'alto grado di personalizzazione ne hanno consentito un'ampia diffusione a livello globale. Nel caso specifico, Delft-FEWS è stato utilizzato per l'implementazione dei modelli idrologici e idrodinamici per la previsione delle piene in tempo reale sviluppati e calibrati dal Dipartimento ICEA dell'Università di Padova, al fine di potenziare lo strumento operativo I.M.A.Ge. (Interfaccia e Modello per l'Allerta e la Gestione delle piene) già in uso presso il CFD (Centro Funzionale Decentrato) della Protezione Civile del Veneto. I.M.A.Ge. è un sistema modellistico integrato climatico-idrologico-idrodinamico, fisicamente basato e spazialmente distribuito, che descrive esplicitamente i processi di trasformazione afflussi-deflussi e i fenomeni idrodinamici legati alla propagazione delle onde di piena. La sua implementazione nella Piattaforma Delft-FEWS, resasi necessaria per la gran mole di dati da gestire e per la richiesta della Regione Veneto di estendere lo studio a tutti i bacini del Veneto, ha dato origine alla configurazione IMAGeOnFEWS, qui descritta, attualmente implementata per il bacino del Brenta-Bacchiglione (Crestani et al., 2018) e per il bacino del Piave (Crestani et al., 2022).

La catena modellistica predisposta stima gli idrogrammi di piena a partire dalle piogge, misurate o previste, con un modello idrologico di trasformazione afflussi-deflussi (Rhyme, River HYdrological ModEl). La risposta idrologica viene calcolata sulla base della convoluzione tra la pioggia efficace e un idrogramma istantaneo unitario di tipo geomorfologico che considera l'eterogeneità dei percorsi di drenaggio all'interno di un bacino, includendo in modo esplicito i processi di dinamica dell'umidità del suolo e il contributo alla dispersione relativo al reticolo idrografico e alla sua morfologia. La calibrazione, ottenuta tramite l'algoritmo di Markov Chain Monte Carlo (MCMC), comprende l'intero dataset disponibile (valori orari dal 1990 ad oggi).

Gli idrogrammi in uscita dal modello di trasformazione afflussi-deflussi vengono quindi propagati lungo l'asta fluviale fino alla foce, mediante un modello idrodinamico (2DEF, 2-Dimensional Finite Elements), che valuta l'evoluzione dell'onda di piena e i possibili allagamenti nel dominio di interesse. Il modello idrodinamico 2DEF si basa sulla soluzione delle equazioni di De Saint Venant, opportunamente modificate per descrivere in modo efficiente la transizione asciutto-bagnato, che descrivono il moto bidimensionale di una corrente a superficie libera nelle ipotesi di distribuzione idrostatica delle pressioni, distribuzione uniforme della velocità lungo la verticale e fondo inerodibile. Il modello consente inoltre di accoppiare agli elementi bidimensionali degli elementi unidimensionali in grado di descrivere il comportamento idraulico dei canali della rete minore o dei manufatti idraulici presenti all'interno del reticolo idrografico (e.g. traverse, paratoie, argini).

*Evento inaugurale del Centro Studi sugli Impatti dei Cambiamenti Climatici
11 Aprile 2024, Rovigo*

La Piattaforma IMAGeOnFEWS, opportunamente personalizzata per i modelli dei fiumi veneti considerati (e.g. Figura 1), esegue in cascata: download ed import dei dati misurati in tempo reale e loro validazione e spazializzazione; download ed import dei dati previsti e relativa spazializzazione; corsa del modello idrologico Rhyme con gestione dei suoi risultati; corsa del modello idrodinamico 2DEF con gestione dei suoi risultati; visualizzazione dei risultati e creazione di specifica reportistica.

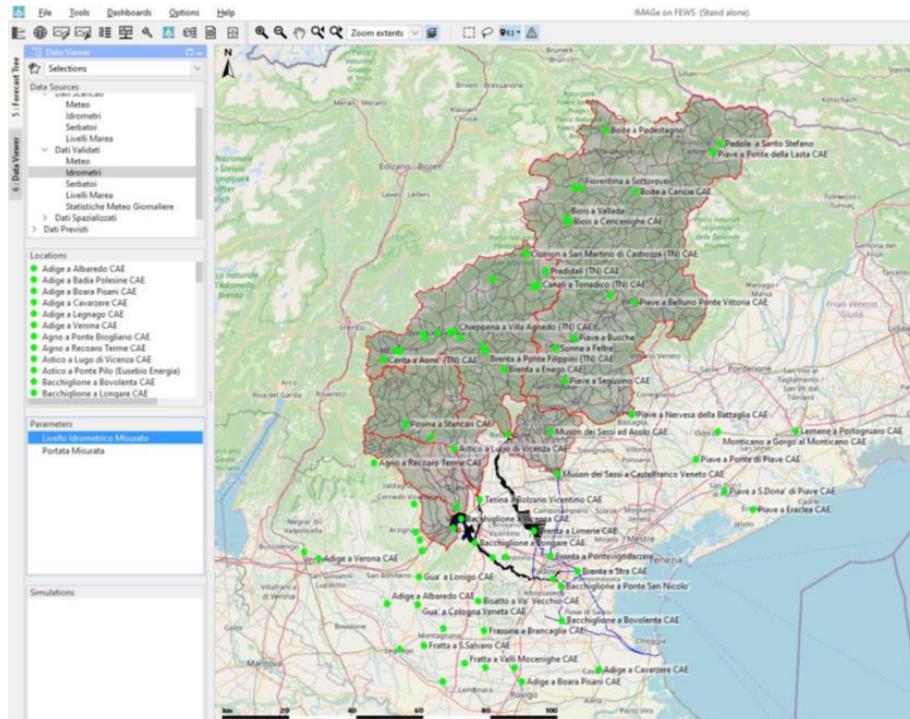


Figura 1: Esempio di schermata FEWS per il sistema idrografico Brenta-Bacchiglione: in rosso i bacini montani usati dal modello idrologico, in pianura il reticolo usato dal modello idrodinamico e in verde i sensori di livello in Veneto.

L'interfaccia grafica GIS della Piattaforma Delft-FEWS (figura 1) permette di visualizzare tutti i dati misurati (puntuali e spazializzati), le previsioni meteorologiche e i risultati delle simulazioni nelle diverse sezioni di interesse.

Si sottolinea che nel sistema implementato è possibile importare anche previsioni meteo (sia deterministiche quali ICON che stocastiche quali COSMOLEPS), ottenute da diversi modelli meteorologici, al fine di ottenere i risultati della catena modellistica idrologico-idrodinamica a partire da diverse previsioni. Analogamente, è possibile integrare altri modelli idrologici e idrodinamici, anche commerciali, al fine di eseguire un eventuale confronto tra diversi risultati modellistici.

References

Crestani, E., Mel, R., Passadore, G., Viero, D.P., Carniello, L., Matticchio, M., Boscolo, P., Cremonese, S., Saccardo, I., De Fanti, B., Puiatti, M., D'Alpaos, L. & Rinaldo, A. (2018). Sistema integrato di previsione delle piene in tempo reale nel bacino idrografico Brenta-Bacchiglione, Atti del convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Ancona.

*Evento inaugurale del Centro Studi sugli Impatti dei Cambiamenti Climatici
11 Aprile 2024, Rovigo*

Crestani, E., Passadore, G., Viero, D.P., Carniello, L., Bertuzzo, E., Matticchio, M., D'Alpaos, L. & Rinaldo, A. (2022). Sistema integrato di previsione delle piene in tempo reale nel bacino idrografico del Piave, Atti del convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Reggio Calabria.

Eventi estremi di variabili idrologiche: avanzamenti metodologici e applicazioni

**Maria Francesca Caruso^{1,*}, Pietro Devò^{1,*}, Santa Andria^{1,*}, Eleonora Dallan²,
Nathalia Correa Sanchez², Giuseppe Formetta³, Alberto De Luca, Giorgia
Fosser⁴, Marco Borga², Marco Marani¹**

¹Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università di Padova.

²Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Università di Padova.

³Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica, Università di Trento.

⁴Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura e Ambientale, Scuola Universitaria Superiore – IUSS Pavia.

*Corresponding Authors, e-mail: mariafrancesca.caruso@unipd.it,
pietro.devo@dicea.unipd.it, santatriniainaomenafinaritra.andriamanantena@phd.unipd.it

Lo studio degli eventi estremi di variabili idrologiche, come alluvioni, siccità, eventi tempestosi, etc., è di grande interesse nel campo dell'idrologia applicata, per effetto delle loro potenziali ripercussioni sui sistemi sociali, ambientali ed economici. L'incremento della frequenza e/o severità di questi fenomeni in molte aree del mondo ha evidenziato l'importanza di un'attenta e precisa quantificazione dei tempi ritorno ad essi associati che vengono utilizzati per la pianificazione e progettazione sul territorio di opere di prevenzione e mitigazione del rischio. I riscontri nell'accelerazione del cambiamento climatico confermano ulteriormente l'urgenza e la grande attualità del tema che, tuttavia, rimane ancora oggi oggetto di un fervido dibattito scientifico. In questo contesto generale, si inserisce la nostra attività di ricerca che spazia dallo sviluppo di nuovi metodi statistici per lo studio degli eventi estremi, alla fornitura di servizi climatici, fino a tecniche di downscaling temporale delle precipitazioni.

La lunghezza temporale delle serie storiche di variabili idrologiche è spesso limitata e la progettazione delle opere sul territorio richiede di frequente un'estrapolazione al di fuori dell'intervallo dei valori contenuti all'interno dei dati disponibili con conseguente aumento nell'incertezza delle stime dei quantili più estremi. Questa criticità può essere superata ricorrendo all'utilizzo di approcci statistici non asintotici dei valori estremi basati sulla Metastatistical Extreme Value Distribution (MEVD). Questi modelli assicurano una maggiore robustezza delle stime rispetto a quelli basati sui risultati asintotici della teoria dei valori estremi, essendo caratterizzati dall'utilizzo di un maggior numero di informazioni osservative che, nel contesto metastatistico, indichiamo con il termine di "eventi ordinari". In questo contributo, presentiamo: (1) l'utilizzo congiunto di tecniche di regionalizzazione, comunemente note per caratterizzare siti non strumentati o incrementarne il numero di osservazioni disponibili sfruttando la memoria di stazioni limitrofe che abbiano caratteristiche di omogeneità, con metodologie basate sulla MEVD; (2) la metodologia MEVD riformulata introducendo una componente termodinamica per modellare i processi convettivi; (3) una interfaccia WebGis per visualizzare le stime delle piogge estreme, usando metodi asintotici e non asintotici, in siti strumentati o non strumentati per la Regione del Veneto. Infine, per superare la carenza dei dati di pioggia osservati o dei risultati dei modelli climatici a brevi risoluzioni temporali, proponiamo tecniche di downscaling temporale, basate sulla teoria dei processi stocastici, per inferire la struttura di correlazione delle piogge a scale temporali brevi (raggiungendo i 5 minuti di

*Evento inaugurale del Centro Studi sugli Impatti dei Cambiamenti Climatici
11 Aprile 2024, Rovigo*

risoluzione) utilizzando le statistiche ottenute dalla scala natia (i.e., l'ora) dei Convection-Permitting Models.

Monitoraggio e modellazione geotecnica degli argini: strategie per la mitigazione del rischio di collasso

Francesca Ceccato^{1*}, Giorgia Dalla Santa¹, Fabio Gabrieli¹, Lorenzo Brezzi¹, Nicola Fabbian¹, Paolo Simonini¹, Simonetta Cola¹

¹Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università di Padova.

* Corresponding Author, e-mail: francesca.ceccato.1@unipd.it

La stabilità degli argini fluviali è cruciale nella valutazione del rischio alluvione, soprattutto considerando l'impatto dei cambiamenti climatici. Eventi recenti di inondazioni devastanti, come quelle verificatesi in Emilia-Romagna nel 2023, hanno messo in luce l'urgente necessità di approfondire la comprensione dei meccanismi di collasso arginale e di sviluppare soluzioni innovative per la mitigazione del rischio, nel tentativo mettere a punto nuove strategie di adattamento ai cambiamenti climatici. I meccanismi di collasso che possono interessare gli argini fluviali in seguito alle piene sono molteplici: per esempio, fenomeni di erosione interna o esterna, instabilità delle scarpate. Molti di questi meccanismi sono innescati da eterogeneità locali spesso difficili da individuare (Ceccato and Simonini, 2023). La probabilità associata all'occorrenza di ciascun meccanismo dipende dalle caratteristiche idromeccaniche del sistema di arginatura e dalle forzanti idrauliche.

La combinazione di prove in sito, test di laboratorio, dati di monitoraggio e analisi numeriche, eseguiti con tecniche innovative, offrono una base di conoscenze ottimale per una valutazione e gestione del rischio alluvioni che possa tener conto della fragilità arginale. L'obiettivo del gruppo di geotecnica dell'Università di Padova è quello di combinare questi aspetti per avanzare lo stato delle conoscenze e lo stato dell'arte circa il comportamento delle strutture arginali e il relativo livello di sicurezza. Tutto questo al fine di permettere una valutazione più affidabile della fragilità arginale e una gestione più avanzata del rischio alluvioni.

In quest'ottica, il gruppo ha avviato diverse installazioni mirate a testare nuove tecniche di caratterizzazione e sensori innovativi per il monitoraggio degli argini fluviali.

Attualmente segue i seguenti siti di monitoraggio:

- fiume Grizzaga, nel comune di Modena, dove nell'aprile 2023, insieme a igrometri, sensori di temperatura e un piezometro, è stato installato un rivestimento corticale strumentato con fibre ottiche;
- fiume Tagliamento, dove a marzo 2024 sono stati installati tensiometri, igrometri e piezometri in 6 distinte sezioni di monitoraggio;
- fiume Adige, nel tratto Bolzano-Trento, dove sono stati avviati tre siti di monitoraggio con sensori distribuiti in fibra ottica (DFOS): il primo partito nel 2017 copre un tratto di 350m dove i cavi ottici sono installati orizzontalmente in una trincea al piede dell'argine; negli altri due siti, il monitoraggio realizzati nel 2021 è costituito da strumentazioni installate in fori posti sia in goleni, sia in asse dell'argine, che nella berma lato campagna. Oltre ai DFOS vi sono piezometri, sonde termiche e cavi per Cross Hole Electrical Resistivity Tomography (CHERT) (Cola et al. 2021, Fabbian et al. 2024);

- fiume Gorzone, nel comune di Cavarzere (VE): dove nel 2021 si sono installati DFOS in accoppiamento con sensori di pressione e temperatura (Dalla Santa et al. 2023,).

In tutti i siti si è proceduto ad accurate indagini geotecniche per definire il più possibile le caratteristiche dell'argine e delle fondazioni.

Tali esperienze hanno permesso di valutare le varie tipologie di indagine e monitoraggio, sulla base dell'affidabilità, spaziatura e continuità della misura, costi di installazione e manutenzione, modalità di installazione e durabilità nel tempo. I principali vantaggi dei DFOS risiedono in una elevata precisione di misura e nella possibilità di acquisire informazioni lungo estensioni di cavo ottico anche di diversi chilometri e con una risoluzione spaziale che si può spingere ai 20 cm, caratteristiche che rendendo questa tecnica particolarmente adatta per il monitoraggio di strutture lineari quali gli argini. Di contro, il dispositivo di interrogazione del sistema DFOS è molto costoso.

Il comportamento termo-idraulico-meccanico degli argini nel corso del tempo e in risposta alle varie forzanti ambientali viene poi studiato attraverso modelli numerici avanzati che permettono anche di stimare gli spostamenti post-cedimento. Il gruppo geotecnico dell'Università di Padova collabora insieme ad un vasto team internazionale proprio allo sviluppo di questo metodo a grandi deformazioni denominato Material Point Method, attraverso il codice open source Anura3D. Questo tipo di analisi permette di stimare l'entità degli spostamenti post-collasso della struttura e possono rappresentare un ulteriore supporto nei processi di valutazione del rischio (Girardi et al., 2022).

References

- Ceccato, F., Simonini, P., 2023. The effect of heterogeneities and small cavities on levee failures: The case study of the Panaro levee breach (Italy) on 6 December 2020. *J. Flood Risk Manag.* 1–15. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12882>
- Cola, S., Girardi, V., Bersan, S., Simonini, P., Schenato, L., De Polo, F., 2021. An optical fiber-based monitoring system to study the seepage flow below the landside toe of a river levee. *Journal of Civil Structural Health Monitoring.* <https://doi.org/10.1007/s13349-021-00475-y>
- Dalla Santa, G., Fabbian, N., Cola, S. (2023). Investigating the Effects of Water Levels Measured in Two Nearby Rivers on Groundwater Pore Pressures Regime. 8th Italian Conference of Researchers in Geotechnical Engineering, CNRIG 2023. Palermo, 178 – 185. Doi: 10.1007/978-3-031-34761-0_22
- Fabbian, N., Simonini, P., De Polo, F., Schenato, L., & Cola, S., 2024. Temperature monitoring in levees for detection of seepage. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(2), 1-12. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-024-03566-4>
- Girardi, V., Ceccato, F., Rohe, A., Simonini, P., Gabrieli, F., 2022. Failure of levees induced by toe uplift : Investigation of post-failure behavior using material point method. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.07.015>

Precipitazioni estreme da modelli climatici a convezione-permessa: valutazione e proiezioni

Eleonora Dallan^{1*}, Francesco Marra², Marco Marani³, Giorgia Fossier⁴, Marco Borga¹

¹Dipartimento di Territorio e Sistemi Agro Forestali, Università di Padova

²Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova

³Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università di Padova

⁴University School for Advanced Studies - IUSS Pavia

* Corresponding Author, e-mail: Eleonora.dallan@unipd.it

L'adattamento delle strategie di gestione del rischio idrologico e geologico a nuovi contesti climatici richiede la valutazione accurata dei futuri cambiamenti nelle precipitazioni estreme a durate sub-giornaliere. Questa necessità è particolarmente critica in regioni ad orografia complessa, dove precipitazioni brevi e intense possono causare alluvioni improvvise e colate detritiche. Per ottenere rappresentazioni più realistiche dei processi di precipitazione intensa convettiva, sono stati introdotti recentemente modelli climatici ad alta risoluzione (scala chilometrica) capaci di risolvere esplicitamente la convezione, noti come modelli climatici a convezione permessa (CPMs). Tuttavia, a causa dei costi computazionali elevati, le simulazioni coprono solo brevi periodi (generalmente 10-20 anni), limitando l'applicabilità degli approcci tradizionali per l'analisi degli eventi estremi con bassa probabilità di accadimento. Recentemente, nell'ambito dell'analisi degli eventi estremi, nuovi approcci non asintotici hanno dimostrato di poter fornire stime accurate delle precipitazioni estreme con tempi di ritorno elevati anche da serie temporali relativamente brevi.

In questo studio, abbiamo applicato uno di questi metodi, chiamato "Simplified Metastatistical Extreme Value" (SMEV), ai CPMs per: i) valutare la rappresentazione delle precipitazioni estreme nei modelli CPM in aree con orografia complessa, e ii) stimare i cambiamenti futuri dei quantili di precipitazione di durata sub-giornaliera. L'area di studio comprende il nordest italiano per la parte di valutazione del modello, dove sono disponibili dati osservati da una rete densa di pluviometri, e l'intero nord Italia e la catena alpina per i cambiamenti futuri. Abbiamo applicato l'analisi SMEV a nove modelli di un ensemble di CPM (parte del progetto CORDEX-FPS), con una risoluzione spaziale di circa 3 km. Le simulazioni sono disponibili per quattro periodi temporali di 10 anni ciascuno: il periodo storico di "valutazione" (2000-2009, modello CPM "da rianalisi"), il periodo storico di riferimento (1996-2005), un futuro prossimo (2041-2050) e un futuro remoto (2090-2099). Per i due periodi futuri, lo scenario di emissione simulato è RCP8.5. Abbiamo stimato i quantili delle precipitazioni per durate da 1 a 24 ore e tempi di ritorno fino a 100 anni, confrontandoli con i dati dei pluviometri per la valutazione, e stimando i cambiamenti futuri rispetto al periodo storico per tutta l'area di studio.

Il confronto tra il periodo storico di rianalisi e i dati osservati mostra che l'ensemble dei modelli riproduce in modo soddisfacente i quantili di precipitazione (Figura 1), con un bias relativo a 20 anni di tempo di ritorno che varia tra circa 0,86 e 0,98 per durate da 1 a 24 ore rispettivamente. Il Fractional Root Mean Square Error varia tra circa 0,24 e

0,16 per le stesse variabili. Si osserva anche una dipendenza del bias dall'elevazione: i modelli tendono a sottostimare i quantili nelle aree a basse altitudini, soprattutto per le durate brevi, mentre si ha sovrastima alle altitudini maggiori per le durate di 1 e 3 ore.

Per quanto riguarda i cambiamenti futuri nelle precipitazioni estreme (Figura 2), i risultati mostrano una tendenza all'incremento in quasi tutta l'area di studio, con un segnale di cambiamento meno pronunciato solo nella parte occidentale corrispondente alla regione Piemonte. I cambiamenti significativi mostrano pattern spaziali che dipendono dalla durata esaminata e dal periodo temporale considerato (futuro prossimo versus futuro remoto). In particolare, si nota un aumento degli eventi intensi in alcune aree orografiche alpine per le durate di 1 e 3 ore, mentre nella parte settentrionale della Toscana l'aumento è più pronunciato per le durate di 6-24 ore. Questi risultati sono cruciali per migliorare la gestione del rischio idrogeologico legato agli eventi di precipitazione estrema e per migliorare la resilienza in un contesto di cambiamento climatico.

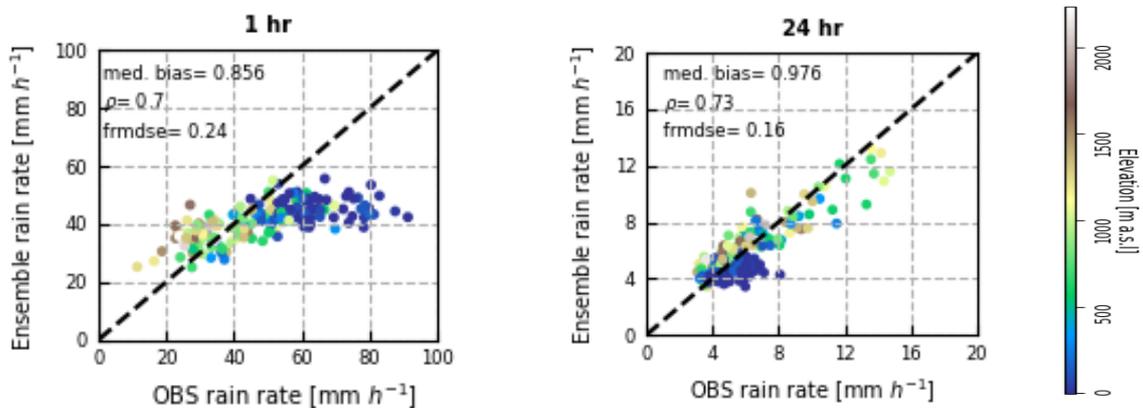
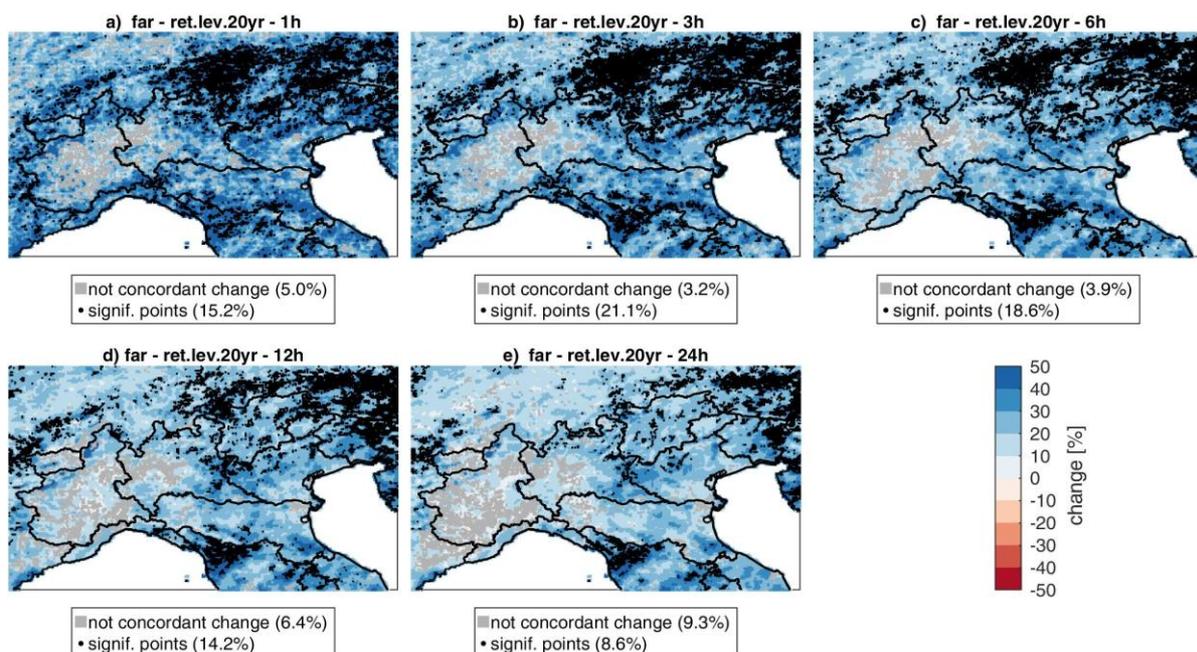


Figura 1: Quantile a 20 anni di tempo di ritorno: confronto tra il valore mediano dell'ensemble di modelli CPM ed i dati osservati, per le durate di 1h e 24 h.



*Evento inaugurale del Centro Studi sugli Impatti dei Cambiamenti Climatici
11 Aprile 2024, Rovigo*

Figura 2: Cambiamento futuro per il quantile di precipitazione a 20 anni di tempo di ritorno (valore mediano dell'ensemble di modelli CPM, futuro remoto), per 5 durate di precipitazione.

Casting the Future: perspectives from the Venice Lagoon on coastal system resilience to climate change and increasing human pressure

**D'Alpaos Andrea^{1*}, Luca Carniello², Alvise Finotello¹, Massimiliano Ginassi¹,
Alessandro Michielotto¹, Alice Puppini¹, Davide Tognin², Marco Marani²**

¹ Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova

² Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università di Padova.

* Corresponding Author, e-mail: andrea.dalpaos@unipd.it

Coastal systems are among the most economically valuable and highly threatened systems on Earth. Providing a multitude of valuable ecosystem services, they remain in peril due to the intertwined effects of climate change and increasing human pressure. Within Coastal systems, coastal cities have been vital centers of human activity since ancient times, characterized by an intricate coevolution between the natural environment and the built one. However, recent climate changes have highlighted the vulnerability of these areas, necessitating a holistic approach to ensure the preservation and conservation of their ecogeomorphic features.

We consider and analyze the case of the Venice Lagoon, a prime example of the intricate interplay between mankind and nature, whose history and destiny are entwined with the City of Venice. Employing an interdisciplinary approach that merges field observations, remote sensing, laboratory analyses, and mathematical modeling of ecogeomorphic processes, we unveil the accelerated morphological decay of the lagoon and its crucial ecosystem services (D'Alpaos and D'Alpaos, 2021; Puppini et al., 2024; Tognin et al., 2022) triggered by the ever-increasing human pressures, coupled with the amplified effects of climate change.

Through a multidisciplinary approach that combines the expertise of coastal hydrodynamics, eco-geomorphology, and sedimentology, our research focuses on innovative strategies to enhance the resilience of coastal cities and of the ecosystems which host them. This integrated approach not only focuses on strengthening human infrastructure but places particular emphasis on harmonizing human needs with the conservation of marine and coastal ecosystems.

We also provide new insights on the negative effects of coastal flood prevention measures, like storm-surge barriers, that are globally adopted to address the challenge of rising sea levels (Tognin et al., 2021, 2022). The Venice Lagoon thus emerges as a compelling case study, revealing the emerging conflicts among the key pillars of sustainable development: economy, society, and the environment. Through our findings, we offer insights into the fate awaiting coastal cities and ecosystems of the future.

Through detailed analysis of the specific challenges faced by Venice and similar coastal cities, we aim at developing tailor-made solutions that take into account the complexity and fragility of these ecosystems. The ultimate goal is to provide practical

guidelines and policies for the sustainable management of coastal cities, simultaneously addressing human needs and environmental conservation.

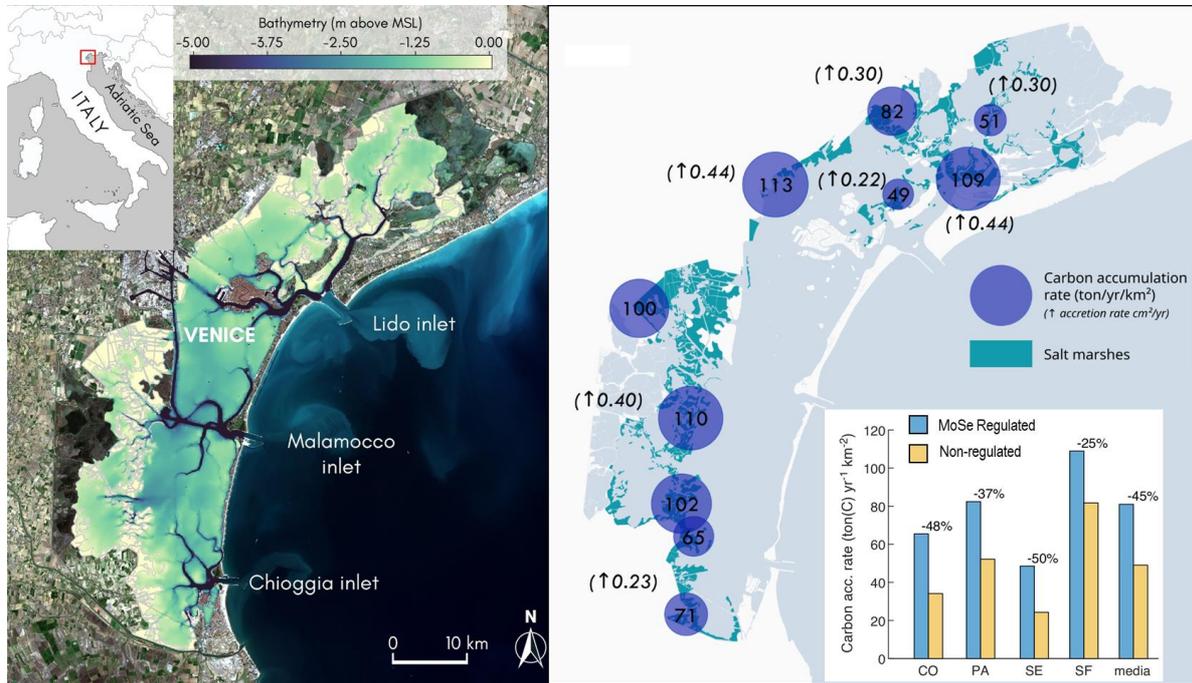


Figure 1: Color coded bathymetry of the actual configuration for the Venice Lagoon (left) and observed carbon accumulation rates (right) together with their reduction due to storm-surge barrier regulation.

References

D'Alpaos C., A. D'Alpaos A. (2021), The valuation of ecosystem services in the Venice Lagoon: A multicriteria approach, *Sustainability*, 13 (17), 9485.

Puppin, A., D. Tognin, M. Paccagnella, M. Zancato, M. Ghinassi, C. D'Alpaos, M. Marani, A. D'Alpaos (2024), Blue Carbon assessment in the salt marshes of the Venice Lagoon: dimensions, variability and influence of storm-surge regulation, *in review*.

Tognin, D., A. Finotello, A. D'Alpaos, D.P. Viero, M. Pivato, R.A. Mel, E. Bertuzzo, M. Marani. L. Carniello (2022), Loss of geomorphic diversity in shallow tidal embayments promoted by storm-surge barriers, *Science Advances*, 8(13), 8446.

Tognin, D., A. D'Alpaos, M. Marani. L. Carniello (2021), Marsh resilience to sea-level rise reduced by storm-surge barriers in the Venice Lagoon, *Nature Geosciences*.

*Evento inaugurale del Centro Studi sugli Impatti dei Cambiamenti Climatici
11 Aprile 2024, Rovigo*

Modelli e strumenti a supporto delle valutazioni di rischio per eventi sismici e alluvionali violenti

**Pietro Carpanese¹, Luca Badin¹, Veronica Follador¹, Sara Mozzon¹, Elisa Saler¹,
Marco Donà¹, Francesca da Porto¹**

¹Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova.

* Autore corrispondente, e-mail: francesca.daporto@unipd.it

L'Italia è tra i Paesi più colpiti da eventi naturali, al quarto posto (dietro a Giappone, USA e Cina) per perdite medie attese causate da questi eventi. Le alluvioni sono il pericolo più frequente, seguite dai terremoti, i quali sono responsabili delle maggiori perdite economiche (ICPD 2018). Sono poi sempre più numerosi anche gli eventi legati alle instabilità del terreno e ai fenomeni meteorologici (pioggia, grandine, e vento), che insieme alle alluvioni risentono del cambiamento climatico in atto.

A supporto delle valutazioni multirischio legate agli eventi catastrofali, necessarie nel contesto appena descritto, il gruppo di ricerca sta lavorando da un lato allo sviluppo di una piattaforma digitale per la stima delle perdite connesse ai danni strutturali causati da eventi naturali e, dall'altro lato, allo sviluppo di modelli per la valutazione di vulnerabilità strutturale e di impatto di alluvioni violente.

Il primo step per la costruzione della piattaforma ha riguardato il reperimento di mappe di pericolosità sismica e alluvionale, ma anche per frane, grandine, fulminazioni, e vento; una prima ricostruzione di distribuzioni probabilistiche semplificate per gli eventi definiti in termini di serie storiche; la definizione di procedure informatiche per risalire, a partire dalla misura di pericolosità e altri fattori influenti, a valori di intensità utili a stimare l'impatto dei vari pericoli sulle strutture (ad esempio, per rischio sismico ed alluvionale, questi strumenti si basano su modelli di elevazione del territorio e identificano la presenza di creste e pendenze).

Una volta definita la misura di intensità, la valutazione della vulnerabilità richiede dapprima la conoscenza della tassonomia del costruito, per poter applicare i corretti modelli di vulnerabilità nelle analisi. Questo processo fa generalmente ricorso al recupero di informazioni molto povere da database pubblici (vedasi ISTAT, 2011, per l'edilizia residenziale), o al reperimento diretto di caratteristiche e parametri strutturali degli edifici mediante operazioni dispendiose. Per questo motivo, è stato sviluppato un tool per valutare, in maniera automatica e da remoto, e in modalità georeferenziata, l'esposizione al rischio per l'edilizia residenziale, in particolare in termini di tassonomia. Il tool si basa su tecniche di intelligenza artificiale e l'utilizzo di immagini satellitari e foto da *Street View* (Carpanese, 2023).

L'analisi di esposizione e vulnerabilità a larga scala è di primaria importanza non solo per il tessuto urbano residenziale, ma anche per le aree industriali, al fine di adottare misure per garantire i servizi essenziali e il mantenimento delle attività economiche in seguito ad eventi catastrofali (EU, 2022). Anche in questo ambito, si stanno sviluppando tool automatici per ricavare il maggior numero di informazioni sui siti industriali, sia per quanto riguarda le caratteristiche strutturali che per la tipologia di azienda e la sua attività produttiva.

Mentre per l'edilizia residenziale sono già stati sviluppati modelli di fragilità sismica aggiornati per il patrimonio nazionale (Dolce et al. 2021), i modelli di impatto relativi ad alluvioni violente sono in una fase preliminare di sviluppo. In particolare, il gruppo di ricerca sta lavorando alla definizione di un modello analitico per la valutazione della risposta fuori piano sia di pareti di muratura portante che di pareti di tamponamento, soggette ad azioni idrauliche. Questo modello si basa sullo sviluppo di un meccanismo resistente a doppio arco nello spessore della parete, e su una procedura iterativa con spostamento incrementale fuori piano. Il modello è applicabile a vari contesti, poiché permette di stimare l'impatto di diverse azioni laterali, con vari profili di spinta, su diverse tipologie di elementi strutturali, potendo parametrizzare i loro principali parametri geometrici e meccanici.

Ai fini della derivazione di funzioni di vulnerabilità per le successive valutazioni di rischio alluvionale, i modelli di capacità ottenuti tramite approccio analitico dovranno poi essere confrontati con profili di spinta realistici, che rappresentano la domanda. I modelli di domanda dovranno quindi essere correlati con i parametri di hazard individuabili a scala territoriale (Trigila et al., 2021).

Il contributo che il centro CRITICAL può offrire, tramite l'expertise multidisciplinare dei suoi componenti, sarà fondamentale per l'avanzamento dello studio, e per capitalizzare le diverse conoscenze nei campi delle geoscienze, dell'ingegneria strutturale, idraulica e geotecnica ai fini del miglioramento delle stime di rischio e la definizione di misure di mitigazione.



Figura 1: Danni strutturali da eventi sismici (Amatrice, 2016) e alluvionali (Derna, 2024)

References

Carpanese P. (2023), Seismic risk assessment at a territorial scale based on machine learning, PhD Thesis. Sup. Prof. F. da Porto. University of Padova.

Dolce M., Prota A., Borzi B., da Porto F., et al. (2021), Seismic risk assessment of residential buildings in Italy: methodology overview and main results. *Bull. Earthquake Eng.*, doi:10.1007/s10518-020-01009-519, pp. 2999-3032.

EU - European Parliament and Council of the European Union (2022), Directive 2022/2557 on the resilience of critical entities.

ICPD - Italian Civil Protection Department of the Presidency of the Council of Ministers (2018), National risk assessment - Overview of the potential major disasters in Italy: seismic, volcanic, tsunamis, hydrogeological/hydraulic and extreme weather, droughts and forest fire risks, pp. 1-137.

ISTAT (2011), 15° censimento della popolazione e delle abitazioni 2011.

Trigila A., Iadanza C., Lastoria B., Bussetini M., Barbano A. (2021) Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio - Edizione 2021. ISPRA, Rapporti 356/2021.

Eventi di progetto per la valutazione di inondazioni urbane in climi futuri: un nuovo approccio fisicamente basato

**Francesco Marra¹*, Marika Koukoulou², Antonio Canale³, Daniel B. Wright⁴,
Hayley J. Fowler⁵, João P. Leitão⁶, Ashish Sharma⁷, Nadav Peleg²**

¹Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova

²Institute of Earth Surface Dynamics, University of Lausanne, Switzerland

³Dipartimento di Scienze Statistiche, Università di Padova

⁴Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison, USA

⁵School of Engineering, Newcastle University, UK

⁶Department of Urban Water Management, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Dübendorf, Switzerland

⁷School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, Sydney, Australia

* Corresponding Author, e-mail: francesco.marra@unipd.it

Idrologi e ingegneri civili utilizzano spesso eventi di progetto per valutare il rischio di inondazione in bacini urbani, rurali e montani. Si tratta di rappresentazioni sintetiche di eventi di precipitazione in grado di riprodurre le statistiche delle precipitazioni estreme fornite dalle linee segnalatrici di probabilità pluviometrica (o curve intensità-durata-frequenza, IDF). Per costruire eventi di progetto futuri, è quindi necessario prima ricalcolare le curve IDF rappresentative di climi futuri.

In questo lavoro proponiamo un quadro innovativo per (a) adattare le curve IDF a climi futuri e (b) sviluppare eventi di progetto di durata breve rappresentativi di climi futuri. Il metodo si basa sul modello TENAX (Marra et al., 2024), un nuovo approccio statistico fisicamente basato in grado di fornire le future precipitazioni di progetto di durata breve sulla base dei cambiamenti previsti nelle temperature a scala giornaliera.

Il nostro approccio è illustrato per il caso di studio della città di Zurigo, Svizzera. Usando il modello TENAX calcoliamo variazioni future nelle curve IDF per durate comprese tra i 10 minuti e le 3 ore sulla base di proiezioni di temperatura ottenute da un ensemble di modelli climatici regionali (Figura 1). Costruiamo quindi eventi di progetto con tempo di ritorno di 100 anni usando il metodo "Chicago Design Storm". Generiamo infine mappe di inondazione urbana per i climi presenti e futuri e utilizzando il modello CAFlood.

I codici per adattare gli eventi di progetto ai cambiamenti climatici usando il modello TENAX-CDS sono resi disponibili da Marra and Peleg (2023) e da Peleg and Marra (2024).

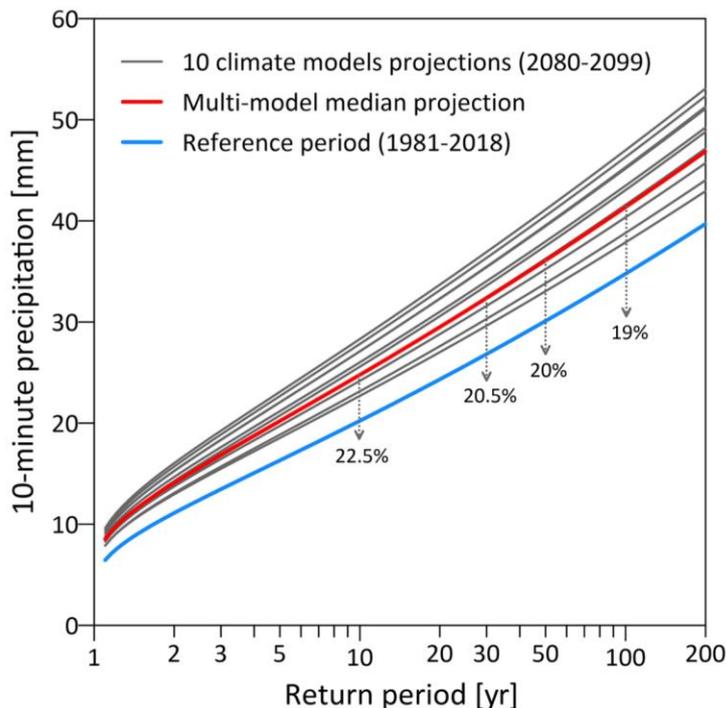


Figura 1: Linee segnalatrici di probabilità pluviometrica (IDF) per un durata di 10 minuti per la regione di Zurigo, Svizzera. In azzurro la curva di probabilità storica (1981-2018); in grigio le proiezioni future (2080-2099) ottenute tramite il modello TENAX sulla base di proiezioni di temperatura da 10 modelli climatici regionali; in rosso la mediana di ensemble (da Marra et al., 2024).

References

Marra, F., Peleg, N., 2023. TEMperature-dependent Non-Asymptotic statistical model for eXtreme return levels (TENAX). *Zenodo*, <https://doi.org/10.5281/zenodo.8345905>

Marra, F., Koukoulou, M., Canale, A., Peleg, N., 2024. Predicting extreme sub-hourly precipitation intensification based on temperature shifts, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 28, 375–389, <https://doi.org/10.5194/hess-28-375-2024>

Peleg, N., Marra, F., 2024. The TENAX-CDS model: a simple approach for adapting design storms to assess climate-induced changes in flash flood risk. *Zenodo*, <https://doi.org/10.5281/zenodo.10491542>

Le attività di ricerca del CIRGEO correlate allo studio degli impatti dei cambiamenti climatici

A. Masiero¹, F. Pirotti¹, A. Guarnieri^{1*}, A. Vettore¹

¹CIRGEO-Centro Interdipartimentale di Ricerca di Geomatica, Università di Padova.

* Corresponding Author, e-mail: alberto.guarnieri@unipd.it

Tra le molteplici attività di ricerca, il CIRGEO, Centro Intedipartimentale di Ricerca di Geomatica dell'Università di Padova, è anche coinvolto nello sviluppo di progetti nazionali e internazionali, di seguito descritti, che a vario titolo si occupano dello studio degli impatti dei cambiamenti climatici.

Nell'ambito del progetto H2020 FIRE-RES (ref. prof. Pirotti) il Centro ha contribuito alla realizzazione su scala europea di mappe raster (ca. 100 m lato pixel) di categorie legate alla pericolosità da incendio. Tali categorie sono fortemente correlate con fattori climatici in quanto dipendono, oltre che dalla quantità di materiale potenzialmente combustibile, anche dal contenuto di umidità del suolo e del bosco. Le categorie sono correlate anche ad indici di aridità come il *Drought Code*, che considera la distribuzione spaziale del contenuto idrico del suolo. FIRE-RES è un progetto quadriennale (2021-2025) che mira a promuovere l'implementazione di un approccio di gestione integrata degli incendi e sostenere la transizione verso paesaggi e comunità più resilienti agli eventi estremi in Europa.

Nel progetto PRIN 2023 GeoAir (*Geo-Intelligence for improved air quality monitoring and analysis*, ref. prof. Pirotti) vengono utilizzati metodi di *machine learning (stacked ensembles)* per stimare l'esposizione della popolazione a fattori di inquinamento dell'aria. Il dato satellitare fornisce una stima di concentrazione negli strati dell'atmosfera (*atmospheric column*) che, combinato con altri fattori ambientali, tra i quali anche quelli climatici, consente una più accurata definizione dell'esposizione nello strato dell'atmosfera più basso, ovvero quello con il quale si interfaccia l'apparato respiratorio. Il progetto GeoAir, condotto in collaborazione con il dipartimento di Biostatistica ed Epidemiologia (UBEP) dell'Università di Padova, il Politecnico di Milano ed il Politecnico delle Marche, si propone di utilizzare tecniche geomatiche e intelligenza artificiale *geo-based* per la modellazione della qualità dell'aria integrando dati di EO (Earth Observation) aperti con osservazioni provenienti da reti di monitoraggio della qualità dell'aria tradizionali e sensori IoT a basso costo.

A livello nazionale il CIRGEO partecipa al progetto PNRR MER (*Marine Ecosystem Restoration*, ref. prof. Guarnieri, prof. Vettore) promosso dal Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE), inerente alla mappatura su scala nazionale delle praterie di Posidonia oceanica e Cymodocea nodosa mediante rilievi lidar aerei, batimetrici e indagini geofisiche di completamento lungo tutte le coste italiane. Queste categorie di fanerogame marine contribuiscono alla costituzione delle foreste del mare che sono fondamentali per la mitigazione del cambiamento climatico tramite l'assorbimento di CO₂ e la produzione di ossigeno, la mitigazione dell'erosione

costiera, in quanto attenuano il movimento ondoso e riducono la quantità di sabbia portata via dal mare e per il mantenimento dello stato di salute dell'ecosistema marino. Attualmente, solo in Italia, oltre il 30% delle praterie sommerse e fino all'80% delle foreste algali è andato perduto e si stima che inquinamento, cambiamenti climatici, urbanizzazione delle coste, pesca a strascico e ancoraggio selvaggio determinino la perdita di un ulteriore 21% entro il 2050. L'obiettivo del progetto è quindi quello di costituire una base dati ad altissima risoluzione quale valido contributo al raggiungimento degli obiettivi del PNRR, nonché delle Direttive 2000/60/CE e della Direttiva Habitat, sia in termini di potenziamento del sistema di monitoraggio degli habitat marino costieri, degli ecosistemi lagunari, sia del loro ripristino ecologico.

Un'ulteriore attività di ricerca del Centro Cirgeo legata allo studio degli impatti dei cambiamenti climatici riguarda il monitoraggio multitemporale di frane attive attraverso l'analisi di immagini fotogrammetriche acquisite da UAV (ref. prof. Masiero). Il monitoraggio periodico delle frane è un fattore chiave per sostenere la realizzazione di sistemi di allerta e la riduzione dei rischi nelle aree circostanti. La fotogrammetria UAV è una metodologia emergente che garantisce una risoluzione spaziale maggiore rispetto al telerilevamento satellitare (benchè su aree di estensione minore) e una maggiore flessibilità ed economicità nella ripetizione periodica dei rilevamenti rispetto all'interferometria radar a terra, che sono fattori chiave per monitorare efficacemente una frana attiva, considerando la sua velocità. La soluzione adottata si basa sull'applicazione della tecnica DIC (*Digital Image Correlation*) a ortofotomosaici, generati da rilievi fotogrammetrici eseguiti con drone in epoche successive. Tale tecnica di elaborazione consente di quantificare gli spostamenti dei pixel tra due immagini digitali, massimizzando una funzione che esprime il grado di correlazione tra due finestre nelle immagini considerate. Il risultato dell'elaborazione è la produzione di una mappa delle deformazioni dell'area in frana. Il metodo è stato applicato ad una frana attiva che si estende su un'area di ca 0.9 km² situata nella valle del fiume Secchia nell'appennino emiliano, e caratterizzata da movimenti variabili tra 10 cm e 10 m al mese. La lunga serie di riattivazioni che hanno interessato nel tempo l'area in frana, hanno minacciato la sicurezza delle infrastrutture e delle persone nelle zone di coronamento e valle. Sono stati effettuati due voli, nel 2020 e 2021 rispettivamente con droni DJI Phantom 4 Pro e Matrice 300 RTK, da cui sono stati ricavati due ortomosaici con risoluzione spaziale di 5 cm. I risultati ottenuti, validati da misure GNSS al suolo su punti di riferimento, alcuni dei quali situati sul corpo frana, hanno evidenziato che la fotogrammetria da drone combinata con la tecnica DIC consente di monitorare spostamenti planimetrici con un'accuratezza di 10 cm, un valore ragionevole per frane che si muovono a velocità moderata. Sviluppi futuri riguarderanno l'applicazione del metodo proposto senza l'utilizzo di punti di controllo GNSS a terra per la triangolazione fotogrammetrica, ma basandosi direttamente sulle misure GNSS RTK dei ricevitori a bordo dei droni dotati di tale funzionalità.

Gli acquiferi dell'alta pianura veneta: una "fabbrica d'acqua" in difficoltà

G. Passadore^{1*}, L. Altissimo², A. Rinaldo^{1,3}

¹ Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università di Padova.

² Accademia Olimpica - già Direttore del Centro idrico di Novoledo (Vicenza)

³ Laboratory of Echohydrology (ECHO/IIE/ENAC), École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland

* Corresponding Author, e-mail: giulia.passadore@unipd.it

I sistemi acquiferi dell'alta pianura veneta, ricchi di acque di ottima qualità, verranno consegnati alle future generazioni danneggiati, sia dal punto di vista qualitativo (essendo state inquinati da composti chimici e non essendo più utilizzabili se non dopo costosi trattamenti) sia dal punto di vista quantitativo (essendo le falde sempre più in sofferenza). La pressione che abbiamo esercitato in passato e che continuiamo ad esercitare sulla risorsa idrica, oggi non è più sostenibile.

Gli studi commissionati agli scriventi, a partire dai primi anni 2000, dagli enti preposti alla gestione dell'acqua (Autorità d'Ambito - oggi Consiglio di Bacino, Consorzi di Bonifica e Regione del Veneto – Difesa del Suolo), hanno permesso di conoscere e comprendere il funzionamento del serbatoio idrico sotterraneo dell'alta pianura veneta, importantissima fonte di approvvigionamento d'acqua potabile ad uso sia pubblico che privato.

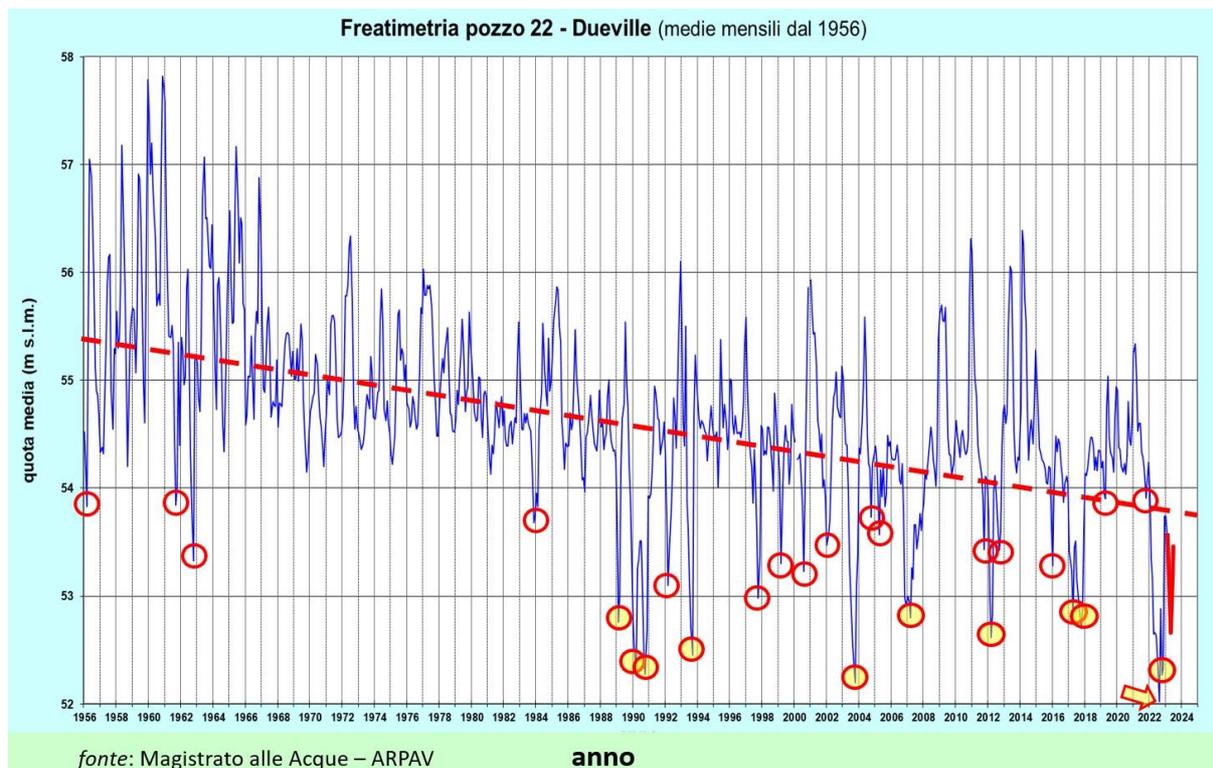


Figura 1: Livello freaticometrico del pozzo 22 di Dueville (1956 – 2023)

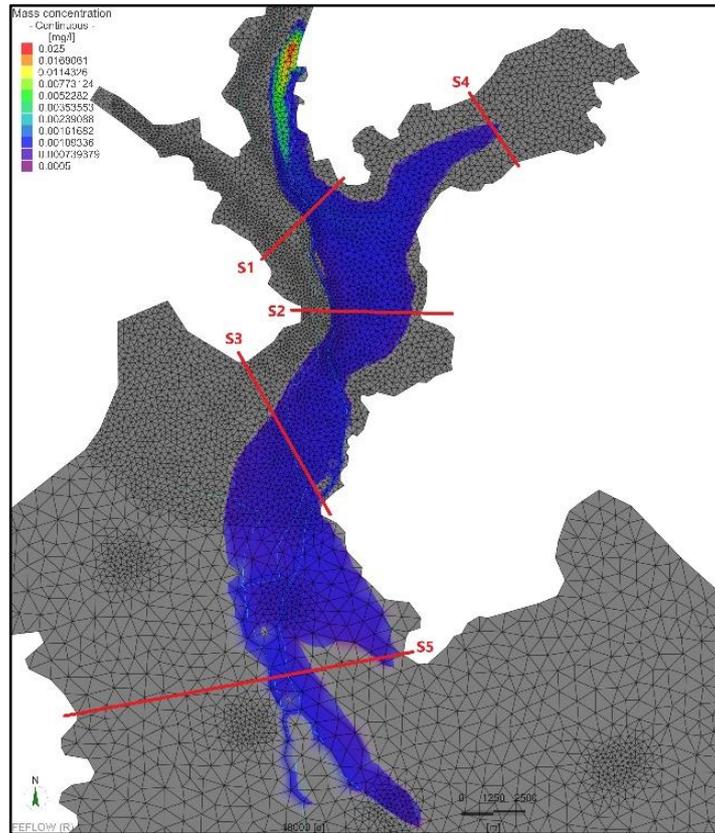


Figura 2: plume simulato inquinamento PFAS (a 50 anni da inizio inquinamento)

La modellazione matematica del flusso e del trasporto di massa ha permesso di stimare tutte le diverse componenti del bilancio idrologico su scala annuale e mensile, di ricostruire le direttrici principali della evoluzione spazio-temporale dei fenomeni di contaminazione oggetto di studio e di stimare gli impatti della variazione dei termini del bilancio, quali, ad esempio, minor apporto meteorico, realizzazione di interventi di ricarica artificiale, regolazione dei pozzi ad efflusso libero e dispersione dei bacini di laminazione delle piene. E' auspicabile che la risorsa idrica sotterranea, preziosa ma spesso dimenticata, venga costantemente monitorata sia quantitativamente che qualitativamente dagli Enti preposti: una tale preziosa attività non solo permetterebbe di intervenire tempestivamente in caso di anomalie osservate senza dover aspettare i tempi scala dello svilupparsi irreversibile del fenomeno di trasporto ma anche, soprattutto, consentirebbe di accrescere progressivamente nel tempo, in modo coerente e integrato, il database conoscitivo relativo ai serbatoi sotterranei, provvedendo continui aggiornamenti con nuove fotografie istantanee di diverse significative situazioni locali.

References

- Rinaldo, A., Passadore, G. (2021) Modelli matematici per la tutela e la gestione delle risorse idriche sotterranee nell'ambito del territorio del Consiglio di Bacino Bacchiglione, Centro di Idrologia "Dino Tonini" - Università degli Studi di Padova
Rinaldo, A., Passadore, G. (2022) Modello matematico degli impatti sugli assetti piezometrici nei sistemi acquiferi interessati dal bacino di Trissino (Vicenza), Centro di Idrologia "Dino Tonini" - Università degli Studi di Padova

*Evento inaugurale del Centro Studi sugli Impatti dei Cambiamenti Climatici
11 Aprile 2024, Rovigo*

Modellazione numerica di solidi porosi multifase con applicazione all'innescò di frane e alla frattura per essiccazione

**Lorenzo Sanavia^{1*}, Stefano Aretusini⁴, Matteo Camporese¹, Tuanny Cajuhi⁵,
Laura De Lorenzis², Giulio Di Toro³, Maria Lazari¹, Chenyi Luo, Chiara
Montorio, Bernhard Schrefler¹**

¹Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università di Padova.

²ETH Zurich.

³Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova

⁴INGV Roma.

⁵BGR Hannover.

* Corresponding Author, e-mail: lorenzo.sanavia@unipd.it

In questo lavoro si presentano le caratteristiche principali di modello idro-termo-meccanico implementato nel codice agli elementi finiti Comes-Geo per solidi porosi multifase in condizioni quasi-statiche o dinamiche e in non linearità per materiale (Lewis and Schrefler 1998; Sanavia, Pesavento, Schrefler 2006; Sanavia 2009; Sanavia, Cao 2015; Cao, Sanavia, Schrefler 2016). In tale modello i solidi porosi multifase si considerano costituiti da una matrice solida deformabile e vuoti interconnessi contenenti acqua liquida e una fase gassosa costituita da aria secca e vapore d'acqua. E' possibile il cambiamento di fase per l'acqua liquida in vapore e viceversa e si considerano gli accoppiamenti fra le fasi solida, liquida e gassosa.

Inoltre si illustrano i risultati numerici ottenuti simulando:

(I) l'innescò di una frana superficiale in un pendio sperimentale soggetto a una pioggia artificiale (Lora et al. 2016; Schenato et al. 2017; Lazari, Camporese, Sanavia, in preparazione), evidenziando la buona corrispondenza fra risultati numerici e misure sperimentali del contenuto d'acqua, della pressione dell'acqua, della portata di acqua in uscita dalla base del pendio e delle deformazioni. L'instabilità del pendio viene evidenziata utilizzando il criterio di Hill del lavoro del secondo ordine (Kakogiannou et al. 216);

(II) il comportamento idro-termo-meccanico di un prototipo numerico di frana catastrofica utilizzando i parametri di materiale delle argille del Vajont, evidenziando la possibilità di formazione di vapore d'acqua nella banda di taglio per alti livelli di deformazione e il possibile ruolo della dilatanza rilevata sperimentalmente (Ferri et al. 2011) nell'innescò del vapore;

(III) la formazione e propagazione di fratture in argille sature soggette a essiccazione. In questa simulazione la frattura viene modellata con l'approccio variazionale Phase-field applicata al modello di mezzo poroso variabilmente saturo (Cajuhi, Sanavia, De Lorenzis 2018; Luo, Sanavia, De Lorenzis 2023) derivato da quello implementato in

Comes-Geo ipotizzando condizioni isoterme e la fase gassosa a pressione atmosferica costante.

References

Cajuhi T., Sanavia L., De Lorenzis L. (2018) Phase-field modeling of fracture in variably saturated porous media. *Computational Mechanics* 61(3): 299-318. <https://doi.org/10.1007/s00466-017-1459-3>

Cao, T. D., Sanavia, L., and Schrefler, B. A. (2016) A thermo-hydro-mechanical model for multiphase geomaterials in dynamics with application to strain localization simulation. *Int. J. Numer. Meth. Engng*, 107: 312–337. <https://doi.org/10.1002/nme.5175>

Chenyi Luo, Lorenzo Sanavia, Laura De Lorenzis (2023) Phase-field modeling of drying-induced cracks: choice of coupling and study of homogeneous and localized damage. *Comput. Methods Appl. Mech. Engng.*410, 115962, <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.115962>

Ferri, F., G. Di Toro et al. (2011), Low - to high - velocity frictional properties of the clay - rich gouges from the slipping zone of the 1963 Vaiont slide, northern Italy, *J. Geophys. Res.*, 116, B09208, <https://doi.org/10.1029/2011JB008338>

Kakogiannou E., L. Sanavia, F. Nicot, F. Darve, B.A. Schrefler (2016) A porous media finite element approach for soil instability including the second-order work criterion. *Acta Geotechnica* 11(4): 805-825. <https://doi.org/10.1007/s11440-016-0473-5>

Lazari, Camporese, Sanavia (in preparazione) Hydro-mechanical modelling of a rainfall-induced failure in an experimental hillslope.

Lewis, R.W. and Schrefler, B.A. *The Finite Element Method in the Static and Dynamic Deformation and Consolidation of Porous Media*. John Wiley, New York (1998)

Lora, M., Camporese, M., Troch, P. A. and Salandin, P. Rainfall-triggered shallow landslides: infiltration dynamics in a physical hillslope model. *Hydrological Processes* 30, 3239–3251 (2016). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12610-1>

Sanavia L. (2009) Numerical Modelling of a Slope Stability Test by Means of Porous Media Mechanics, *Engineering Computations*, 26(3), 245-266. <https://doi.org/10.1108/02644400910943608>

Sanavia L., Cao T.D. (2015) Finite element analysis of non-isothermal multiphase porous media in dynamics. In: *Alert Doctoral School 2015: Coupled and multiphysics phenomena*, B.A. Schrefler, L. Sanavia, F. Collin (Eds.), Alert Geomaterials INPG-3SR, Grenoble, France, 2015. ISBN: 978-2-9542517-6-9. Pp. 243-258. http://alertgeomaterials.eu/data/school/2015/2015_ALERT_schoolbook.pdf

Sanavia L., F. Pesavento, B.A. Schrefler (2006) Finite element analysis of non-isothermal multiphase geomaterials with application to strain localisation simulation, *Computational Mechanics*, 37, 331-348. <https://doi.org/10.1007/s00466-005-0673-6>.

Schenato, L., Palmieri, L., Camporese, M. et al. Distributed optical fibre sensing for early detection of shallow landslides triggering. *Sci Rep* 7, 14686 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12610-1>

HORIZON EUROPE PROJECT “Cross-sectoral Framework for Socio-Economic Resilience to Climate Change and Extreme Events in Europe (CROSSEU)”

Mara Thiene^{1*}, Marco Borga¹, Cristiano Franceschinis¹

¹Dipartimento di Territorio e Sistemi Agro Forestali, Università di Padova.

*Corresponding Author, e-mail: mara.thiene@unipd.it

The Horizon Europe project CROSSEU aims at responding to the increasing societal needs to reduce climate-damaging actions, adapt to the expected consequences, and increase socio-economic resilience. The project's goal is to deliver a climate-sensitive framework, including a ready-to-use decision support system platform and technical recommendations, to inform investment decisions, cost-effective adaptation, and mitigation options, as well as policy responses to climate change.

The project will contribute to advancing the understanding of the socio-economic risks and response options associated with climate change impact in Europe in different timeframes. It aims to derive practical recommendations for political and societal action. The solutions proposed are based on an extensive assessment of the socio-economic risks of climate change in a cross-sectoral hierarchical approach.

This approach is based on storylines addressing key categories of climate hazards in different socio-economic sectors and climate change-sensitive areas across countries and European regions. The project will offer a ready-to-use solution that integrates complex information from available climate risk datasets and non-climatic sectoral data collected during the project implementation. This information is derived through modelling based on demand-driven climate-socio-economic pathways.

CROSSEU is designed to bridge the science-based information about the economic impacts of climate change. The unique contributions of the project include:

1. The quantification of costs of existent and emergent socio-economic risks and opportunities at NUTS3 level.
2. An improved representation of adaptation within biogeophysical climate change risk.
3. A better consideration of modeling uncertainties by identifying their nature, assessing their characteristics in a systematic way to determine better-informed and robust decision-making.

The UNIPD team will be mainly involved in the project case study “Valuation of social benefits of floods and flash floods adaptation and mitigation in Northeastern Italy”, which has the following objectives:

1. To assess the magnitude and frequency of current and future impacts, and their plausibility.
2. To identify effective mitigation and adaptation strategies for relevant policy fields under a range of impact scenarios.
3. To monetize the benefits that mitigation and adaptation strategies could provide to society in alternative impact scenarios.
4. To explore how the social benefits of mitigation and adaptation strategies vary across different shares of the population.

Concerning the methodology for the case study, firstly, we will run hydro-climatic and impact models based on results from Earth System Models (ESMs) of the Coupled Model Intercomparison Project v6 (CMIP6) under WCRP. These models represent the state of the art in climate modeling and will be adopted for the investigation at large scales. High-resolution models will extend the analysis at NUTS3 scale, including the high-resolution HighResMIP CMIP6 ESMs and the CORDEX regional dynamical downscaling. Results from the implementation of the model-chain will be used to derive a range of impact scenarios and alternative mitigation and adaptation strategies within the broader policy context.

Secondly, a Choice Experiment (CE) will address a large and representative sample of citizens (at least 2,000). The CE will be embedded in a survey administered via the web, also collecting additional information about respondents (attitudinal traits, socio-demographics). The econometric analysis (choice modeling) of collected data will allow us to estimate the total economic value (expressed in terms of willingness to pay) of the social benefits of the above alternative mitigation and adaptation strategies under different future impact scenarios. Tailored models (Latent class models) will be employed to assess how such benefits vary across different shares of the population (e.g., gender dimension).

Analisi della risalita del cuneo salino nel Delta del Po: Implicazioni sull'agricoltura costiera

Aurora Ghirardelli¹, Eugenio Straffelini¹, Rodolfo Laurenti², Vincenzo D'Agostino, Paolo Tarolli^{1*}

¹Dipartimento di Territorio e Sistemi Agro Forestali, Università di Padova.

²Consorzio di Bonifica Delta del Po

* Corresponding Author, e-mail: paolo.tarolli@unipd.it

La vulnerabilità ai cambiamenti climatici dell'area agricola del Delta del Po, con terreni al di sotto del livello del mare e drenati artificialmente, ha reso la risalita del cuneo salino un fenomeno sempre più impattante sulla disponibilità di risorse irrigue. In annate con periodi prolungati di siccità come il 2022, la risalita si è spinta oltre 40 km dalla costa, mettendo a repentaglio l'intero comparto agricolo della zona (Tarolli et al., 2023). L'intrusione del cuneo salino è infatti il principale fattore responsabile della salinizzazione dei suoli, a cui conseguono alterazione della struttura, perdita di fertilità, danni alle colture, e, nei casi più critici, fenomeni di micro-desertificazione (Ghirardelli et al., 2024; Tarolli et al., 2023). Per rispondere all'esigenza di monitorare l'impatto della risalita del cuneo salino sulle colture, nel 2022 il Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali ha avviato un progetto di ricerca finanziato dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza Agritech (Spoke 4 – WP 4.2 – Task 4.2.2), in collaborazione con il Consorzio di Bonifica Delta del Po. A tale scopo, sono state impiegate tecniche di *remote sensing* multi-temporale da immagini satellitari e da droni per lo studio dello stress delle colture, utilizzando algoritmi di *machine-learning* per differenziare tra terreni coltivati e suolo nudo. Ad esse sono state integrate osservazioni *in-situ* di temperatura, umidità e conduttività elettrica del suolo (EC) con indagini a scala locale. Le analisi dell'evento di intrusione salina dell'estate 2006, il primo per il quale sono state effettuate misurazioni sistematiche di salinità dell'acqua lungo i dami del Delta, mostrano una significativa correlazione negativa tra la salinità e il *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), indicando che le colture dell'area di studio sono state influenzate dall'intrusione del cuneo salino (Luo et al., 2023; Tarolli and Straffelini, 2024). Anche in condizioni di assenza di eventi di siccità prolungata, come l'estate 2023, l'analisi dell'NDVI delle colture ha permesso di evidenziare un incremento dello stress della vegetazione in prossimità della costa, riconducibile all'intrusione del cuneo salino (**Figura 1**). Le fluttuazioni dei valori di EC e umidità dei suoli durante l'estate suggeriscono che l'alta EC iniziale sia dovuta a un ristagno superficiale di acqua con concentrazioni elevate di sali, che in seguito ai forti tassi di evapotraspirazione di agosto si sono depositati nello strato superficiale del suolo in quantità ancora maggiori (Tarolli e Ghirardelli, 2023). In virtù dell'imprevedibilità di frequenza e intensità dei periodi siccitosi, gli obiettivi futuri saranno l'individuazione degli *hotspot* di salinizzazione nelle aree agricole del Delta, lo sviluppo di indicazioni operative di supporto agli agricoltori per l'adattamento e mitigazione del rischio (Tarolli et al., 2024), e la raccolta di linee-guida per i decisori politici territoriali in merito alle scelte colturali e pratiche agronomiche.

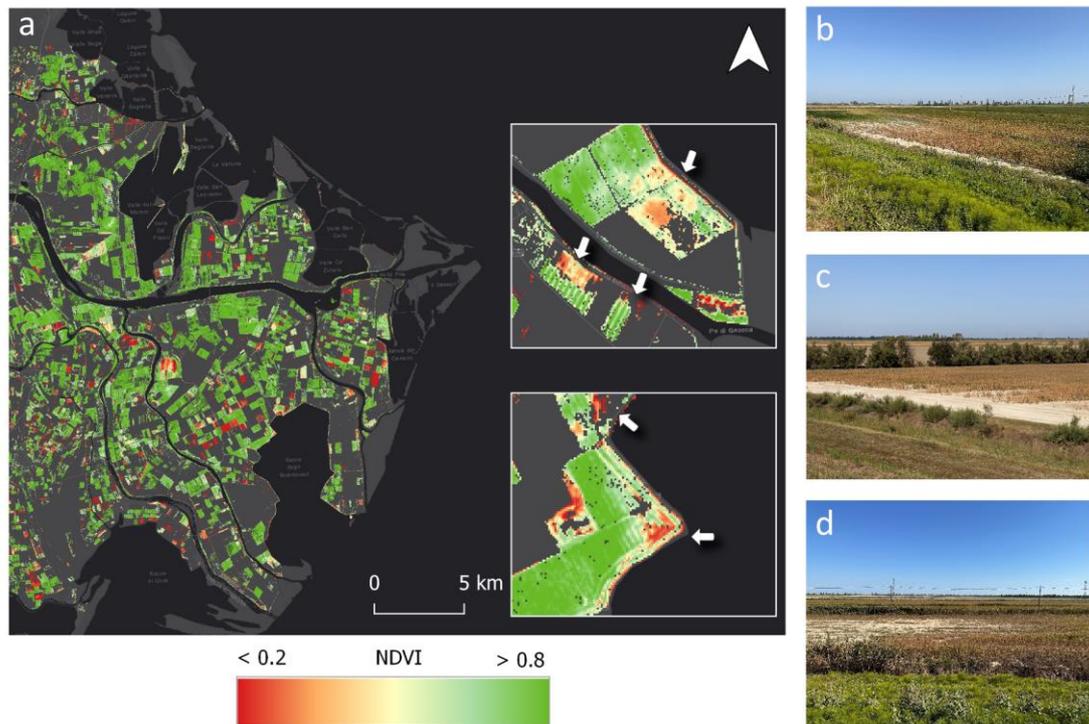


Figura 1: (a) Valori di NDVI nei campi agricoli del Delta del Po elaborati da Sentinel-2 per luglio 2023. (b), (c) e (d) Danni visibili sulle colture. Fotografie di Vincenzo Baldan e Aurora Ghirardelli.

References

- Ghirardelli, A., Tarolli, P., Laurenti, R. (2024). Monitoraggio del cuneo salino in aree agricole costiere. *L'Informatore Agrario* 12. 38–41.
- Luo, J., Straffelini, E., Bozzolan, M., Zheng, Z., Tarolli, P. (2023). Saltwater intrusion in the Po River Delta (Italy) during drought conditions: Analyzing its Spatio-temporal evolution and potential impact on agriculture. *Int. Soil Water Conserv. Res.* In press.
- Tarolli, P., Ghirardelli, A. (2023). Salinizzazione e minacce per L'agricoltura. *Ecoscienza - Riv. di Arpa, Agenzia Regionale dell'Emilia-Romagna* 29–31.
- Tarolli, P., Luo, J., Park, E., Barcaccia, G., Masin, R. (2024). Soil salinization in agriculture: Mitigation and adaptation strategies combining nature-based solutions and bioengineering. *iScience* 27, 108830.
- Tarolli, P., Luo, J., Straffelini, E., Liou, Y.-A., Nguyen, K.-A., Laurenti, R., Masin, R., D'Agostino, V. (2023). Saltwater intrusion and climate change impact on coastal agriculture. *PLOS Water* 2, e0000121.
- Tarolli, P., Straffelini, E. (2024). Sensori remoti per quantificare l'impatto del cuneo salino. *L'Informatore Agrario* 2. 71–74.
- Tarolli, P. (2024). App, sensori e intelligenza artificiale anti-siccità. Un progetto per tutelare gli agricoltori del Delta del Po. *Startup Italia*. <https://startupitalia.eu/impact/app-sensori-e-intelligenza-artificiale-anti-siccita-un-progetto-per-tutelare-gli-agricoltori-del-delta-del-po/>

Integrazione di dati GNSS e InSAR per il monitoraggio della subsidenza nell'area del delta del Po

**Massimo Fabris^{1*}, Mario Floris², Andrea Menin¹, Michele Monego¹,
Guido Selvi³, Umberto Trivelloni⁴**

¹Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università di Padova.

²Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova.

³Genio Civile di Rovigo, Regione del Veneto.

⁴Direzione Pianificazione Territoriale, Regione del Veneto.

* Corresponding Author, e-mail: massimo.fabris@unipd.it

L'area del delta del Po è soggetta a fenomeni di subsidenza causati da fattori naturali e antropici. Mentre nel passato il fenomeno è stato misurato, studiato e monitorato utilizzando quasi esclusivamente dati di livellazione geometrica ripetuti nel tempo, oggi la disponibilità di sensori spaziali, ad alta risoluzione e precisione, permette l'integrazione dei dati a terra con quelli satellitari (Fabris, 2021).

In questo lavoro la stima dei valori di subsidenza recente è stata effettuata integrando dati GNSS misurati a terra con quelli InSAR derivanti dai satelliti Sentinel-1 (relativi al periodo dal 1 ottobre 2016 al 27 dicembre 2020) e COSMO-SkyMed (CSK) (per il periodo dal 25 maggio 2017 al 5 agosto 2020) per superare i limiti di risoluzione, precisione e copertura spaziale caratteristici di ciascuna metodologia e fornire un sistema di monitoraggio completo dell'area di studio. I dati a terra consistono in rilievi GNSS multi-temporali della rete PODELNET (PO DELta NETwork): si tratta di un'infrastruttura costituita da 46 punti (Non-Permanent Sites – NPS) e dalle 3 stazioni permanenti (Continuous GNSS – CGNSS) di Taglio di Po (TGPO), Porto Tolle (PTO1) e Codigoro (CODI). La rete, sviluppata nel 2016 in collaborazione con l'Istituto Geografico Militare Italiano (IGMI) e la Regione del Veneto, viene misurata con cadenza biennale (nello specifico, nel 2016, 2018, 2020 e 2022) e copre uniformemente l'area del delta del Po, sia delle porzioni urbanizzate che di quelle rurali. Ogni rilievo è stato eseguito nelle stesse condizioni per evitare di introdurre deformazioni stagionali o derivanti da procedure di acquisizione ed elaborazione dati nelle velocità finali di deformazione (sono stati effettuati stazionamenti statici di 3 ore per ogni vertice). Per ogni rilievo sono state calcolate le coordinate di ogni punto e successivamente confrontate per ottenere spostamenti e velocità (Cenni et al., 2021). I dati InSAR e GNSS sono stati quindi confrontati (proiettando le velocità GNSS lungo la LOS – Line Of Sight) per la calibrazione, la validazione e la successiva integrazione. Nella prima fase i dati InSAR sono stati confrontati in corrispondenza delle 3 stazioni CGNSS per calibrare i dati interferometrici e valutare l'ordine di grandezza delle precisioni. Successivamente i dati InSAR calibrati sono stati confrontati con i dati GNSS delle stazioni NPS per la loro validazione (nelle aree urbanizzate). Infine, dopo la calibrazione e la validazione, i dati sono stati integrati per fornire un sistema di monitoraggio completo dell'area del delta del Po, sia nelle aree urbanizzate che in quelle rurali (Fabris et al., 2022).

I risultati hanno fornito mappe di subsidenza, sia per i dati InSAR Sentinel-1 (Figura 1) che CSK, evidenziando velocità crescenti da ovest verso est, con valori massimi nell'ordine di 1 cm/anno.

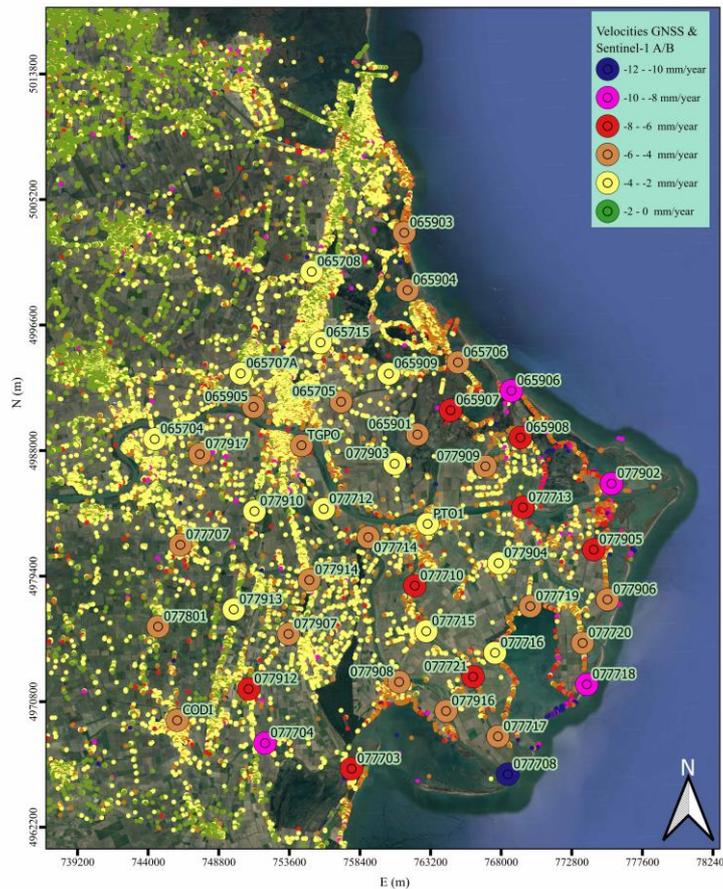


Figura 1: Velocità di deformazione lungo la LOS dei dati InSAR Sentinel-1 integrati con quelli GNSS della rete PODELNET.

Attualmente l'attività sta proseguendo analizzando i dati InSAR forniti dall'European Ground Motion Service (EGMS) e quelli provenienti dalla Regione del Veneto. Successivamente queste osservazioni verranno integrate con nuovi dati di livellazione geometrica, disponibili in seguito ai rilievi effettuati nel 2023 che hanno permesso di estendere e densificare le reti storiche IGMI. L'integrazione di tutti i dataset permetterà di migliorare le informazioni e analizzare più nel dettaglio le velocità di abbassamento degli argini di difesa, di cruciale importanza per un'area in gran parte al di sotto del livello medio del mare e con rischi crescenti a causa dall'aumento del livello dei mari provocato dai cambiamenti climatici.

References

Fabris, M. (2021), Monitoring the Coastal Changes of the Po River Delta (Northern Italy) since 1911 Using Archival Cartography, Multi-Temporal Aerial Photogrammetry and LiDAR Data: Implications for Coastline Changes in 2100 A.D., *Remote Sensing*, 13, 529, <https://doi.org/10.3390/rs13030529>.

*Evento inaugurale del Centro Studi sugli Impatti dei Cambiamenti Climatici
11 Aprile 2024, Rovigo*

Cenni, N., S. Fiaschi, M. Fabris (2021), Monitoring of Land Subsidence in the Po River Delta (Northern Italy) Using Geodetic Networks, *Remote Sensing*, 13, 1488, <https://doi.org/10.3390/rs13081488>.

Fabris, M., M. Battaglia, X. Chen, A. Menin, M. Monego, M. Floris (2022), An Integrated InSAR and GNSS Approach to Monitor Land Subsidence in the Po River Delta (Italy), *Remote Sensing*, 14, 5578, <https://doi.org/10.3390/rs14215578>.

Ensuring resilience of the Po River Delta to rising relative sea levels using nature-based solutions for building land and mitigating subsidence (NatResPoND)

**Alvise Finotello^{1*}, Valentina Marzia Rossi², Luca Carniello³, Matteo Mantovani⁴,
Daniele Viero³, Luca Zaggia²**

¹Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova.

²Istituto di Geoscienze e Georisorse, Consiglio Nazionale delle Ricerche

³Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università di Padova.

⁴Istituto di ricerca per la protezione idrogeologica, Consiglio Nazionale delle Ricerche

* Corresponding Author, e-mail: alvise.finotello@unipd.it

Continued increases in climate extremes, population growth, and human-induced subsidence pose a serious threat to the sustainability of many of the World's river deltas. It is becoming increasingly clear how hard engineering measures (e.g., dams, dikes, and levees) are unsustainable and likely to reduce deltaic ecosystems resilience in the long run. Thus, a paradigm change in river delta management is underway, from hard infrastructures to new approaches designed to “work with the river”, using “nature-based” solutions to restore and re-create deltaic lands (Temmerman et al., 2013; Temmerman & Kirwan, 2015; Tessler et al., 2015). The NatResPoND research project, funded by the European Union – NextGenEU through the Prin 2022 PNRR call, aims to test the feasibility of nature-based solutions to increase the resilience of the Po River Delta (PRD) - the main deltaic system in Italy and one of the most important worldwide - to relative sea-level rise, ultimately mitigating long-term flood and storm-surge risks and ensuring the sustainability of communities on the delta. Emphasis will be placed on quantifying the inherent ability of the delta system to create new land and contribute to the accretion of existing soils by depositing river-borne sediments, as testified by a newly emerged crevasse-splay system that has recently formed in a previously embanked area that is now completely flooded due to soil subsidence.

The project goals will be achieved through a multidisciplinary approach involving sedimentological analyses, remote sensing, and numerical modeling. Through sedimentological and remote sensing analyses, the potential land-building rates will be estimated. The information gained from the field will be used to inform and calibrate an ad hoc hydro-morphodynamic numerical model. Once calibrated, the model will be applied to the entire PRD and used to test the feasibility of reducing PRD vulnerability by creating controlled sediment diversions and moving channel embankments to promote active sedimentation and counteract coupled soil subsidence and eustatic sea level rise.

NatResPoND will aim at providing the first step necessary to develop nature-based solutions to restore and preserve the PRD and move closer to designing sediment diversions for land restoration in the face of accelerating relative sea-level rise (i.e., the sum of eustatic sea level rise and soil subsidence) and anthropogenically-reduced water and sediment supply. Given the limited duration of the project (2 years), NatResPoND will only aim at testing the feasibility of such deltaic restorations, through an estimation of the natural building capacity of a test system, but future studies and

monitoring will be needed to assess how the reintroduction of fresh water and sediment impacts the ecosystem, including important fish and wildlife species, and the communities that live and work in the delta. The ultimate goal of the project is thus to provide a preliminary assessment of the feasibility of cost-effective, nature- and ecosystem-based engineering solutions to ensure the resilience of the entire PRD, as opposed to hard-engineering approaches so far adopted, which have critically undermined the delta morphodynamics and will become increasingly unsustainable. The results will improve our knowledge of the resilience of natural systems and offer critical insights into future management strategies for the Po River Delta and similar coastal areas.

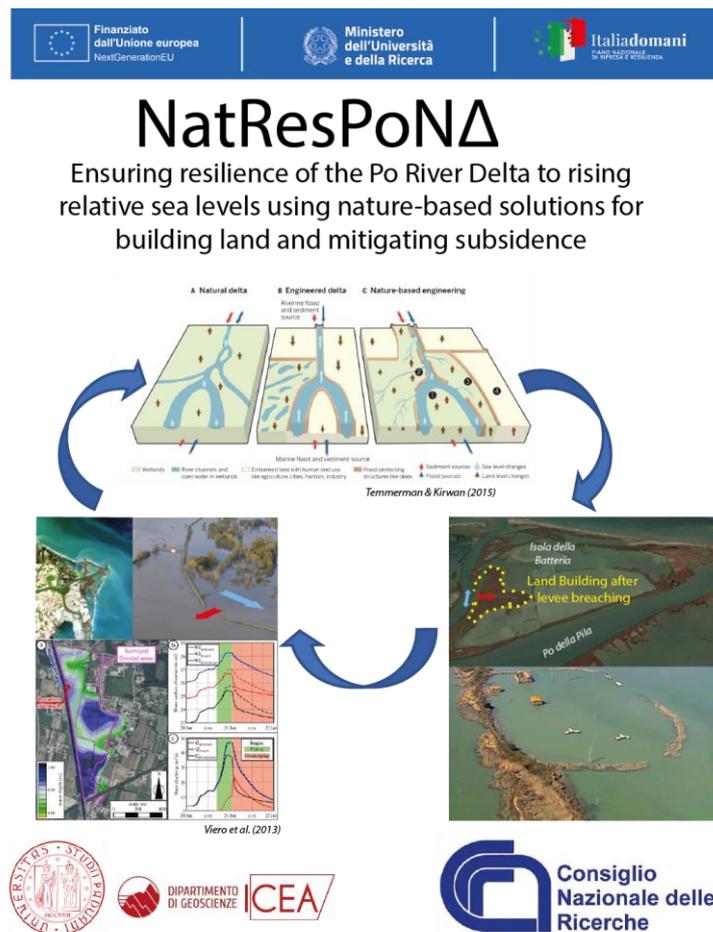


Figura 1: Conceptual sketch of the NatResPoND project.

References

- Temmerman, S., & Kirwan, M. L. (2015). Building land with a rising sea. *Science*, 349(6248), 588–589. <https://doi.org/10.1126/science.aac8312>
- Temmerman, S., Meire, P., Bouma, T. J., Herman, P. M. J., Ysebaert, T., & De Vriend, H. J. (2013). Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. *Nature*, 504(7478), 79–83. <https://doi.org/10.1038/nature12859>
- Tessler, Z. D., Vörösmarty, C. J., Grossberg, M., Gladkova, I., Aizenman, H., Syvitski, J. P. M., & Fofoula-Georgiou, E. (2015). Profiling risk and sustainability in coastal deltas of the world. *Science*, 349(6248), 638–643. <https://doi.org/10.1126/science.aab3574>