

# STUDIO E GESTIONE DEL CUNEO SALINO

## Effetti sugli ecosistemi del delta del Po, monitoraggio e modellistica

La risalita dell'acqua marina dalla foce nei tratti del fiume Po è un fenomeno naturale che però negli ultimi anni ha accentuato la sua frequenza e profondità: l'ingressione del cuneo salino è arrivata a 40 km dal mare nel 2022 e a 17 nel 2023. Un rischio per i delicati ecosistemi lungo la costa, ma anche per le diverse attività agricole, zootecniche e industriali, oltre che per l'approvvigionamento acquedottistico.

I problemi connessi alla presenza di sali, sia nelle acque superficiali per l'irrigazione e nelle falde sia nei terreni, accompagnano da sempre la gestione delle aree deltizie, ma la diminuzione delle precipitazioni nell'ultimo trentennio, soprattutto tra marzo e settembre, e l'aumento della temperatura media rendono sempre più necessario e urgente conservare e ripartire con intelligenza la risorsa idrica, la cui richiesta è in costante aumento.

Nel servizio facciamo il punto su come sta cambiando il sistema lagunare del Po, sulle attività di gestione dell'acqua, sul monitoraggio della salinizzazione e sull'uso di strumenti di modellistica, innovativi e ad altissima risoluzione, alla base delle previsioni e delle soluzioni per fronteggiare i problemi che stanno emergendo. Tra cambiamenti climatici, nuove esigenze socio-economiche e modelli di *governance* si svilupperà anche il nuovo Piano di tutela delle acque della Regione Emilia-Romagna, la cui elaborazione ha preso avvio nel corso del 2023.

Diversi contributi sono il frutto del confronto che si è svolto nell'ottobre 2023 a Goro (FE) nella sede della Struttura oceanografica Daphne di Arpa, nel corso del seminario "Cuneo salino nel delta del Po, stato attuale e prospettive".  
(BG)

# DIMINUISCE LA DISPONIBILITÀ IDRICA NEL DISTRETTO DEL PO

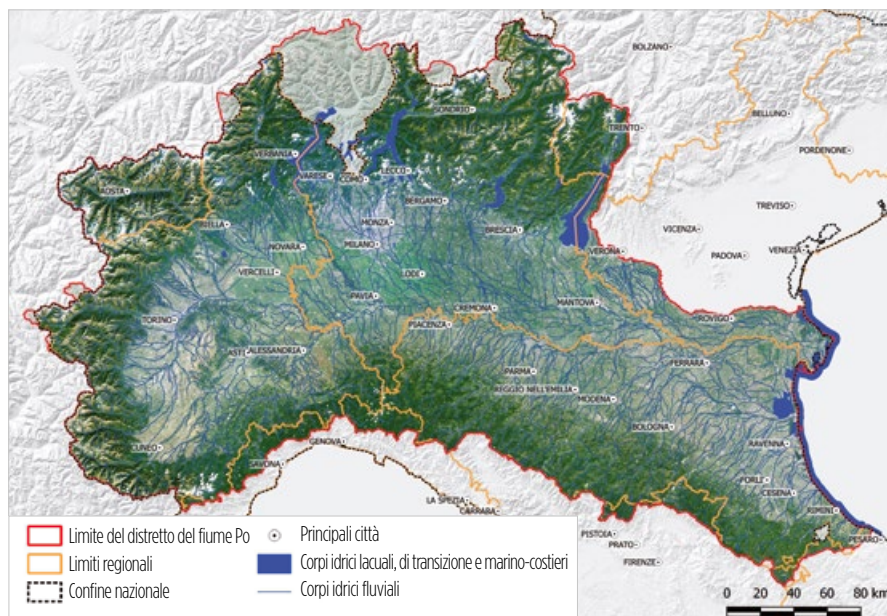
LA DIMINUZIONE DELLE PRECIPITAZIONI NELL'ULTIMO TRENTENNIO, SOPRATTUTTO TRA MARZO E SETTEMBRE, E L'AUMENTO DELLA TEMPERATURA MEDIA COMPORTANO UN AUMENTO DELLA RICHIESTA D'ACQUA IN ALCUNI SETTORI, IN PARTICOLARE QUELLO AGRICOLO. SI DEVE CERCARE UNA SOLUZIONE CHE PREVEDA RIFORME STRUTTURALI E INVESTIMENTI.



CUNEO SALINO

Il distretto del fiume Po, estendendosi per circa 87.000 km<sup>2</sup>, è l'area del territorio italiano con la maggiore eterogeneità climatica. In ragione delle sue nove fasce climatiche differenti (figura 2), il distretto presenta una pronunciata variabilità meteorologica dove l'intensità, la distribuzione, la frequenza e la durata degli eventi estremi hanno da sempre caratterizzato fortemente il territorio. L'ultima relazione di valutazione del Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico (Ipc) include il Distretto del fiume Po nella fascia climatica compresa tra il Mediterraneo e il Nord Europa, una zona di transizione della variazione di piovosità, caratterizzata da un alto grado di indeterminazione previsionale che genera incertezza sugli sviluppi futuri del clima, in particolare sulla distribuzione delle precipitazioni, anche nevose, e sulla frequenza con cui potranno presentarsi periodi siccitosi e temperature superiori alla media storica

Non a caso, quindi, sebbene il distretto del fiume Po sia sempre stato caratterizzato da una marcata variabilità meteorologica e idrologica inter-annuale, nell'ultimo trentennio questa variabilità si è fortemente accentuata. A partire dal 2000, infatti, ci sono stati ben sette anni in cui il bilancio idroclimatico



(ovvero la differenza tra precipitazioni ed evapotraspirazione) del distretto è risultato fortemente negativo con un aumento dell'intensità dei singoli eventi piovosi ma una riduzione complessiva del numero di eventi totali. Andando ad analizzare i dati disponibili, è possibile osservare che la precipitazione

media annuale nel distretto, riferita al periodo 1991-2020 (trentennio climatico di riferimento), ha raggiunto un valore medio di circa 995 millimetri, alla quale corrisponde un volume annuale medio di afflusso idrico pari a circa 86 miliardi di metri cubi di cui circa 47 miliardi si trasformano in deflussi superficiali mentre

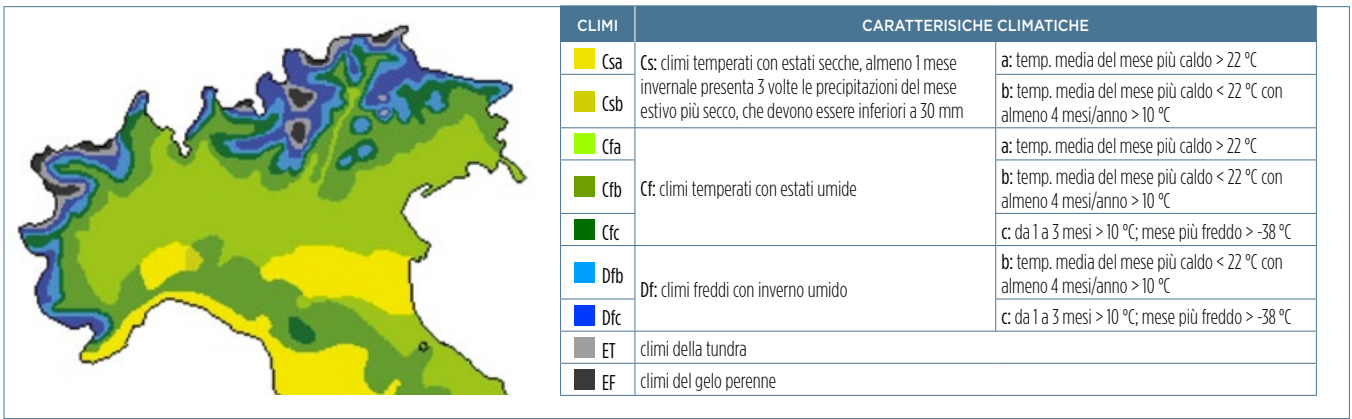


FIG. 2 FASCE CLIMATICHE  
Carta del clima italiano secondo il sistema di Wladimir Köppen, che evidenzia le nove fasce climatiche del distretto del Po.

i restanti 39 miliardi sono ascrivibili a infiltrazione, evapotraspirazione e utilizzi. Sempre nel periodo di riferimento 1991-2020, l'anno più umido è risultato essere il 2014, con una precipitazione media annuale di circa 1.389 mm e un afflusso meteorico complessivo di circa 121 miliardi di m<sup>3</sup>, mentre l'anno più siccitoso è risultato essere il 2017, con una precipitazione media annuale di 735 mm e un afflusso meteorico complessivo di circa 64 miliardi di m<sup>3</sup>. Il record negativo detenuto dal 2017 è stato superato dal più recente 2022, che ha registrato una precipitazione media annuale di soli 644 mm con un afflusso meteorico complessivo di 56 miliardi di m<sup>3</sup> (figura 3). Infatti, se al periodo di riferimento 1991-2020 si aggiungono anche gli anni 2021 e 2022 e si vanno ad analizzare nel dettaglio gli andamenti degli afflussi e dei deflussi, emerge chiaramente una leggera flessione degli afflussi (7%) e una flessione più consistente dei deflussi (28%) (figura 4). In valore assoluto, la riduzione dei deflussi annuali complessivi a scala di distretto ammonta a circa 280 milioni di m<sup>3</sup> all'anno pari a circa 8,2 miliardi di m<sup>3</sup> nel trentennio di riferimento. Restringendo l'analisi al solo periodo irriguo, quindi al periodo che va da marzo a settembre, oltre alla normale variabilità inter-annuale, si può osservare come l'ultimo trentennio sia stato caratterizzato da un ancor più marcata variabilità intra-annuale dei volumi di precipitazione osservati, sebbene nell'arco dello stesso anno non vi sia corrispondenza diretta tra i volumi di pioggia complessivi e quelli osservati nel periodo irriguo (anni particolarmente piovosi hanno registrato accumuli pluviometrici nel periodo irriguo poco significativi prossimi o anche inferiori a valori tipici del periodo mentre, anni particolarmente "asciutti", come il 2005, il 2006 e il 2007, hanno registrato accumuli di pioggia annuali prossimi ai

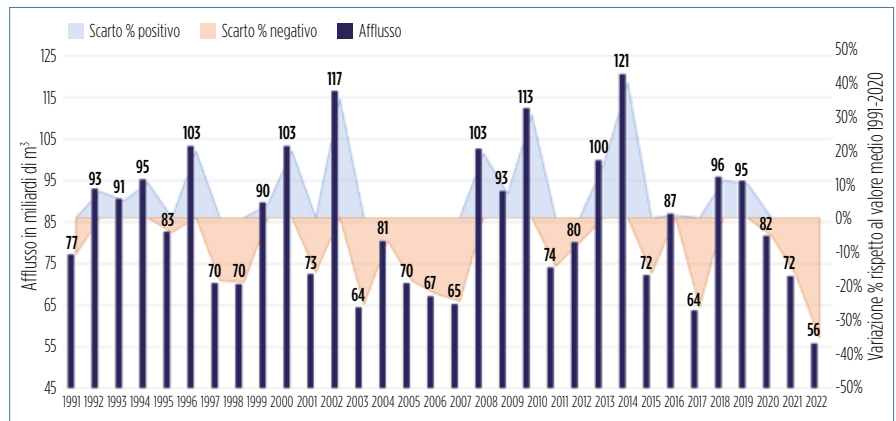


FIG. 3 AFFLUSSI METEORICI  
Andamento degli afflussi meteorici nel distretto del fiume Po nel periodo 1991-2022. Il record negativo detenuto dal 2017 è stato superato dal più recente 2022.

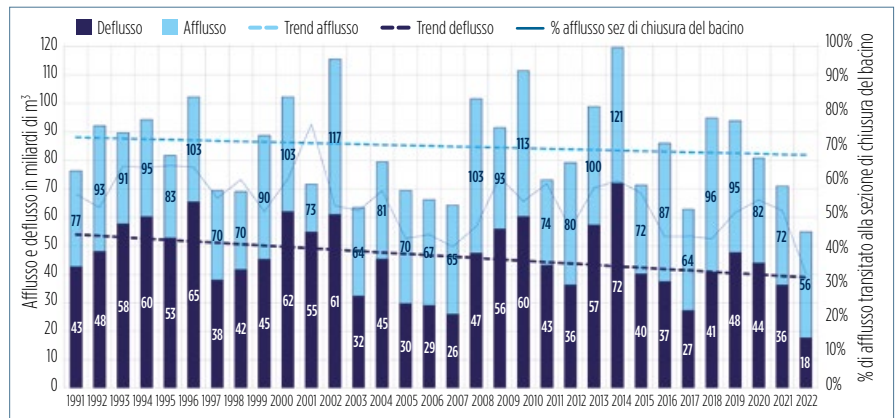


FIG. 4 AFFLUSSI E DEFLUSSI  
Confronto afflussi e deflussi nel distretto del fiume Po nel periodo 1991-2022. In leggera flessione gli afflussi (7%), più consistente il calo dei deflussi (28%).

valori minimi, mentre per il periodo irriguo gli accumuli osservati sono stati prossimi al valore medio). In generale, l'analisi dei trend a scala distrettuale evidenzia una riduzione significativa delle precipitazioni osservate nel periodo irriguo con una perdita dei volumi di afflusso in 30 anni pari a circa 9 miliardi di m<sup>3</sup> (figura 4). Per quanto attiene all'andamento delle temperature, analogamente a quanto sta accadendo a livello globale e a

scala nazionale, anche nel distretto del fiume Po, nell'ultimo trentennio, è stato registrato un aumento delle temperature su tutto il territorio (figura 6 e tabella 1). La tendenza al riscaldamento si evince anche dall'analisi dei valori estremi di temperatura nonché dall'aumento medio delle cosiddette "notti tropicali" rispetto alla media climatologica (tabella 2). La diminuzione progressiva delle

precipitazioni osservata nell'ultimo trentennio, ascrivibile come detto soprattutto al periodo marzo-settembre, sommata all'aumento della temperatura media, ha comportato un aumento della richiesta d'acqua in alcuni settori e in particolare nel settore agricolo. Ogni anno nel distretto vengono prelevati per i diversi usi circa 20 miliardi di metri cubi d'acqua, di cui quasi il 75% è destinato agli usi irrigui (15 miliardi di cui 4,4 miliardi destinati alla sola produzione risicola), mentre la restante parte è destinata a soddisfare gli usi industriali e civili. Gran parte dei volumi d'acqua prelevati provengono da fonti superficiali, ma un contributo importante è fornito anche dalle falde, soprattutto per soddisfare gli usi civili e industriali. Ovviamente, il fabbisogno irriguo risulta essere molto variabile di anno in anno in quanto strettamente dipendente dall'andamento meteo-climatico annuale nonché dagli andamenti colturali: a parità di colture praticate, questo risulta essere maggiore negli anni più caldi e asciutti il che determina di conseguenza un aumento della domanda di acqua a uso irriguo. Ma se il fabbisogno complessivo risulta essere sostenibile in condizioni di normalità e abbondanza, i periodi di siccità sempre più frequenti e duraturi, osservati negli ultimi anni, hanno fatto emergere importanti problemi di scarsità, soprattutto in questo settore. Se analizziamo, infatti, i dati riportati in *figura 7*, possiamo osservare come in

anni a piovosità prossima alla media di riferimento, quali il 2016, il 2018, il 2019 e il 2020, la domanda irrigua si attesti su valori inferiori mentre, in anni più siccitosi, quali il 2017 o il 2021, questa tenda ad aumentare. L'anomalia è rappresentata ovviamente dal 2022, in assoluto l'anno più siccitoso mai registrato, nel quale, a causa degli scarsi afflussi estivi (solo nell'anno

2003 gli afflussi estivi sono stati inferiori a quelli del 2022), non è stato comunque possibile soddisfare il fabbisogno irriguo. Va comunque evidenziato che nel corso della stagione irrigua 2022, nonostante la siccità conclamata, il volume cumulato delle derivazioni è sempre stato superiore alla portata di Po a Pontelagoscuro fino al 22 agosto, con un delta che ha superato

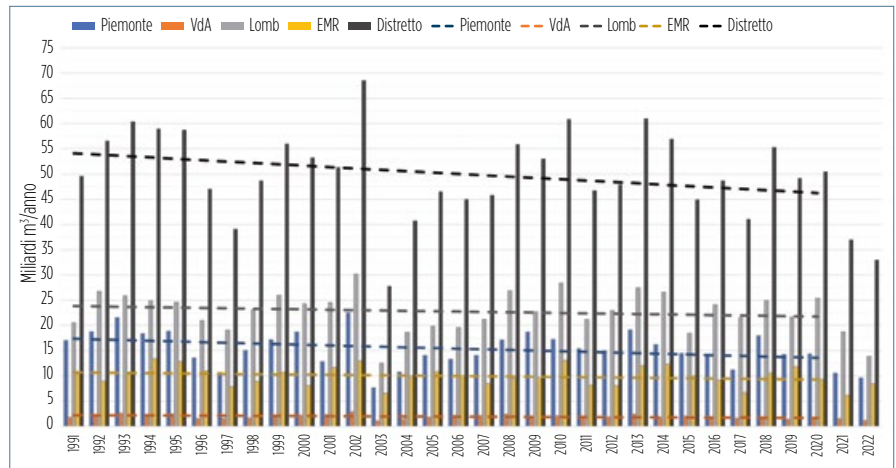


FIG. 5 PRECIPITAZIONI NEL DISTRETTO RELATIVE ALLA STAGIONE IRRIGUA  
Afflusso meteorico annuo misurato in miliardi di metri cubi per il periodo di riferimento 1991-2022.

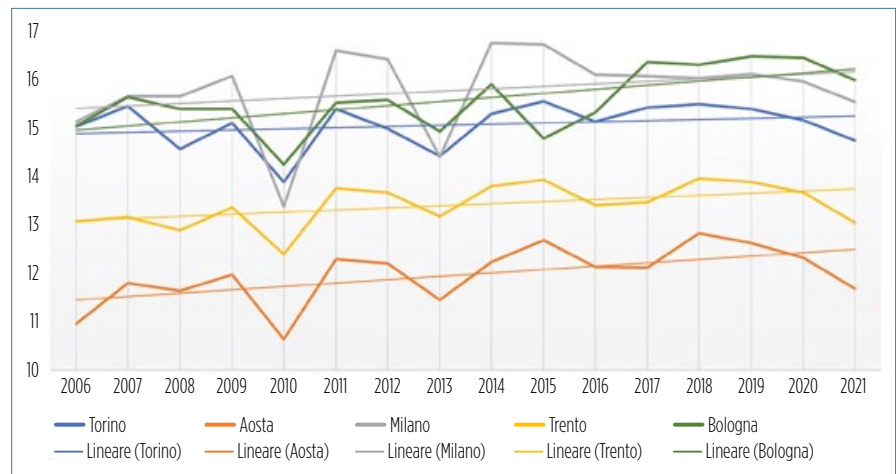


FIG. 6 TEMPERATURA MEDIA ANNUA  
Andamento della temperatura media annua in alcune città capoluogo del distretto (°C). Nell'ultimo trentennio è stato registrato un aumento delle temperature su tutto il territorio.

Comune	Anomalia 2021 (dal valore climatico 1971-2000)	Valore climatico 1971-2000
Torino	+1,3 °C	13,4 °C
Aosta	+0,8 °C	10,9 °C
Milano	+1,5 °C	14,0 °C
Trento	+0,7 °C	12,3 °C
Bologna	+1,3 °C	14,6 °C

TAB. 1 VALORI CLIMATICI  
Anomalie e valori climatici in alcuni capoluoghi del distretto del Po.

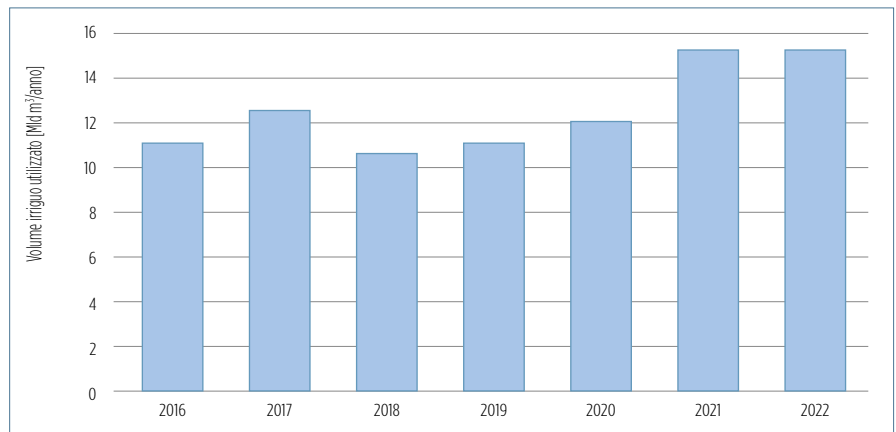
Comuni	Minimo delle temperature minime (°C)			Massimo delle temperature massime (°C)			Giorni estivi			Notti tropicali		
	2021	Differenza 2021 dal valore medio 2006-2015	Valore medio 2006-2015	2021	Differenza 2021 dal valore medio 2006-2015	Valore medio 2006-2015	2021	Differenza 2021 dal valore medio 2006-2015	Valore medio 2006-2015	2021	Differenza 2021 dal valore medio 2006-2015	Valore medio 2006-2015
Torino	-2,4	+2,1	-4,5	+34,3	-1,3	+35,6	112	-2,9	115	47	+6,2	41
Aosta	-14,6	-3,5	-11,1	+35,8	+1,3	+34,5	103	+10,8	92	0	-1,5	1
Milano	-1,3	+1,5	-2,8	+35,9	-0,7	+36,6	112	-2,7	115	78	+20,5	58
Trento	-8,3	-2,2	-6,1	+33,9	-1,7	+35,6	101	+4,3	97	12	+0,7	11
Bologna	-2,8	+1,8	-4,6	+38,3	+1,1	+37,2	126	+10,8	115	70	+21,8	48

TAB. 2 ESTREMI DI TEMPERATURA  
Indici di estremi di temperatura calcolati su valori soglia per alcuni comuni capoluogo del distretto. La tendenza al riscaldamento emerge dall'analisi dei valori estremi di temperatura e dall'aumento medio sia dei "giorni estivi" sia delle "notti tropicali" rispetto alla media climatologica.

i 500 m<sup>3</sup>/s il giorno 7 luglio, quando, a fronte di una portata complessivamente derivata di poco superiore ai 730 m<sup>3</sup>/s, la portata misurata in alveo risultava di poco inferiore ai 200 m<sup>3</sup>/s. Il 24 luglio veniva rilevata la portata più bassa mai misurata a Pontelagoscuro pari a 114 m<sup>3</sup>/s (figura 9). Questa consistente riduzione dei deflussi transanti alla sezione di chiusura di Pontelagoscuro ha comportato, nel luglio 2022, un'ingressione dell'intrusione salina a valori mai registrati prima. Il 22 luglio 2022, infatti, è stato stimato il massimo valore di risalita dell'intrusione salina in condizioni di alta marea nel ramo di Po di Goro: la stima dell'intrusione salina ha raggiunto circa 40 km (figura 8). Da quanto detto sin qui, risulta evidente che maggior domanda e minor disponibilità stanno rendendo sempre più difficile la gestione della risorsa idrica all'interno del distretto del Po. Per far fronte alle necessità e alle problematiche evidenziate, via via più frequenti e durature, bisognerà realizzare importanti riforme strutturali e non dell'intero sistema di utilizzo della risorsa che dovranno migliorare, innanzitutto, le modalità con cui la risorsa idrica viene conservata, distribuita e utilizzata. Questo richiederà importanti investimenti nel settore, per i quali sarà necessario individuare le opportune fonti di finanziamento (tariffa del servizio idrico integrato, Piano nazionale di interventi infrastrutturali e per la sicurezza del settore idrico ecc. ).

**Francesco Tornatore, Paolo Leoni, Federica Bonaiuti, Marco Brian, Selena Ziccardi, Gaia Roati**

Autorità di bacino distrettuale del fiume Po, Settore Pianificazione e gestione degli usi della risorsa



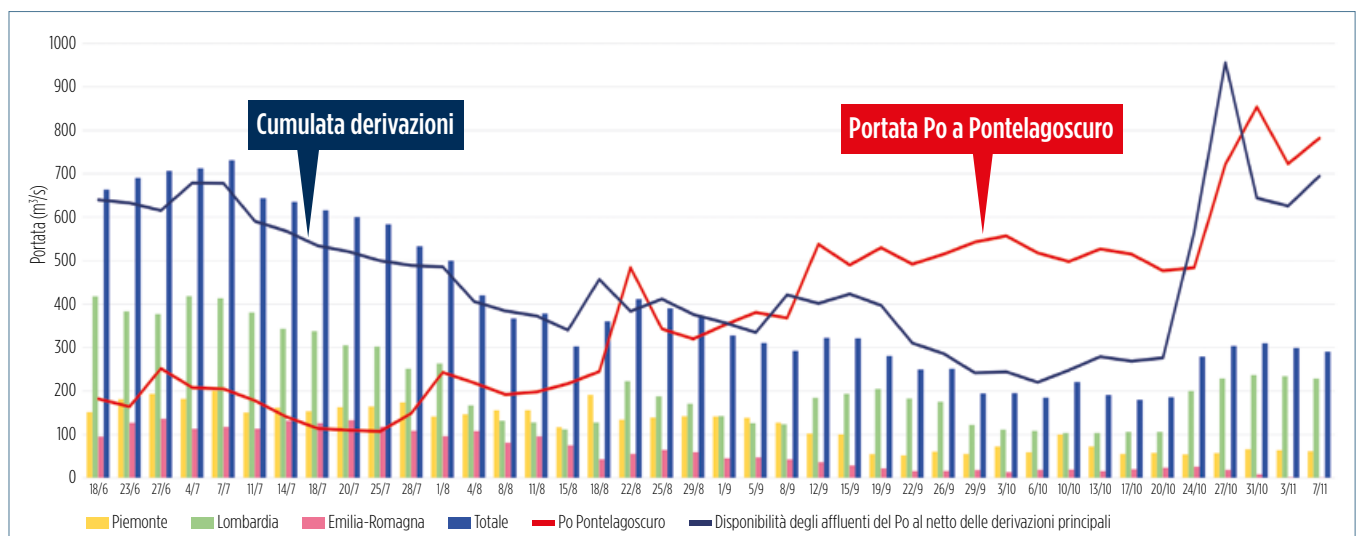
**FIG 7 VOLUME IRRIGUO UTILIZZATO**

Volume irriguo utilizzato nel distretto del fiume Po dal 2016 al 2022. In anni a piovosità prossima alla media (2016, 2018, 2019 e 2020) la domanda irrigua si attesta su valori inferiori, in anni più siccitosi (2017 o 2021) questa tenda ad aumentare.



**FIG. 8 CUNEO SALINO**

Risalita del cuneo salino nel delta del fiume Po, a luglio 2022, in condizioni di alta marea. Nel ramo di Po di Goro la stima massima dell'intrusione salina ha raggiunto circa 40 km.



**FIG. 9 PORTATE DERIVATE E PORTATA TRANSITANTE**

Confronto tra portate derivate a scala distrettuale e portata transitante alla sezione di chiusura di Pontelagoscuro nel periodo giugno-ottobre 2022.

# INTERFACCIA TERRA-MARE E PIANIFICAZIONE REGIONALE

HA PRESO AVVIO NEL 2023 L'ELABORAZIONE DEL NUOVO PIANO DI TUTELA DELLE ACQUE DELL'EMILIA-ROMAGNA. QUATTRO I MACRO-OBIETTIVI (DISPONIBILITÀ DELL'ACQUA OGGI E DOMANI, ACQUA PULITA E SICURA, ACQUA E BIOSFERA - RINATURAZIONE, LUOGHI DELL'ACQUA) TRA LORO SINERGICI PER RAGGIUNGERE IL BUONO STATO AMBIENTALE DELLE RISORSE IDRICHE.

**H**a preso avvio, nel corso del 2023, l'elaborazione del nuovo Piano di tutela delle acque (Pta) regionale, dopo un lungo periodo, dal 2005 a oggi, nel quale la Regione Emilia-Romagna è stata impegnata, da un lato, nell'attuazione del piano vigente, dall'altro, nel collaborare con le autorità di bacino distrettuali alla predisposizione dei Piani di gestione delle acque, ai sensi della direttiva quadro Acque (Dqa) 2000/60/CE, giunta ora al suo terzo ciclo di pianificazione.

Per rispondere alle sfide poste dal cambiamento climatico il nuovo piano si pone obiettivi ambiziosi, da perseguire attraverso linee strategiche di azione proiettate su orizzonti temporali che vanno dal medio al lungo periodo, sviluppate secondo una strategia pienamente integrata con il Patto per il lavoro e per il clima e con la Strategia regionale Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile.

Il nuovo Pta 2030, interpretando necessariamente i tempi in cui nasce e si svilupperà, tra cambiamenti climatici, nuove esigenze socioeconomiche e modelli di *governance*, declina e concretizza l'obiettivo del raggiungimento del buono stato ambientale delle acque in quattro macro-obiettivi, tra loro strettamente legati e concorrenti (figura 1):

- disponibilità dell'acqua oggi e domani
- acqua pulita e sicura
- acqua e biosfera, rinaturazione
- luoghi dell'acqua.

Il Piano sviluppa 10 linee strategiche e 50 azioni a essa concorrenti.

L'articolazione delle linee strategiche e delle relative azioni discende dagli obiettivi della Dqa opportunamente declinati a livello regionale secondo una logica funzionale.

In particolare, il piano legge azioni e strategie rispetto alla loro capacità di rispondere alle questioni aperte che



FIG. 1 MACRO-OBIETTIVI PTA 2030 EMILIA-ROMAGNA

interessano i contesti territoriali regionali di maggiore rilevanza, caratterizzati in funzione delle loro peculiarità, criticità e prestazioni attese:

- fiume Po
- collina e montagna
- pianura
- costa
- territorio urbanizzato.

Nel quadro del nuovo Pta, l'interfaccia terra-mare assume particolare rilevanza, anche alla luce della sua complessità e diversificazione. Lungo gli oltre 110 km di costa, coesistono un articolato sistema di aree protette (16 Zsc-zone speciali di conservazione e Zps-zone di protezione speciali costiere, 2 Zsc marini, il Parco regionale Delta del Po, 13 riserve, 1 paesaggio protetto), 7 corpi idrici di transizione, 2 marino costieri, 30 fluviali e 6 corpi idrici sotterranei.

I corpi idrici superficiali interessati non sempre godono di un buono stato ecologico e chimico, a causa delle pressioni antropiche che su di essi insistono, di tipo puntuale e diffuso, e delle loro caratteristiche morfologiche e idrodinamiche, fortemente condizionate da elementi artificiali.

Tra le criticità che si riscontrano in ambito costiero, la risalita del cuneo salino, cioè l'ingressione di acque salate sia nelle acque sotterranee sia in quelle superficiali, sta assumendo sempre più rilevanza, anche a causa dei fenomeni di crisi idrica e di scarsità di risorsa che in questi ultimi anni si sono presentati con maggiore frequenza e intensità, come spesso analizzato in sede di Osservatorio permanente sugli utilizzi idrici nel distretto idrografico del fiume Po, al quale la Regione partecipa attivamente, in collaborazione con Arpa. Scarsità di portate nei corpi idrici superficiali regionali recapitanti a mare determinata dalle loro intrinseche caratteristiche torrentizie e acuita dai cambiamenti climatici in corso, pressioni antropiche, diminuzione delle precipitazioni e innalzamento del livello del medio mare mettono a rischio il delicato equilibrio dei sistemi acquatici superficiali e sotterranei e il bilanciamento tra acque dolci e salate.

Proprio per rispondere a tale criticità, il Pta inserisce, nel suo quadro di azioni, una misura specifica "Ricerca soluzioni sostenibili per contrastare la risalita del cuneo salino", facente

parte della linea strategica “Investire in ricerca e innovazione”. Essa prevede attività conoscitive finalizzate a ricercare soluzioni gestionali innovative adatte al contesto regionale, individuare tipologie di opere strutturali che contrastino l’ingresso delle acque marine nei corpi idrici superficiali recapitanti a mare, nonché definire ambiti prioritari d’intervento. Tali ambiti potranno essere individuati anche mediante la realizzazione di cartografie volte a caratterizzare, sulla base dei dati esistenti, le aree maggiormente a rischio di ingresso del cuneo salino nelle acque sotterranee e superficiali.

Il redigendo Piano di tutela definirà modalità gestionali integrate che tengano conto non solo della regolamentazione e controllo dei prelievi, ma anche di metodi e tecnologie già esistenti, quali la realizzazione di opere strutturali (dighe e chiuse) a salvaguardia delle acque dolci superficiali, interventi di ricarica artificiale delle falde e di aumento della capacità drenante dei suoli.

In generale, infatti, occorre considerare che anche le misure finalizzate al miglioramento dello stato quantitativo dei corpi idrici superficiali e sotterranei individuate nel Pta 2030 contribuiscono a contrastare l’ingresso del cuneo

salino (misure delle linee strategiche “Aumentare e diversificare l’offerta”, “Rafforzare la resilienza del territorio alla siccità” e “Ridurre la domanda”).

Numerose sono, inoltre, le linee strategiche e azioni del Pta 2030 dedicate all’interfaccia terra-mare (figura 2).

Tra queste, “Individuare pratiche di gestione sostenibile delle acque di transizione” si propone, anche attraverso la promozione di contratti di area umida/laguna/costa, di:

- favorire interventi di riqualificazione morfologica
- aumentare gli apporti di acqua dolce e migliorare l’idrodinamica interna ai corpi idrici
- indirizzare verso soluzioni *nature-based* per ridurre gli apporti di nutrienti (fitodepurazione)
- ricostruire dune costiere per la difesa da mareggiate.

In considerazione del fatto che la qualità delle acque marine e di transizione dipende sostanzialmente da quella delle acque superficiali che in esse recapitano, risultano rilevanti in questo ambito anche le misure del Pta legate alla riduzione dei carichi di nutrienti apportati dai corsi d’acqua e quelle finalizzate alla riduzione del rischio di contaminazione biologica.

Il Pta si propone, pertanto, di:

- definire un metodo per individuare i corpi idrici maggiormente compromessi e gli scarichi potenzialmente responsabili dell’inquinamento, stimare la relazione fra limiti più restrittivi e miglioramento della qualità corpi idrici e definire un programma di adeguamento progressivo delle autorizzazioni allo scarico nei corpi idrici
- individuare misure sulla gestione degli effluenti di allevamento, per ridurre l’apporto di azoto e fosforo che eccede la capacità di carico del bacino padano
- intervenire direttamente sulla contaminazione delle acque di balneazione in occasione di eventi di piena, attraverso misure sulla gestione degli scaricatori di piena e delle interferenze fra rete fognaria e rete scolante, nonché potenziare l’efficacia dei depuratori nella fascia costiera
- contribuire a indirizzare verso la riduzione dell’impermeabilizzazione del suolo e verso interventi legati alla captazione delle acque piovane, che riducono l’apporto di acque di dilavamento potenzialmente inquinanti.

**Patrizia Ercoli, Sandra Monducci, Immacolata Pellegrino, Olga Sedioli**

Area Tutela e gestione dell’acqua, Regione Emilia-Romagna

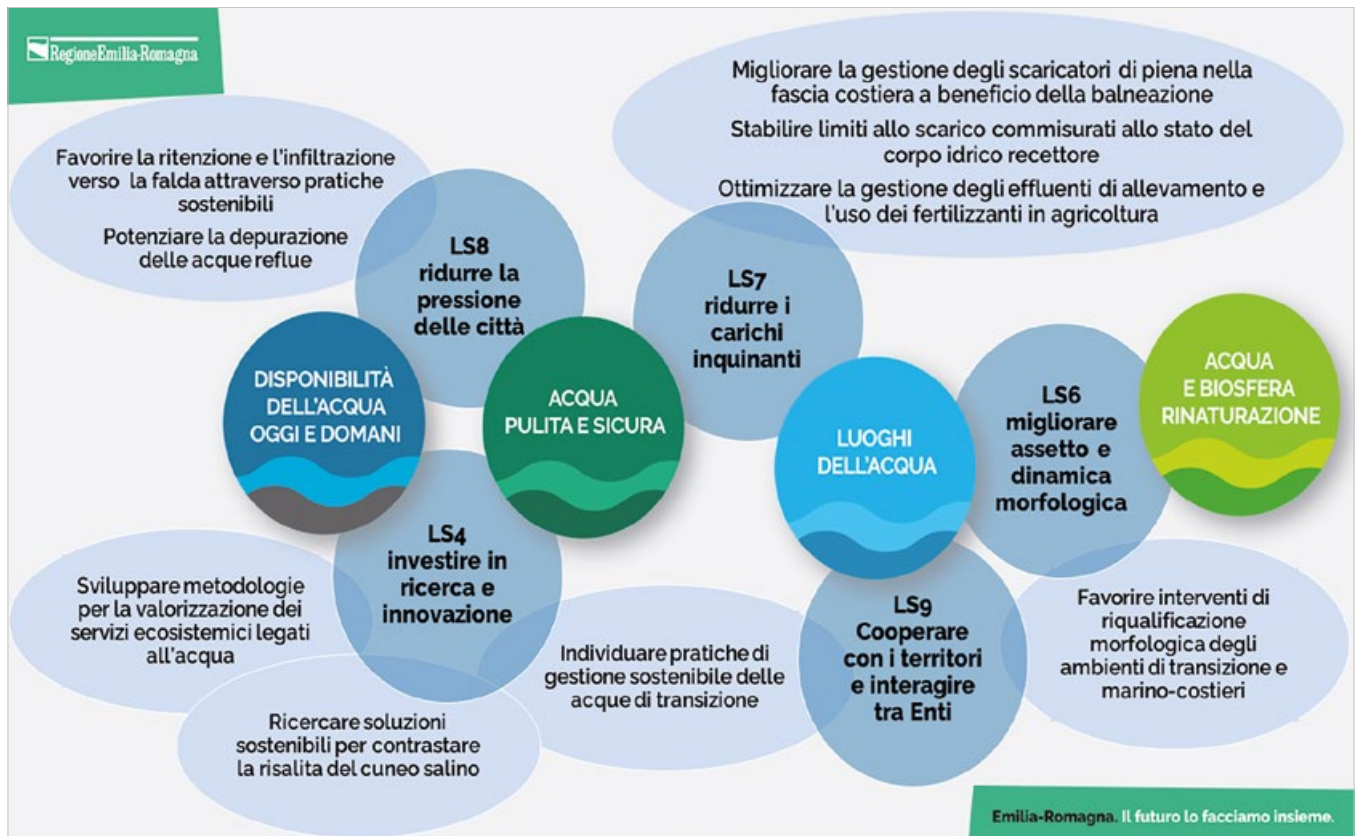


FIG. 2 LINEE STRATEGICHE E AZIONI DEL PTA 2030 EMILIA-ROMAGNA CONNESSE CON L'INTERFACCIA TERRA-MARE

# APPROVVIGIONAMENTO IDRICO NELLE AREE VICINE ALLA COSTA

I PROBLEMI CONNESSI ALLA PRESENZA DI SALI SIA NELLE ACQUE SUPERFICIALI PER L'IRRIGAZIONE SIA NEI TERRENI ACCOMPAGNANO DA SEMPRE LA GESTIONE DELLE AREE DELTIZIE. LA SFIDA, CHE IL CAMBIAMENTO CLIMATICO HA ACCELERATO, È LA RICERCA DI UN NUOVO EQUILIBRIO DINAMICO CAPACE DI NON DISPERDERE UN PATRIMONIO INESTIMABILE.

**I**l comprensorio del Consorzio di bonifica Pianura di Ferrara si estende per 250.000 ettari e ha caratteristiche peculiari che lo rendono un unicum in Italia e in Europa: per il 40% si trova sotto il livello del mare, è circondato da fiumi pensili (Po, Reno e Panaro) e a est lambisce il mare Adriatico. I terreni centro-orientali ebbero origine dal prosciugamento di valli, anche salmastre: ancora oggi queste terre mantengono particolari valori di salinità.

Le problematiche connesse alla presenza di sali sia nelle acque superficiali per l'irrigazione sia nei terreni accompagnano da sempre la gestione delle aree deltizie. Portare acqua dolce, garantire un buon drenaggio dei terreni, deprimere la falda salata superficiale favorendo la percolazione di acque dolci sono solo alcuni degli accorgimenti adottati dai Consorzi di bonifica che gestiscono da oltre un secolo le infrastrutture idrauliche del territorio.

Le acque utilizzabili per l'irrigazione debbono necessariamente presentare un ridotto contenuto di sali, pena il danneggiamento diretto delle colture o la perdita totale dei raccolti, ma anche danni molto rilevanti e semi-permanenti ai terreni: l'infiltrazione di sali ne modifica le caratteristiche chimico-fisiche e può renderli inadatti a qualsiasi tipo di coltivazione.

Per praticità, la concentrazione di sali nelle acque è spesso misurata indirettamente, rilevandone la conducibilità elettrica (mS/cm). La sensibilità delle colture alle acque salate varia dipendentemente dalle specie, dalle fasi fenologiche, dai metodi irrigui e dalle caratteristiche dei terreni.

Sulla base dell'esperienza e per il solo comprensorio ferrarese, si ritiene che l'utilizzo di acque con valori inferiori a 1,5/2,0 mS/cm non determini problemi particolari; acque con valori tra 2,0 e 3,0 mS/cm, pur con attenzione, possono essere utilizzate; nel caso di valori superiori a 3,0 mS/cm è invece



FOTO: R. BRANCOLINI - REGIONE ER



FIG. 1  
ALTITUDINE

Territorio del Consorzio di bonifica della pianura di Ferrara, altitudine sul livello del mare.



FIG. 2  
CORSI D'ACQUA

Principali corsi d'acqua che sfociano nel mare Adriatico nel territorio del Consorzio di bonifica della pianura di Ferrara.



sconsigliato procedere con l'irrigazione. Per disporre di parametri di riferimento, è utile sapere che l'acqua del fiume Po ha conducibilità dell'ordine di 0,5 mS/cm, l'acqua di mare >30-35 mS/cm.

Per l'approvvigionamento idrico agricolo, che per il ferrarese avviene quasi esclusivamente dal fiume Po, l'avanzamento del cuneo salino è un problema: può infatti limitare o annullare le possibilità di attingimento, a seconda della posizione dei prelievi e dalla distanza dalla foce.

I principali corsi d'acqua che sfociano nel mare sono, da nord a sud, il Po di Goro, il Po di Volano, il canale navigabile Migliarino-Ostellato-Porto Garibaldi e il fiume Reno (figura 2).

**Po di Goro**

Il Po di Goro è direttamente interessato dal fenomeno della risalita del cuneo salino. Non essendo presente alcun manufatto di regimazione o sbarramento, l'avanzamento o l'arretramento delle acque salate dipende unicamente dalla portata del fiume e dalla marea marina. Per quanto riguarda la sponda ferrarese del Po di Goro, sono presenti due punti di derivazione (figura 3):

- Sifoni Goro: si tratta di cinque sifoni di modesta portata, molto vicini al mare. Normalmente è possibile derivare acqua fino a primavera inoltrata, successivamente, al raggiungimento di valori non compatibili con l'uso irriguo si sospende il prelievo dai sifoni e si alimenta l'area attraverso un impianto che trasferisce acque provenienti da altri distretti

- impianto Garbina: è posto a circa 36 km dal mare, può derivare fino a 4,4 m³/s. Prima del 2022, nelle annate peggiori (2003-2006), si era rilevata una risalita di acque salate di 27 km circa. Pur non sottovalutando il fenomeno, l'impianto sembrava in posizione abbastanza sicura. Nel 2022 si è prudenzialmente sospesa la derivazione per alcuni giorni, anche se dalle misurazioni effettuate l'avanzata del sale è arrivata a pochi chilometri dall'impianto (figura 4).

**Po di Volano**

Spostandosi più a sud, al centro della provincia di Ferrara, vi è il Po di Volano (figura 5). Qui, in località Tieni, è presente un manufatto di sbarramento realizzato a fini di navigazione del fiume, che separa il corso d'acqua in due tronchi: il tratto a monte è caratterizzato da quote artificialmente mantenute a livelli prossimi a 1,5 m slm, mentre il

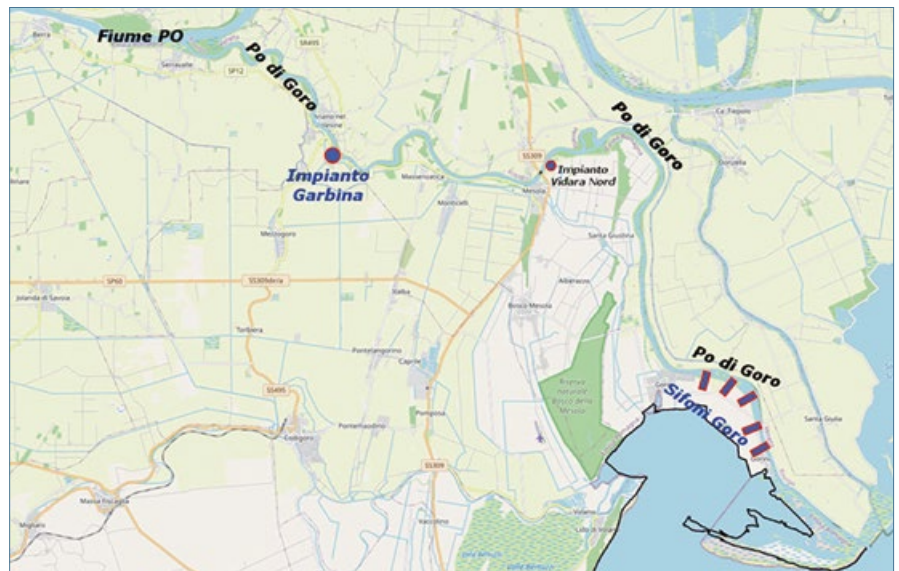


FIG. 3 PO DI GORO  
Punti di derivazione sulla sponda ferrarese del Po di Goro.

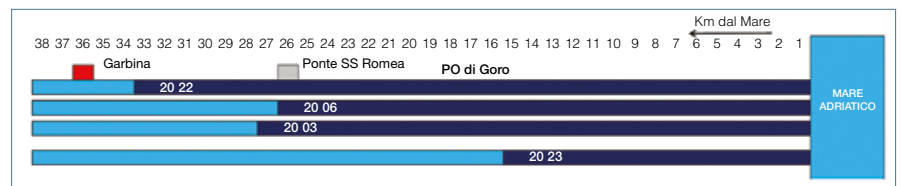


FIG. 4 CUNEO SALINO  
Risalita dell'acqua di mare nel ramo del Po di Goro negli anni più siccitosi.



FIG. 5 PO DI VOLANO  
Manufatti significativi sul ramo del Po di Volano.

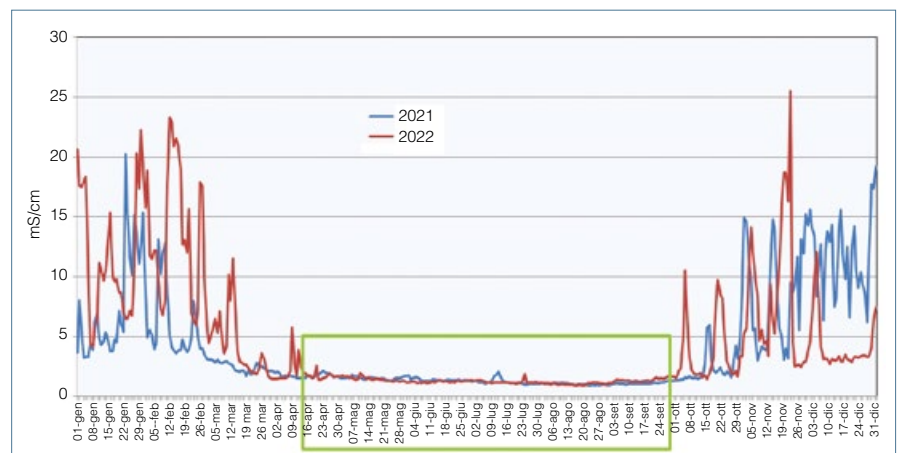


FIG. 6 CONDUCEVITÀ ELETTRICA  
Valori di conducibilità rilevati nel Po di Volano presso la presa Pomposa negli anni 2021 e 2022.

tratto a valle è in collegamento diretto con il mare e presenta livelli idrometrici dipendenti dalla marea (+/-0,30 m slm). Lo sbarramento, dalla metà degli anni Ottanta, è normalmente chiuso. Nel tratto a monte di Tieni è presente acqua dolce, immessa nel periodo estivo dalle derivazioni poste sul Po a Pilastresi e Pontelagoscuro. Nel tratto a valle sono scaricate le acque di alcuni impianti idrovori del Consorzio. Gli impianti idrovori di Codigoro, in particolare, durante il periodo irriguo ricevono e scaricano nel Volano "colatizie irrigue" da una vasta area di terreni particolarmente esigenti, tra cui anche le risaie, soggette a rilasci di consistenti volumi d'acqua nella rete di scolo o promiscua. La prolungata e costante immissione di quest'acqua dolce nel Volano ne rende possibile un secondo l'utilizzo per l'agricoltura delle aree più a valle: come mostrato in *figura 6* che indica i valori di conducibilità rilevati nel Po di Volano presso la presa Pomposa, da aprile a settembre la conducibilità delle acque in Po di Volano è costante e compatibile con l'uso irriguo (1,0/1,5 mS/cm).

**Canale navigabile Migliarino-Ostellato-Porto Garibaldi**

Nel canale navigabile, in località Valle Lepri, è presente un manufatto di sbarramento posto a 14 km dal mare (*figura 7*). Analogo a quello presente sul Volano a Tieni, separa il corso d'acqua in due tronchi: il tratto a valle è in collegamento diretto con il mare. A differenza di Tieni, in caso di precipitazioni lo sbarramento viene aperto, consentendo alle acque di giungere al mare.

Le opere di presa consorziali sono poste tutte a monte dello sbarramento Valle Lepri: tutta l'area, compresi i terreni posti a est dello sbarramento stesso, è servita dalle prese irrigue collocate prima dello sbarramento, ragione per cui non presenta particolare vulnerabilità all'ingressione salina via fiume.

**Fiume Reno**

Per ciò che riguarda il Reno (*figura 8*), lo sbarramento Volta Scirocco si trova sul fiume a circa 6 km dal mare ed è gestito dal Consorzio di bonifica di secondo grado per il Canale emiliano-romagnolo (Cer), al quale il Consorzio di bonifica Pianura di Ferrara è associato. Nel tratto terminale del Reno (da Volta Scirocco al mare), interessato dalla risalita del cuneo salino, non sono presenti opere di presa: non si rilevano pertanto problemi connessi alla salinità delle acque disponibili. Come tutti i fiumi



FIG. 7 CANALE NAVIGABILE MIGLIARINO-OSTELLATO-PORTO GARIBALDI  
Manufatti significativi sul tratto terminale del canale navigabile.



FIG. 8 FIUME RENO  
Manufatti significativi sul tratto terminale del fiume Reno.

appenninici, i principali problemi sono riferibili prevalentemente alla quantità d'acqua prelevabile. I regimi torrentizi, tipici di questi corsi d'acqua, presentano l'alternarsi di rapidi e relativamente brevi innalzamenti dei livelli in caso di pioggia, ai quali seguono lunghi periodi di magra con portate modeste.

Il governo idraulico dell'area è da sempre caratterizzato da equilibri dinamici. La gestione attuale, consorziale e privata, unitamente ad altri fattori (caratteristiche dei terreni, capacità imprenditoriali e mercato) ha reso possibile, in un contesto ambientale di assoluto pregio, lo sviluppo di un'agricoltura fortemente dedicata all'orticoltura e al vivaismo con conseguenti elevate ricadute economiche e occupazionali.

Il prelievo di acque dolci sempre più lontano dal mare, oppure a monte di appositi sbarramenti, l'immissione di

elevati volumi d'acqua per allontanare falde salate dallo strato coltivato, l'aumento dei volumi distribuiti alle colture (*leaching*) sono accorgimenti tecnici attualmente utilizzati: queste tecniche possono essere migliorate e affinate, disponendo di adeguate risorse economiche per la ricerca e per gli investimenti; il tutto, però, rimane ovviamente strettamente dipendente dalla disponibilità della risorsa acqua. Si sta affrontando, come sistema territoriale, una sfida che il cambiamento climatico ha solo accelerato. Una sfida complessa e "in rincorsa", alla ricerca di un nuovo equilibrio capace di non disperdere un patrimonio d'inestimabile valore.

**Aldo Bignami**

Consorzio di bonifica Pianura di Ferrara

# IL CALCOLO DELLA PORTATA E DELLA SALINITÀ DEL PO

L'ATTIVITÀ DI MONITORAGGIO, CONTROLLO E L'USO DI STRUMENTI DI MODELLISTICA OPERATIVA RISULTANO INDISPENSABILI PER INFORMARE GLI ATTORI INTERESSATI E INDIVIDUARE LE AZIONI PIÙ OPPORTUNE, DA IMPLEMENTARE NEL BREVE E NEL MEDIO-LUNGO TERMINE, PER GARANTIRE GLI USI DELL'ACQUA E I SERVIZI ECOSISTEMICI CONNESSI.

**N**el delta del Po, un ecosistema con caratteristiche idrauliche, morfologiche e biologiche proprie, si concretizza la transizione tra fiume e mare; in un contesto particolarmente delicato, l'acqua dolce è utilizzata per scopi potabili, agricoli, industriali e risulta fondamentale per equilibrare la salinità dell'habitat; la presenza di acqua dolce è influenzata dalla risalita del cuneo salino, particolarmente estesa in caso di magra fluviale, come nell'estate del 2022. La conoscenza e il presidio del territorio, basati su attività di monitoraggio, controllo e strumenti di modellistica operativa, risulta indispensabile per informare gli attori interessati e individuare le azioni più opportune da implementare nel breve e nel medio-lungo termine per garantire gli usi dell'acqua e i servizi ecosistemici connessi.

Il delta del Po è costituito da cinque rami principali: Goro, Gnocca, Maistra, Tolle e Po Grande-Pila, nei quali si può osservare la risalita dell'acqua salata che dipende principalmente dall'entità della portata in arrivo da monte, ripartita nei diversi rami, e dal livello del mare. In situazioni di magra fluviale, quando le portate del Po sono molto basse, e di alta marea, si osservano valori più elevati della lunghezza di intrusione del cuneo salino che possono turbare le condizioni ambientali del territorio e gli utilizzi della risorsa idrica.

La Struttura IdroMeteoClima di Arpa (Simc) ha predisposto strumenti modellistici speditivi per il calcolo della ripartizione delle portate nei rami del delta del Po e per la stima della lunghezza di intrusione del cuneo salino. Nel seguito vengono descritti tali strumenti, in particolare la metodologia sviluppata dal Servizio idrografia e idrologia regionale e le modalità in cui sono utilizzati attualmente, con un accenno a possibili sviluppi futuri.

## Previsione delle portate defluenti nell'asta principale del Po

Con riferimento alla stazione idrometrica di Pontelagoscuro (FE) posta a 91 km dalla foce in mare, inserita nel sistema Dews (*Drought early warning system*), la previsione delle portate è possibile attraverso un modello idrologico (Topkapi), che simula i deflussi provenienti dai sottobacini idrografici del fiume Po, e un modello (Ribasim) che simula le portate defluenti nell'asta principale del Po a partire dal bilancio idrico, comprensivo delle falde sotterranee, dei prelievi e dei rilasci idrici. Il sistema è alimentato da previsioni e osservazioni meteorologiche in termini di temperature e precipitazioni, e consente di prevedere le portate medie giornaliere con un orizzonte di 10 giorni.

## Ripartizione delle portate nei rami del delta

La ripartizione delle portate è influenzata principalmente dal ramo considerato, la cui morfologia varia nel tempo, dalle sue caratteristiche idrauliche, dall'entità del deflusso a monte del delta e dall'andamento della marea. Per conoscere l'entità della ripartizione delle portate provenienti da Pontelagoscuro nei singoli rami del delta, indispensabile per stimare la lunghezza del cuneo salino, è stato utilizzato un modello numerico (Sobek), che simula il moto idraulico a partire dalla sezione di Pontelagoscuro fino al mare Adriatico. La geometria del modello è stata costruita nel 2007 sulla base dei rilievi topografici all'epoca disponibili; sono state inoltre considerate le barriere mobili installate al fine di limitare l'intrusione marina nei rami di Tolle e Gnocca. Le condizioni al contorno del modello sono, a monte, le portate di

Pontelagoscuro e a valle, l'elevazione e il campo di moto del mare forniti dal modello oceanografico Adria Roms. La taratura del modello di ripartizione è stata effettuata utilizzando i dati sperimentali raccolti nella campagna di monitoraggio dedicata (maggio 2007) e nell'ambito della campagna sulla salinità (luglio 2017), anche sulla base dei risultati di un modello speditivo idraulico di moto permanente. La campagna di monitoraggio ha previsto la raccolta di osservazioni idrometriche alle stazioni di Ariano (Ramo di Goro), Porto Tolle (Gnocca), Ca' Venier (Maistra), Ca' Dolfin (Tolle) e Pila (Pila), e corrispondenti misure di portata effettuate contemporaneamente su tutti i rami, in continuo, durante un emiciclo di marea (circa 12 ore).

Con la successiva post-elaborazione sono state definite le equazioni (una per ciascun ramo) in base alle quali determinare, nota la portata a Pontelagoscuro, la ripartizione di portata in termini percentuali per ciascun ramo. Nel 2022 sono state eseguite misure in condizioni di magra spinta per aggiornare le scale di deflusso per il calcolo delle portate a Pontelagoscuro a partire dai livelli idrometrici rilevati dalle rete in telemisura.

Nel 2023 è stata condotta una nuova campagna di misura, con modalità analoghe a quelle della campagna dedicata del 2007 al fine di aggiornare gli studi per la conoscenza della ripartizione.

## Intrusione del cuneo salino nel delta

Il fenomeno dell'intrusione salina consiste nella risalita dell'acqua marina dalla foce di un fiume, che si incunea sul fondo dell'alveo fluviale, poiché ha concentrazione salina più elevata ed è quindi più densa rispetto all'acqua dolce del fiume stesso. La salinità che si riscontra in colonna d'acqua diminuisce quindi dal fondo verso la superficie

e procedendo da valle verso a monte fino a una sezione nella quale risulta trascurabile.

Per conoscere l'andamento della salinità lungo i rami del delta, è stato utilizzato il modulo Delwaq del modello numerico Sobek che, considerando i flussi di densità, consente di risalire al profilo salino medio nelle diverse sezioni idrometriche prese in considerazione. Le condizioni al contorno del modulo Delwaq sono, a monte, la salinità dell'acqua dolce e, a valle, le condizioni di salinità fornite dal modello oceanografico Adria Roms.

È stato poi implementato un modello speditivo di moto permanente, basato sul metodo semplificato di Savenije (2005) che consente di stimare l'estensione dell'intrusione salina in condizioni di alta e bassa marea a partire dalle portate liquide defluenti nei rami del delta, nell'ipotesi che la lunghezza di intrusione massima si verifichi nella sezione con salinità media della colonna d'acqua pari a 0.5 psu (indicazioni Icram ai fini dell'applicazione della direttiva 2000/60/CE).

La calibrazione della modellistica speditiva è stata eseguita sulla base dei risultati di due campagne di misura della salinità nel delta, effettuate nell'agosto 2007 e nel luglio 2017. Entrambe hanno previsto il rilevamento da natante del profilo verticale di salinità, in sezioni successive lungo ciascun ramo con passo 3 km, muovendosi da valle a monte alla velocità dell'onda di marea contemporaneamente sui 5 rami, in condizioni di bassa e di alta marea. La risalita lungo ciascun ramo è stata interrotta in corrispondenza di valori di salinità rilevati trascurabili.

In occasione della magra del 2022, con il supporto delle misurazioni eseguite dalla Struttura oceanografica Daphne di Arpae, si è provveduto all'aggiornamento della modellistica speditiva di Savenije a partire dai rami di Goro e Po Grande-Pila.

## Utilizzo della modellistica

Attualmente la modellistica speditiva sviluppata dal Simc è utilizzata, in assenza di strumenti più dettagliati, per fornire agli attori interessati le stime aggiornate delle lunghezze di intrusione nei rami del delta.

In particolare, con riferimento alle attività dell'Osservatorio permanente sugli utilizzi idrici nel distretto idrografico del fiume Po, coordinato dall'Autorità di bacino, il Servizio Idrologia e idrografia, nel contesto delle attività svolte dal Simc a supporto della Regione Emilia-Romagna (ente sottoscrittore



del protocollo d'intesa istitutivo dell'Osservatorio) e della Cabina di regia regionale sulla criticità idrica, fornisce i valori delle lunghezze di intrusione nei rami di Goro e Po Grande-Pila stimate su un orizzonte di 10 giorni.

È possibile così verificare se tali lunghezze di intrusione stimate risultino inferiori ai valori soglia individuati in corrispondenza di una portata definita a Pontelagoscuro pari a  $450 \text{ m}^3/\text{s}$  come portata minima ammissibile per cui, in base agli studi condotti sulla risalita salina nell'alveo del Po, non si registrano impatti maggiori nel corpo idrico tra Pontelagoscuro e il delta del Po (Piano di bilancio idrico, Adbpo 2016).

La necessità di fissare una soglia di portata minima, sotto la quale non scendere operando principalmente sui prelievi e sui rilasci dei grandi laghi, nacque per scongiurare impatti particolarmente gravosi, come quelli patiti nell'evento siccitoso del 2003, quando il basso livello del fiume Po nel tratto interessato dalle opere di presa comportò il blocco della centrale termoelettrica di Porto Tolle causa di un colossale black-out in gran parte del Veneto.

La modellistica speditiva, pur essendo stata verificata e ricalibrata sulla base dei risultati dei campionamenti eseguiti durante le ultime campagne estive (2022 e 2023) e pur essendo ulteriormente "migliorabile" nel breve periodo, non consente il supporto della gestione operativa di situazioni di criticità alla scala locale, quali ad esempio quelle legate a un eccesso di salinità

in corrispondenza delle prese a uso idropotabile o agricolo; infatti il modello non fornisce attualmente la previsione dell'andamento della salinità lungo la verticale e, nelle sezioni in prossimità della confluenza di più rami del delta, l'incertezza previsionale risulta maggiore.

## Prospettive

La modellistica gioca un ruolo fondamentale per la stima dell'intrusione salina. La metodologia di calcolo speditiva sviluppata dal Servizio Idrografia e idrologia regionale e distretto Po ha previsto: l'effettuazione di campagne di monitoraggio (misure di portata e campionamento del cuneo salino) per la taratura dei modelli; l'applicazione di un modello numerico idrodinamico per la definizione della ripartizione della portata tra i rami del delta; l'applicazione di un modello a stati permanenti per la stima della massima risalita del cuneo salino nelle diverse condizioni di marea.

In prospettiva sarà possibile avviare uno studio specifico orientato a una nuova modellazione del delta del fiume Po, nell'ambito delle attività del Gcu-m (Gruppo di coordinamento unificato magre), istituito con accordo interistituzionale al fine di gestire il sistema di modellistica per la gestione delle magre e delle risorse idriche nel distretto padano, coordinato dall'Autorità di bacino, e al quale partecipano le regioni ricadenti nel distretto. Tale studio potrebbe prevedere la

realizzazione di un modello idrodinamico aggiornato, sulla base di nuovi rilievi topografici particolarmente utile per approfondire la ripartizione delle portate nei rami del delta quando i deflussi a Pontelagoscuro scendono al di sotto di 1.000 m<sup>3</sup>/s (condizioni di “acque basse”), che potrà includere le condizioni dell’andamento di marea e anche ulteriori forzanti (vento, orientamento delle bocche di confluenza a mare, correnti costiere ecc), attualmente non considerate, qualora possano avere un effetto impattante.

Gli obiettivi di questo studio porterebbero inoltre a integrare un modulo aggiornato per la simulazione dell’intrusione salina in grado di restituire il profilo di salinità verticale nelle sezioni di interesse, anche

in considerazione delle strutture idrauliche presenti (barriere anti intrusione salina) e un nuovo modulo che tenga conto degli scambi tra acque sotterranee e acque superficiali, nonché con i terreni circostanti che consideri gli aspetti quali-quantitativi dello stato ambientale dei corpi idrici (temperatura ecc.).

Lo stesso studio potrebbe anche estendersi a ulteriori approfondimenti in merito ai valori di soglia della portata e delle corrispondenti lunghezze di intrusione salina.

Particolarmente interessante potrebbe essere lo studio della capacità di recupero, in riferimento al parametro della salinità, sia dei corpi idrici, che dei terreni interferenti, a seguito di episodi di magra significativi e ravvicinati.

Questo sistema di modelli, per il quale sarebbe fondamentale la ricerca di ulteriori informazioni a disposizione di vari enti e portatori di interessi, potrebbe essere implementato nella piattaforma Dews e integrato con i modelli previsionali disponibili (ad esempio un modello idrologico idraulico connesso a un modello di gestione della risorsa idrica) al fine di fornire informazioni operative.

**Elisa Comune, Mauro del Longo, Alessio Pugliese, Giuseppe Ricciardi, Enrica Zenoni**

Struttura IdroMeteoClima,  
Arpae Emilia-Romagna

## CUNEO SALINO, L'EVENTO DI GORO

Il 26 ottobre 2023 si è tenuto a Goro (FE), nella sede della Struttura oceanografica Daphne di Arpae, il seminario “Cuneo salino nel delta del Po, stato attuale e prospettive”, con l’obiettivo di presentare gli studi tecnico-scientifici fin qui svolti in Emilia-Romagna e riflettere sulle prospettive. Molti articoli del servizio presentato nelle pagine precedenti riportano quanto presentato in quell’occasione. In questa pagina pubblichiamo alcune foto dell’evento. Tutte le foto sono di Katia Zaghini.



# UNA NUOVA MODELLISTICA AD ALTISSIMA RISOLUZIONE

ALLO SCOPO DI MIGLIORARE IL MONITORAGGIO DEL SISTEMA LAGUNARE E DI TRANSIZIONE, LA STRUTTURA IDROMETEOCLIMA DI ARPAE HA SVILUPPATO SHYFER, UN MODELLO NUMERICO IDRODINAMICO CHE RAPPRESENTA IN MODO PIÙ DETTAGLIATO E ACCURATO LA GEOMETRIA DEI DIVERSI RAMI DEL FIUME PO CHE CONFLUISCONO IN MARE. I RISULTATI SONO PROMETTENTI.

I modelli idrodinamici comunemente utilizzati per le previsioni operative marino-costiere devono garantire affidabilità e tempestività per rendere disponibili prodotti previsionali in tempo utile a consentire l'adozione di azioni preventive o risolutive durante gli eventi estremi. La Struttura IdroMeteoClima di Arpa (Simc) ha implementato e gestisce operativamente (una corsa al giorno) un modello per le previsioni del livello del mare e delle variabili oceanografiche (temperatura, salinità e correnti) a scala Adriatica (denominato Adriac), con una risoluzione costante di 1 km. Sebbene il modello sia in grado di risolvere i fenomeni oceanografici a grande scala, esso presenta limitazioni nel riprodurre alcune dinamiche a livello di sottobacino. Il delta del Po, ad esempio, rappresenta un'area di transizione molto complessa caratterizzata da batimetrie del fondale e geometrie morfologiche molto variabili e da particolari e delicati processi di interazione tra le caratteristiche idrologiche dei rami fluviali e le

dinamiche marine, come l'ingressione del cuneo salino.

Allo scopo di risolvere in modo accurato tali processi, nell'ambito di tre progetti europei strategici Interreg Italia-Croazia (AdriaClim, Stream e Cascade), Arpa ha collaborato con l'Istituto di scienze marine del Consiglio nazionale delle ricerche (Cnr-Ismar) e con l'Università di Bologna (Unibo) per lo sviluppo e l'implementazione di un modello agli elementi finiti ad altissima risoluzione della costa dell'Emilia-Romagna che include la parte terminale del fiume Po e il suo sistema deltizio.

## Sviluppo di un'implementazione locale agli elementi finiti

I modelli idrodinamici, nonostante siano oggi molto affidabili, presentano ancora diverse limitazioni che rendono la loro implementazione operativa una sfida, soprattutto per piccole scale e domini con

dinamiche particolari. Aree geografiche come il delta del Po, con le sue lagune e i suoi rami fluviali, rappresentano sistemi di transizione molto complessi, fortemente influenzati dagli aspetti locali di interazione *river-sea*.

In questo contesto, è necessario disporre di un modello ad alta risoluzione in grado di rappresentare adeguatamente i processi idrodinamici anche alle scale più piccole. Allo scopo di migliorare la rappresentazione del sistema lagunare e di transizione, è stato scelto di sviluppare una nuova modellistica numerica ad altissima risoluzione basata sul modello agli elementi finiti Shyfer (Umgiesser et al., 2004; <https://github.com/SHYFEM-model/shyfer>). Diverse collaborazioni tecnico-scientifiche nell'ambito di progetti nazionali e internazionali hanno permesso, negli ultimi tre anni, lo sviluppo e l'implementazione operativa di Shyfer, un modello idrodinamico della costa emiliano-romagnola che include il complesso sistema del delta del Po. L'utilizzo di un modello a elementi finiti



FOTO: R. BRANCQUINI - REGIONE ER

permette l'utilizzo di risoluzioni variabili degli elementi all'interno del dominio di calcolo, consentendo così di aumentare la risoluzione della griglia ove necessario, adattandosi al meglio alla morfologia locale e consentendo di rappresentare in modo più dettagliato e accurato la geometria dei diversi rami del fiume Po che confluiscono a mare. A differenza del modello Adriac, dove la portata nei diversi rami viene imposta tramite percentuali predefinite di ripartizione, in Shyfer è possibile imporre in ingresso la portata osservata (o prevista dai sistemi modellistici idrologici) del fiume Po presso la stazione di misura di Pontelagoscuro e lasciare che il modello propaghi e suddivida le portate nei diversi rami in maniera dinamica, fino a raggiungere il mare. È importante sottolineare l'importanza della corretta rappresentazione della portata del fiume Po, in quanto essa influenza direttamente la dinamica delle lagune e delle aree di transizione in generale, nonché la circolazione del mare Adriatico, principalmente nella sua porzione settentrionale.

Come visibile nella figura 1, Shyfer rappresenta le particolari caratteristiche topo-batimetriche dell'area in modo dettagliato, arrivando a una risoluzione di alcune decine di metri. L'obiettivo principale è quello di migliorare le previsioni idrodinamiche con particolare attenzione al livello del mare, ma anche quello di sviluppare diverse applicazioni del modello come ad esempio la previsione dell'ingressione del cuneo salino all'interno dei diversi rami del Po. Prima di renderlo operativo, sono stati condotti test di sensibilità e di calibrazione dei parametri allo scopo di raggiungere un set di parametri ottimizzato che rappresentasse in maniera più fedele i dati acquisiti dalle stazioni di misura presenti in Emilia-Romagna (nelle figure 1b e 1c alcune delle stazioni utilizzate nei test di sensibilità). Operativamente il modello viene forzato dai campi atmosferici previsionali del modello Cosmo, mentre gli output del modello Adriac vengono utilizzati come condizioni oceanografiche al contorno del dominio di calcolo. Per quanto riguarda i fiumi, attualmente l'impostazione operativa utilizza gli ultimi dati misurati nella stazione di Pontelagoscuro in termini di temperatura e portata per il Po, mentre per gli altri fiumi regionali vengono utilizzati valori climatologici. Inoltre, tre idrovore permettono l'ingresso di ulteriore acqua dolce all'interno della Sacca di Goro (Romanina, Giralda e Bonello, come visibile in figura 1c). Il modello è attualmente inserito

all'interno delle catene operative del Simc per le previsioni meteo-marine, ma è stato utilizzato anche per alcune applicazioni di dispersione di inquinanti microbiologici in mare e per la modellazione bio-geochimica della Sacca di Goro (accoppiandolo offline con il modello Bfm, Vichi et. al 2007; <https://bit.ly/bfm-model>). Si stanno infine approfondendo le capacità del modello di prevedere in maniera accurata e in specifiche condizioni ambientali, l'instaurarsi del cuneo salino, la sua struttura e la sua propagazione all'interno

dei diversi rami del fiume Po. I risultati sono promettenti e Shyfer potrebbe quindi rappresentare un utile strumento operativo di supporto alle decisioni nei periodi di magra, sempre più frequenti e severi negli ultimi anni, e le cui proiezioni climatologiche, purtroppo, indicano ulteriori intensificazioni in futuro.

**Luis Germano Biolchi, Silvia Unguendoli, Andrea Valentini**

Struttura IdroMeteoClima, Arpa Emilia-Romagna

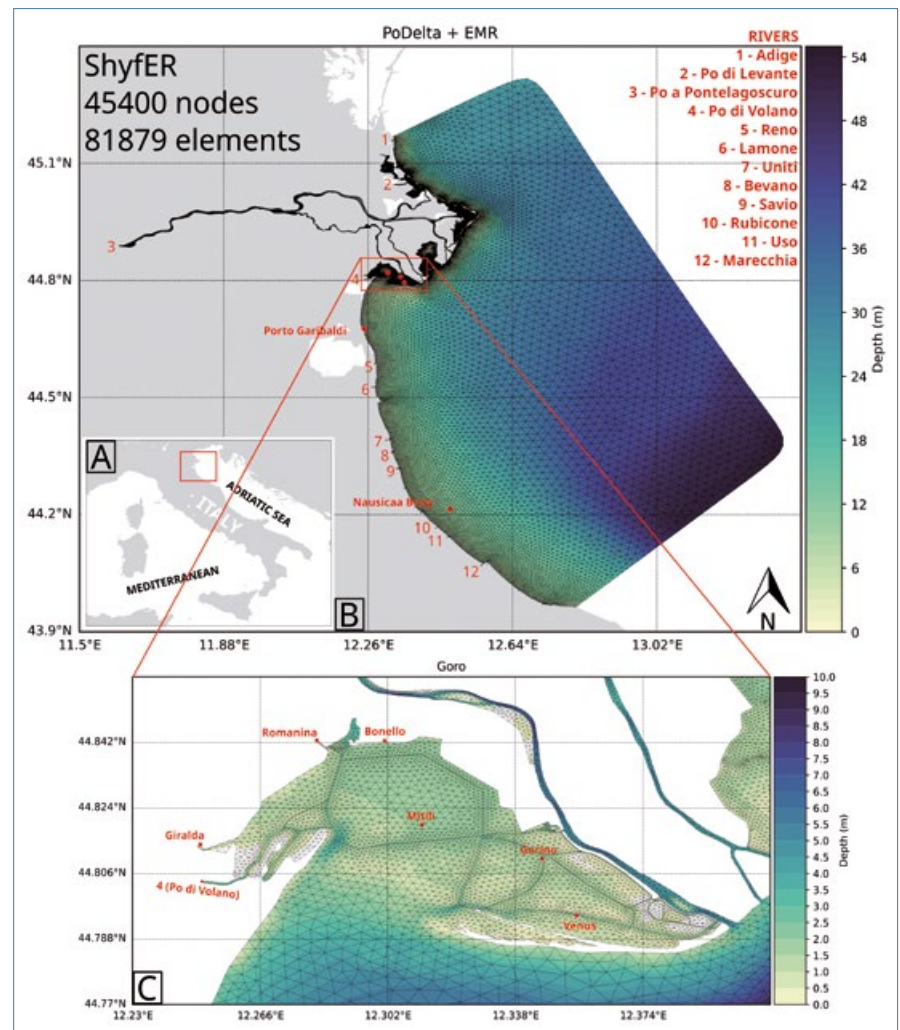


FIG. 1 MODELLO SHYFER

A) Posizione del dominio di calcolo di Shyfer.

B e C) batimetria e griglia di calcolo agli elementi finiti del dominio utilizzato per l'implementazione di Shyfer che mostra i 12 fiumi e le tre idrovore (Giralda, Romanina e Bonello) utilizzati ai confini idrologici e le diverse tipologie di stazioni utilizzate per i test di sensibilità: tre stazioni multiparametriche (Mitili, Gorino e Venus); un mareografo (Porto Garibaldi); e una boa ondometrica (Nausicaa).

### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Umgiesser G., Canu D.M., Cucco A., Solidoro C., 2004, "A finite element model for the Venice Lagoon. Development, set up, calibration and validation", *Journal of Marine Systems*, 51(1-4), pp. 123-145, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2004.05.009>.
- Vichi M., Pinardi N., Masina S., 2007, "A generalized model of pelagic biogeochemistry for the global ocean ecosystem. Part I: Theory", *Journal of Marine Systems*, 64(1-4), pp. 89-109, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2006.03.006>.

# IL MONITORAGGIO DELLA RISALITA DEL CUNEO SALINO

NEGLI ULTIMI ANNI PREOCCUPA L'INTRUSIONE DI ACQUA MARINA NEL DELTA DEL PO. I RISCHI MAGGIORI SONO PER L'AGRICOLTURA E L'APPROVVIGIONAMENTO ACQUEDOTTISTICO. MONITORARE E STABILIRE DEI LIMITI DI CONCENTRAZIONE DI SALINITÀ DEI RAMI DEL DELTA PERMETTE DI STABILIRE IN QUALI AREE POSSONO SORGERE DEI PROBLEMI.

**I**l fenomeno del cuneo salino è idraulicamente inquadrato nell'ambito delle cosiddette correnti di densità e consiste nell'intrusione di acqua salata marina, più densa rispetto all'acqua dolce, sia nella falda acquifera sia sul fondo dell'alveo fluviale in prossimità della foce di un fiume. In quest'ultimo caso la risalita dell'acqua marina verso monte è dovuta alla scarsa portata del fiume che non è in grado di contrastare la forza della marea. Si viene così a generare un cuneo di acqua salata che si insinua sul fondo del letto del fiume sotto l'acqua dolce più leggera che defluisce verso mare.

Tra i vari fattori che influenzano la risalita del cuneo salino ritroviamo: la subsidenza, l'eustatismo, la variazione del regime delle piogge, l'aumento delle derivazioni irrigue, il minor rilascio di

acqua dai bacini montani, l'abbassamento del fondo dell'alveo a causa del prelievo di inerti e il minore apporto di sedimenti dagli affluenti.

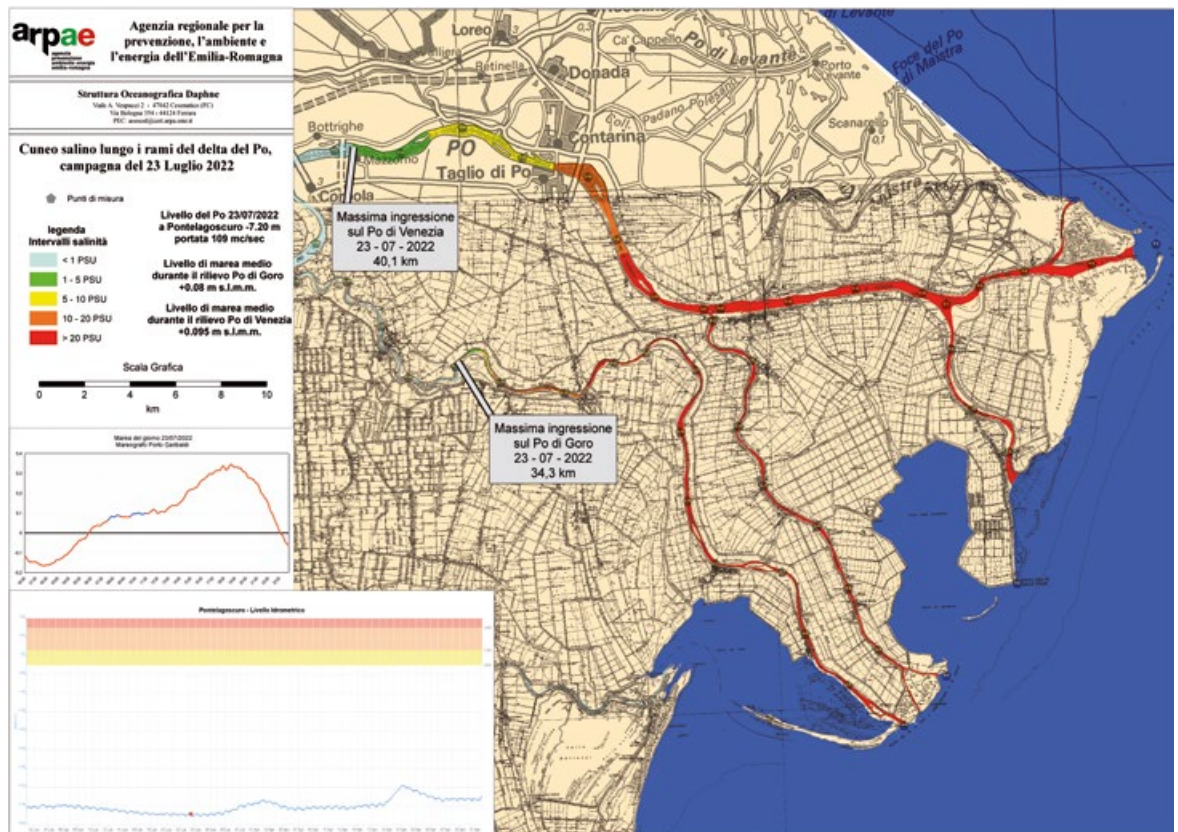
Le conseguenze si possono concretizzare nell'interruzione delle derivazioni irrigue e degli approvvigionamenti acquedottistici, con gravi inconvenienti per l'attività agricola e forte disagio per la popolazione, nell'inaridimento delle zone litoranee e nella salinizzazione delle falde superficiali.

assumendo negli ultimi decenni proporzioni sempre più preoccupanti: la problematica del cuneo salino che negli anni '30 si avvertiva solo per due o tre chilometri dalla foce si è progressivamente estesa a vari chilometri, soprattutto nei periodi caratterizzati da intense anomalie climatiche e da conseguenti apporti d'acqua dolce particolarmente scarsi.

Nel 2003 l'Europa fu colpita da una memorabile ed eccezionale, per intensità e durata, ondata di calore. La siccità che ne derivò impose al settore ambiente della Provincia di Ferrara di iniziare, anche con una certa lungimiranza, il monitoraggio del cuneo salino nei rami del delta che confluiscono nella Sacca di Goro, ambiente di notevole rilevanza naturalistica e rinomato per la produzione di vongole che qui

## Le attività di monitoraggio dal 2003 a oggi

Nel caso del Po questo fenomeno è quasi sempre presente ed è più o meno pronunciato nei vari periodi dell'anno,





trovano condizioni ottimali per il loro accrescimento. Tale attività nei rami del Po di Volano e del Po di Goro si è svolta successivamente ogni anno. Alla luce dei primi risultati, nel 2006 è stato abbandonato il monitoraggio sul Po di Volano in quanto regimato e utilizzato per scopi irrigui, con variazioni del cuneo salino non particolarmente influenzate dalle portate del Po a Pontelagoscuro (FE), per dare spazio alle campagne di monitoraggio sui restanti rami del delta (Po di Gnocca o della Donzella, Po di Tolle, Po di Pila e Po di Venezia).

Con la legge regionale dell'Emilia-Romagna n. 13/2015 tali funzioni sono passate in carico ad Arpae, che ha svolto rilievi nel 2016, 2017 e 2022, quest'ultimo anno caratterizzato ancora una volta da grave crisi idrica che ha colpito il bacino del Po. Nel periodo 2023-2025, infine, la rete di misura è stata e sarà mantenuta operativa grazie ai finanziamenti derivanti dall'accordo di collaborazione ex art. 15 L. 241/1990 stipulato con l'Autorità di bacino distrettuale del fiume Po per il monitoraggio a supporto dell'attuazione della direttiva 2000/60/Ce: Rete ambientale strategica del distretto del fiume Po (RasPo).

Dal 2022 i punti di monitoraggio sono individuati a partire dalle foci fluviali e sono equidistanti fra loro di circa 3 km risalendo i vari rami del delta. Le misure sono eseguite lungo tutta la colonna d'acqua per mezzo di una sonda multiparametrica (figura 2) con registrazione dei parametri di profondità, temperatura, salinità, ossigeno disciolto, pH, conducibilità e clorofilla. Per l'elaborazione dei dati finalizzata a stabilire la sezione di asta fluviale dove non c'è presenza di cuneo salino si è inizialmente considerato l'intervallo di salinità tra 0,5 e 2 psu riportato in letteratura e infine si è assunto come limite tra acqua dolce e acqua salmastra il valore di 1 psu, in quanto questa concentrazione salina costituisce un limite sopra il quale si possono verificare problemi per l'irrigazione. In altre parole si è fatta coincidere la fine del cuneo salino con la sezione dell'asta fluviale dove su tutta la colonna d'acqua il valore di salinità è inferiore a 1 psu.

Dai dati raccolti su ogni punto di monitoraggio è stato ricostruito il profilo verticale di salinità (figura 3), mentre per la successiva elaborazione planimetrica del cuneo salino nei rami del delta si

sono considerati i valori di salinità sul fondo alveo distinguendo tratti di fiume caratterizzati da salinità omogenea (intervalli di salinità riportati nella legenda alla figura 1). L'elaborazione dei dati raccolti fino a oggi mostra, come ci si attendeva, un'intrusione massima del cuneo salino raggiunta durante l'estate 2022 quando, nel mese di luglio, essa ha toccato picchi di 34,3 km nel Po di Goro e 40,1 km nel Po di Venezia in corrispondenza di una portata media giornaliera a

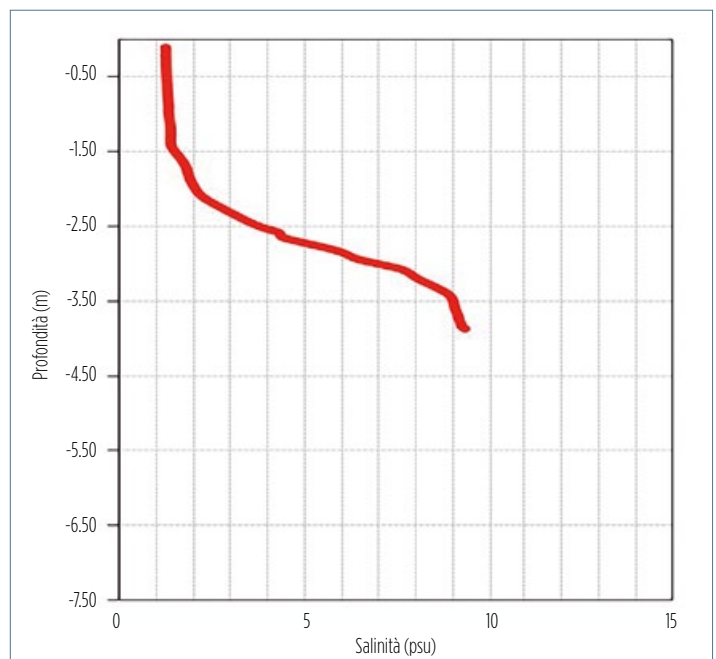
Pontelagoscuro (FE) prossima ai 110 m<sup>3</sup>/s, valore di molto inferiore al minimo storico di 156 m<sup>3</sup>/s del luglio 2006, a conferma che il 2022 è stato complessivamente un anno caratterizzato da un andamento meteorologico fuori dalla norma e con notevole persistenza di condizioni estreme.

**Saverio Turolla, Silvia Pigozzi**

Arpae Emilia-Romagna



**FIG. 2 MISURAZIONE**  
Attività di misura dei parametri chimico-fisici sui rami del delta tramite sonda multiparametrica.



**FIG. 3 SALINITÀ**  
Profilo verticale di salinità registrato in data 5 luglio 2023 sul Po di Goro a 6 km dalla foce.

# MONITORAGGIO DELL'ACQUIFERO COSTIERO SUPERFICIALE

L'ACQUIFERO COSTIERO DELL'EMILIA-ROMAGNA È NATURALMENTE SOGGETTO A UNA CONTAMINAZIONE DI ACQUE SALATE MARINE CHE RISCHIA DI COMPROMETTERE LA RISORSA IDRICA E DI METTERE A RISCHIO I DELICATI ECOSISTEMI PRESENTI LUNGO LA COSTA. DAL 2009 È ATTIVA UNA RETE PER IL MONITORAGGIO DELLO STATO DELLE ACQUE DI FALDA.

L'acquifero costiero superficiale (Acs) si sviluppa per 120 km da Goro (FE) sino a Cattolica (RN) e si estende nell'entroterra per una decina di chilometri nel ferrarese e ravennate, dove lo spessore è intorno ai 30 m, e per circa 1 km da Cesenatico al confine con le Marche, dove si assottiglia fino a 5-6 m (Bonzi et al., 2010). È costituito da depositi sabbiosi di ambiente marino, costiero e deltizio sedimentati durante il ciclo trasgressivo-regressivo olocenico. I depositi di piana alluvionale sottostanti ne costituiscono l'acquitarso basale, mentre verso l'entroterra i depositi fini alluvionali e deltizi recenti sigillano lateralmente e superiormente l'acquifero (figura 1). Stante questa successione stratigrafica l'acquifero è freatico dove le sabbie sono affioranti e confinato o semi-confinato



FOTO: PARCO DEL DELTA DEL PO

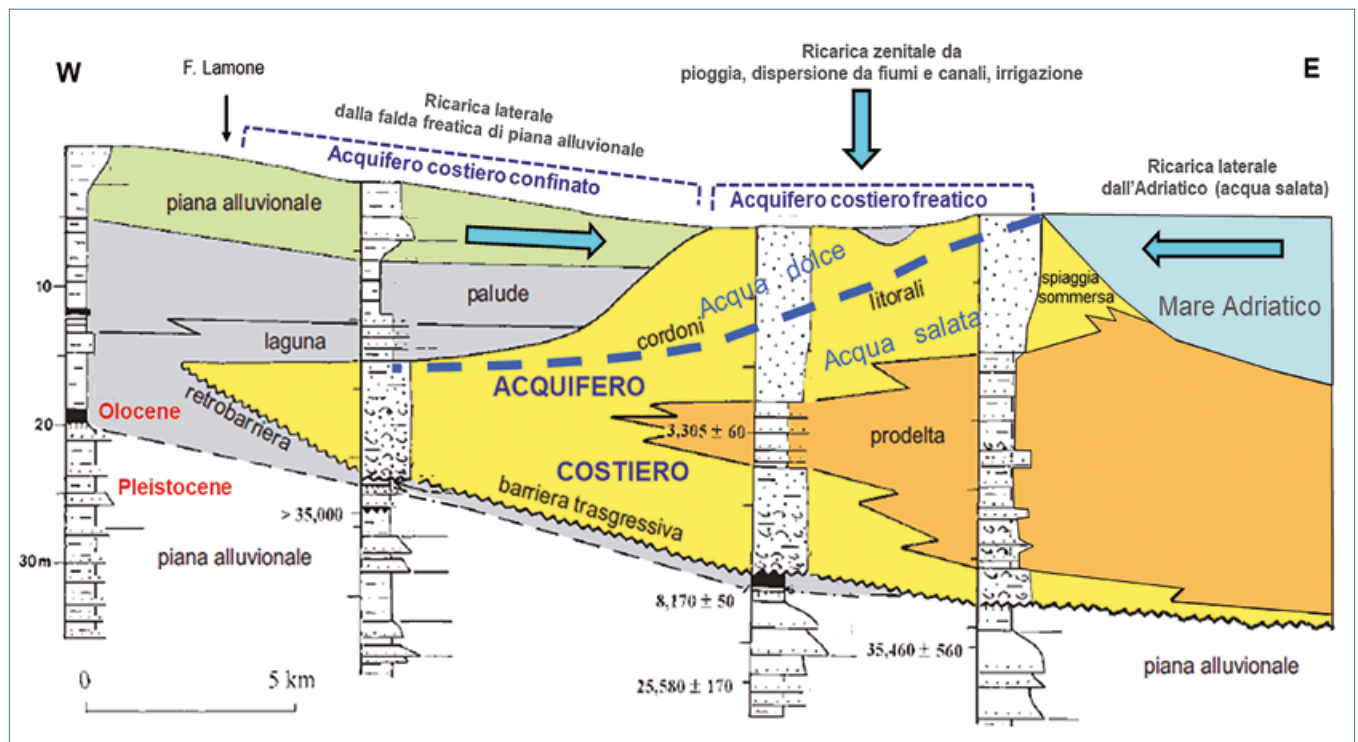


FIG. 1 ACQUIFERO  
Sezione geologica schematica nella costa ravennate; l'acquifero costiero è in giallo, le frecce indicano i principali termini della ricarica.  
Fonte: modificato da Ispra, 2002.

dove le sabbie sono sepolte sotto i sedimenti fini.

La ricarica avviene attraverso le precipitazioni, la dispersione da corpi idrici superficiali (fiumi e canali) e dalle falde della pianura alluvionale e deltizia. Verso mare, l'acquifero è direttamente a contatto con le acque dell'Adriatico, che filtrano naturalmente verso terra dove, essendo più pesanti delle acque dolci, si insinuano alla base dell'acquifero.

Dal 2009 la Regione Emilia-Romagna si è dotata di una rete di monitoraggio dedicata a questo acquifero, che attualmente consta di 24 piezometri (figura 2).

In ciascun piezometro sono rilevati il livello della falda e, per ogni metro di profondità, la conducibilità elettrica specifica (Ce in mS/cm) e la temperatura (T in °C).

I rilievi avvengono due volte all'anno, generalmente in primavera quando il livello di falda è massimo e in estate o autunno e quando il livello è minimo.

Le misurazioni evidenziano le seguenti casistiche:

- acqua di falda dolce lungo tutto il piezometro
- nella parte superiore acqua di falda dolce e nella parte inferiore salata e salmastra
- acqua di falda prevalentemente salata e salmastra con esiguo, o assente, "cappello" di acqua dolce.

Il limite tra le acque dolci e salate-salmaestre avviene in un intervallo di 1-3 m in cui la conducibilità varia bruscamente (figura 1).

I dati acquisiti dal 2009 al 2021 sono stati oggetto di un'analisi statistica con lo scopo di determinare lo stato e l'evoluzione delle acque di falda nel tempo, evidenziando l'eventuale presenza di tendenze dei valori misurati.

Il dataset disponibile, costituito da 17.362 misure, è stato analizzato suddividendo i dati in ogni punto di campionamento (Pc), ovvero per ogni metro di profondità a partire dalla quota della falda. Ogni Pc è stato descritto dal punto di vista statistico attraverso gli indicatori principali (valore minimo, massimo, media, mediana, deviazione standard). È stato ricostruito l'andamento della Ce e della T in profondità e nel tempo, sia per individuare eventuali variazioni stagionali sia per identificare trend annuali. Il test *Shapiro* ha permesso di verificare la "non normalità" dei dati, e di utilizzare test non parametrici per le elaborazioni successive, ovvero:

- *Kruskall Wallis e Wilcox test*, per confrontare e determinare la

FIG. 2  
RETE DI  
MONITORAGGIO

Punti della rete di monitoraggio dell'acquifero costiero. In blu il limite nell'entroterra dell'acquifero costiero, in giallo le aree dove l'acquifero è freatico (sabbie costiere affioranti).

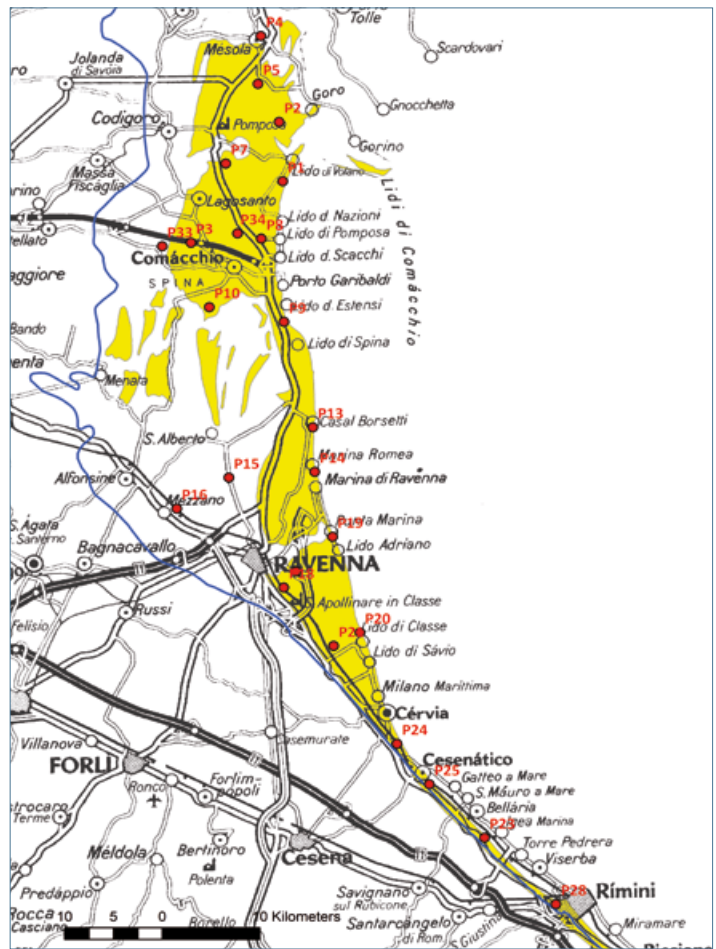
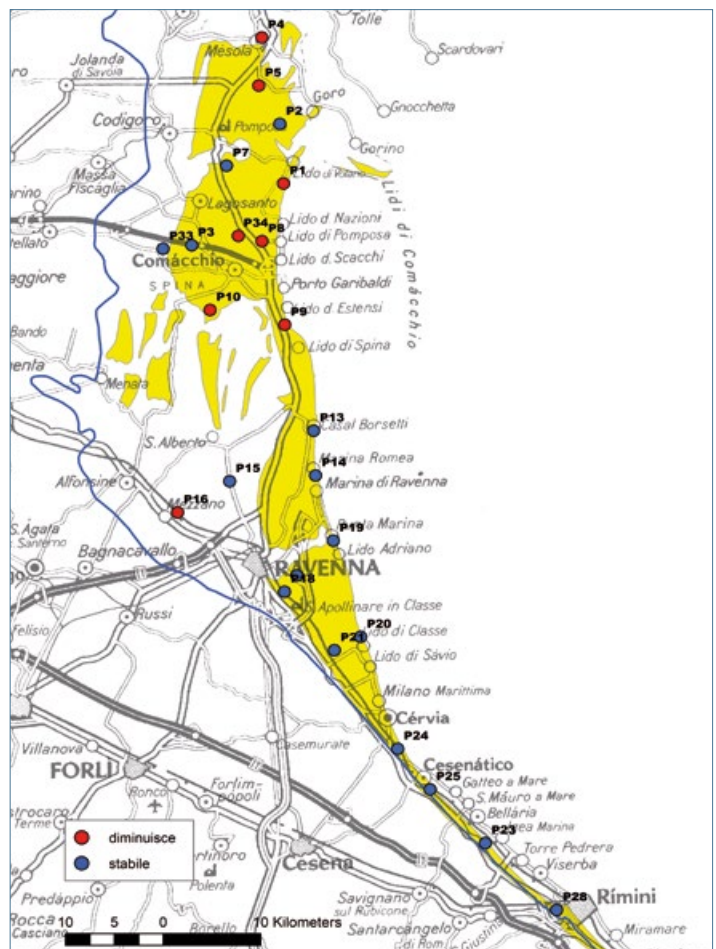


FIG. 3  
VARIAZIONE  
DEL LIVELLO

Variazione nel tempo del livello di falda.



significatività di eventuali scostamenti nelle distribuzioni dei dati, individuare la presenza di misure anomale, identificare il momento dal quale i dati si discostano in maniera significativa dai precedenti - *Mann-Kendall trend test* e il test della pendenza *Sen test*, per determinare se la Ce e la T su ogni piezometro e su ogni Pc sono cambiate nel tempo e in che modo - *Change point test* di Pettitt per ricercare il punto di flesso, corrispondente al momento in cui è avvenuto il cambio del valore medio per una data serie temporale.

Infine, la *cluster analysis* ha permesso di individuare raggruppamenti omogenei di piezometri, aventi valori di Ce simili nel tempo.

L'applicazione delle analisi sopra elencate ha restituito i seguenti risultati, sintetizzati anche in *tabella 1*.

**Livello di falda (figura 3)**

Nel periodo 2009-2021 il livello di falda è rimasto invariato in tutti i piezometri, tranne in sette, posizionati nella parte nord della costa e nell'interno del ravennate, dove il livello di falda è diminuito. Il maggiore abbassamento è avvenuto in P4 e P34 (rispettivamente del 68 e 61%).

**Spessore dell'acqua dolce (figura 4)**

Lo spessore dell'acqua dolce in ogni piezometro individua la profondità al di sopra della quale la Ce dell'acqua di falda è sempre uguale o minore di 2,5 mS/cm (corrispondente al valore limite delle acque utilizzabili per il consumo umano). Nel periodo 2009-2021 questo valore è pressoché costante in quasi tutti i piezometri, ed è massimo da Cervia verso Rimini, nell'entroterra ravennate e nella parte nord ovest del ferrarese. È minimo nei piezometri della costa sud del ravennate.

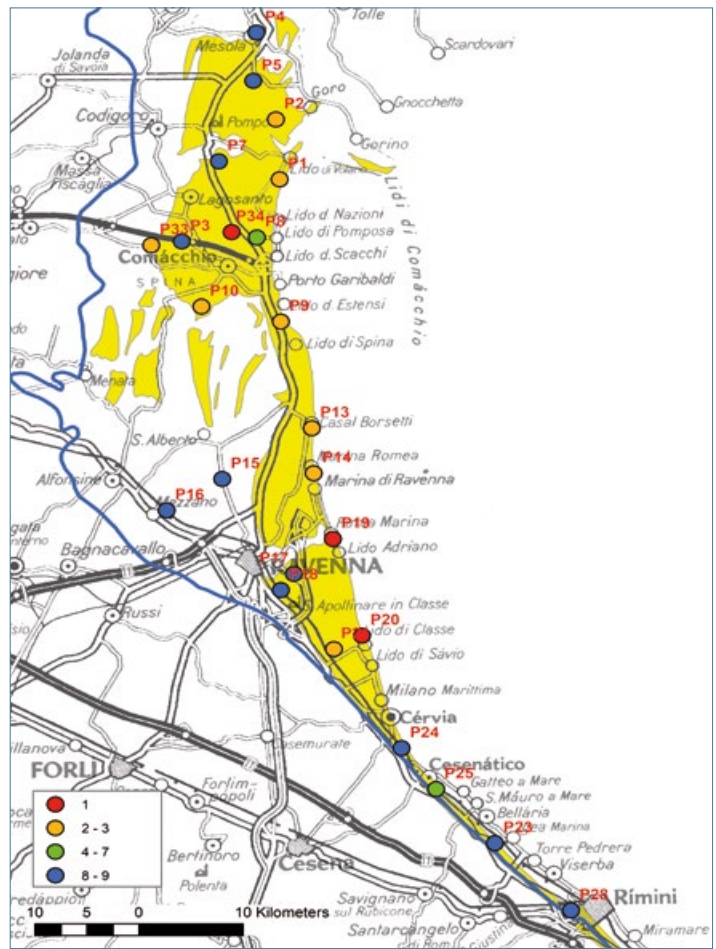
Variazione si osservano in: P9, da circa a 6 m di profondità a circa 2 m; P15, da circa a 2 m di profondità a circa 8 m; P18, da circa a 7 m di profondità a circa 8 m.

**Variazione della Ce nel periodo 2009-2021 (figura 5)**

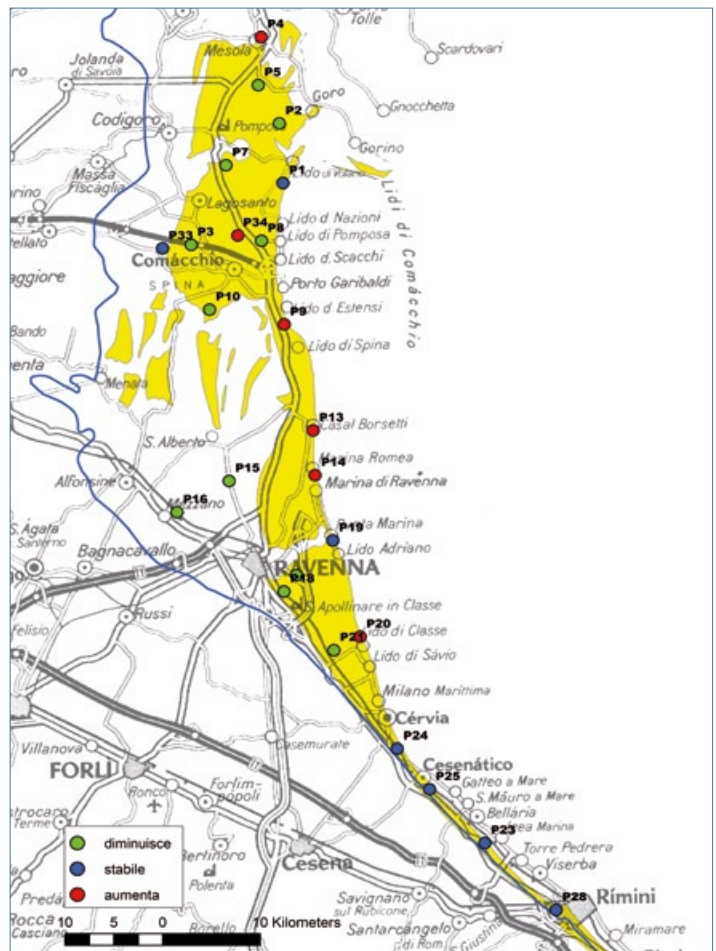
In 7 punti la Ce è aumentata (maggiormente in P9 e P14, rispettivamente del 93 e 46%), in 11 punti la Ce è diminuita (maggiormente in P16 e P8, rispettivamente del 120 e 101%), in 6 la Ce non ha subito variazioni.

**Variazione della T nel periodo 2009-2021**

La temperatura delle acque di falda risente, fino a 5-6 metri nel sottosuolo, delle variazioni stagionali; al di sotto



Spessore dell'acqua dolce (m da piano campagna).



Variazione della conducibilità elettrica (Ce).

rimane costante e vicina alla media della temperatura annua del luogo. In 8 punti, localizzati nella parte sud del ravennate sino al confine con le Marche, la T non ha mostrato variazioni di rilievo. In 16 punti nel ferrarese e nella parte nord del ravennate la T è sempre aumentata nei primi 5-6 metri di sottosuolo, il P8, P10, P33 e P34 hanno registrato un aumento in tutto lo spessore dell'acquifero. La T non è diminuita in nessun piezometro nel 2009 - 2021.

**Correlazioni tra variazioni di livello di falda, Ce e T**

Le variazioni nel periodo 2009-2021 delle 3 variabili analizzate non sono in genere correlate tra loro. Solamente in P4, P9 e P34 l'aumento della Ce si accompagna a una diminuzione del livello, e solo nel P34 ciò è anche accompagnato da un aumento della T. Nei piezometri vicini alla costa della zona centrale e settentrionale, l'aumento della Ce potrebbe indicare una maggiore ingressione di acqua marina, per riduzione della "ricarica dolce". La diminuzione della Ce in aree agricole potrebbe essere dovuta all'intensificazione dell'irrigazione, necessaria per far fronte all'aumento delle temperature e alla riduzione delle piogge degli ultimi anni. L'abbassamento del livello di falda è collegabile a una riduzione degli apporti meteorici utili alla ricarica e al generale riscaldamento, dovuti al cambiamento climatico in atto, così come l'aumento della T. È inoltre probabile che le variazioni osservate dipendano anche da condizioni di sito, legate al diverso uso del suolo e della gestione delle acque superficiali. La *tabella 1* sintetizza l'analisi statistica effettuata.

**Alessandra Aprea, Luciana Bonzi, Lorenzo Calabrese, Maria Carla Centineo, Jessica Lelli, Marcello Nolè, Pier Francesco Sciuto, Paolo Severi**

Regione Emilia-Romagna

	sigla	P1	P2	P3	P4	P5	P7	P8	P9	P10	P13	P14	P15
	<b>prof</b>	<b>12</b>	<b>17</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>14</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>9</b>	<b>15</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>14</b>
<b>Conducibilità</b>	gruppi	1	2	2	3	3	3	4	3	5	5	2	6
	☀	V	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	V
	M	X	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↑	↓	↑	↑	↓
	📄	X	'11	'11	'10	'11	'11	'13	'15	'11	'10	'13	'12
	%	0	31,6	25,2	8,7	28,3	32,7	101	93,6	21,8	5,3	45,8	3,3
	▼	≈2	≈2	≈8	≈9	≈8	≈9	2→6	8→2	≈3	≈2	≈2	2→8
	%	17	12	80	60	57	75	38	22	20	22	20	57
<b>Temp</b>	☀	V	V	V	V	V	V	V*	V	V*	V	V	V
	M	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	X
	📄	'15	'14	'15	'12	'12	'14	'15	'15	'11	'13	'13	X
<b>Livello</b>	M	↓	X	X	↓	↓	X	↓	↓	↓	X	X	X
	📄	'13	X	X	'13	'13	X	'13	'12	'13	X	X	X
	%	29	X	X	68	27	X	50	23	23	X	X	X

	sigla	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P23	P24	P25	P28	P33	P34
	<b>prof</b>	<b>18</b>	<b>15</b>	<b>18</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>21</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>22</b>	<b>14</b>
<b>Conducibilità</b>	gruppi	6	6	3	1	1	6	3	3	3	3	1	4
	☀	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	M	↓	↓	↓	X	↑	↓	X	X	X	X	X	↑
	📄	'14	'12	'11	X	'13	'11	X	X	X	X	X	'13
	%	120	31,5	18,4	0	16,6	29,6	X	X	X	X	X	15
	▼	7→8	7→8	7→8	≈1	≈1	≈2	≈9	≈8	≈7	≈9	≈2	≈1
	%	44	53	44	13	10	10	90	73	78	90	9	7
<b>Temp</b>	☀	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V*	V*
	M	↑	↑	↑	X	X	X	↑	X	X	X	↑	↑
	📄	'13	'13	'14	X	X	X	'13	X	X	X	'19	'14
<b>Livello</b>	M	↓	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	↓
	📄	'12	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	'14
	%	14	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	61

**TAB. 1 ANALISI STATISTICA**  
Sintesi dell'analisi statistica effettuata

**LEGENDA**

- prof = profondità del piezometro in metri
- gruppi = numeri da 1 a 6, raggruppamenti di punti con valori omogenei di Ce, individuati con la cluster analysis (1 indica valori di Ce più bassi, 6 valori di Ce più alti)
- ☀ = stagionalità (eventuale differenza tra letture periodo secco e piovoso)
- V = presenza di stagionalità; X = assenza di stagionalità
- M = variazione nel tempo di Ce, T e livello
- ↓ = diminuzione nel tempo; ↑ = aumento nel tempo; X = assenza di variazione
- 📄 = data in cui è avvenuta la variazione di Ce, T e livello; X = assenza di variazione
- % = differenza in percentuale tra i valori medi di Ce e il livello prima e dopo la variazione; X = assenza di variazione
- ▼ = spessore in m di acqua dolce (Ce≤2,5)
- ≈2 = circa 2 metri; 2→6 = lo spessore di acqua dolce passa mediamente da 2 a 6 m dopo la data della variazione
- % = percentuale dello spessore di acquifero saturo in acqua dolce
- V\* = variazioni stagionali della T anche a profondità maggiori di 5-6 m (in tutti gli altri casi la variazione avviene sempre, ma solo fino a 5-6 m)

**RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI**

Bonzi L., Calabrese L., Severi P., Vincenzi V., 2010, "L'acquifero freatico costiero della regione Emilia-Romagna: modello geologico e stato di salinizzazione", *Il Geologo dell'Emilia-Romagna*, 39, 21-34.

Ispra, 2002, *Carta geologica d'Italia in scala 1:50.000, Foglio 223 - Ravenna - Servizio geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.*

# CUNEO SALINO E SICCIÀ NELL'ACQUIFERO FERRARESE

IL MONITORAGGIO DELL'INGRESSIONE DEL CUNEO SALINO, SVOLTO DA ARPAE A PARTIRE DAL 2018 NELL'ACQUIFERO FREATICO COSTIERO DEL FERRARESE ATTRAVERSO MISURE STAGIONALI DEI LIVELLI DI FALDA, HA EVIDENZIATO CHE DURANTE LA SICCIÀ DEL 2022 IL FENOMENO HA INTERESSATO MAGGIORMENTE L'AREA PIÙ PROSSIMA AL DELTA DEL PO.

Uno dei principali aspetti che caratterizza gli acquiferi freatici costieri e i relativi ecosistemi acquatici e terrestri associati è l'equilibrio tra le acque dolci e quelle marine, dove queste ultime assumono con la profondità una geometria a forma di cuneo, che si approfondisce procedendo verso terra. La formazione del cuneo salino è pertanto un fenomeno naturale, dovuto alla diversa densità dell'acqua dolce continentale, più leggera, che sovrasta l'acqua salata marina, più pesante per il contenuto di sali disciolti. Si tratta dello stesso fenomeno che si osserva nei corsi d'acqua con sbocco sul mare e in generale nei corpi idrici superficiali di transizione. La profondità e l'inclinazione dell'interfaccia acqua dolce-salata all'interno dell'acquifero sono governati principalmente da fattori naturali, come ad esempio il regime delle precipitazioni e la ricarica degli acquiferi, che governano il livello delle falde rispetto al livello del mare e che tendono a impedire l'ingressione del cuneo salino, al contrario quando i livelli di falda sono bassi, non riescono a contrastare l'ingressione del cuneo salino verso terra. Anche alcuni fattori antropici possono influire sulle dinamiche di ingressione del cuneo salino, ad esempio i prelievi di acque negli acquiferi superficiali in grado di ridurre significativamente il livello delle falde, oppure attività di impermeabilizzazione del suolo che riducono la capacità di ricarica naturale degli acquiferi (Werner et al, 2013).

Per tale ragione, la valutazione dei potenziali effetti di ingressione del cuneo salino in falda determinato da cause antropiche è espressamente prevista dalla direttiva Acque (2000/60/CE) e dalla direttiva Acque sotterranee (2006/118/CE) nell'ambito della valutazione dello stato dei corpi idrici sotterranei. In Emilia-Romagna questo fenomeno è presente nel corpo idrico freatico di pianura costiero, che si sviluppa dal delta del Po per l'intera fascia



FOTO: ARCHIVIO FOTOGRAFICO REGIONE ER

costiera fino a Cattolica (Arpae, 2021; figura 1). Nella zona costiera ferrarese il corpo idrico sotterraneo ha la massima estensione terra-mare in corrispondenza delle valli di Comacchio, dove raggiunge 18 km circa dalla costa, e si assottiglia poco a sud di Ravenna fino al confine regionale, mantenendosi entro una fascia di ampiezza di 1 km circa. È costituito da sedimenti sabbiosi aventi spessori variabili che possono raggiungere anche i 20-25 m e che mediamente si attestano sui 10-15 m circa.

## Monitoraggio del cuneo salino in falda

Il monitoraggio del cuneo salino in falda è stato avviato in modo strutturato da Arpae a partire dall'anno 2018, come integrazione del monitoraggio regionale delle acque sotterranee, al fine di quantificare la variabilità naturale dell'ingressione del cuneo salino in relazione alle condizioni climatiche e alla presenza di fattori antropici. I principali obiettivi del monitoraggio sono:

- caratterizzare le variazioni stagionali della profondità dell'interfaccia acqua dolce e acqua salata anche in relazione alle condizioni climatiche e ai prelievi che insistono nell'acquifero freatico, al fine di discriminare condizioni naturali

da situazioni potenzialmente alterate da impatti antropici

- caratterizzare nel medio-lungo periodo le variazioni di profondità dell'interfaccia acqua dolce e acqua salata evidenziando l'instaurarsi di tendenze statisticamente significative di riduzione della profondità dell'interfaccia stessa.

Il monitoraggio del cuneo salino viene svolto attraverso misure stagionali dei livelli di falda, del profilo della conducibilità elettrica e della temperatura dell'acqua alle diverse profondità della falda costiera e si affianca al monitoraggio quantitativo e chimico dei corpi idrici sotterranei che avviene su un numero più consistente di stazioni di monitoraggio, tramite misure e campionamenti semestrali di acque sotterranee e determinazione analitica di contaminanti. La misura della conducibilità elettrica dell'acqua – riferita a 25 °C ed espressa in mS/cm – e della temperatura viene rilevata generalmente ogni 0,50 m di profondità e anche alle profondità dove si osservano variazioni repentine dei valori di conducibilità.

Il monitoraggio del cuneo salino lungo la costa ferrarese viene svolto in 6 stazioni di monitoraggio, che sono state individuate tra quelle più significative, utilizzate nelle precedenti attività di caratterizzazione svolte dalla Regione Emilia-Romagna (v. articolo di Severi et al. a p. 22), che permettono

di ricostruire l'andamento nel tempo del cuneo salino in falda in 3 transetti perpendicolari alla linea di costa (figura 1):

- transetto A, Bosco della Mesola
- transetto B, Spiaggia Romea
- transetto C, S. Giuseppe-Comacchio.

## I principali risultati ottenuti

I dati di monitoraggio del cuneo salino in falda possono essere rappresentati in diversi modi, in genere si riporta l'andamento della conducibilità elettrica con la profondità nei diversi periodi di monitoraggio, attraverso il quale è possibile confrontare la profondità alla quale si trova l'interfaccia acqua dolce-salata. In figura 2 si riporta un esempio della stazione di Bosco Mesola nella quale si può osservare il repentino incremento della conducibilità elettrica nel tratto di profondità da 7 a 9 m circa nei diversi periodi di monitoraggio, oltre questa profondità la conducibilità è tipica delle acque marine. Nel corso del 2022 e 2023 si osserva inoltre un incremento della conducibilità anche nella parte più superficiale della falda. Per verificare l'evoluzione nel tempo dell'interfaccia acqua dolce-salata, è preferibile rappresentare per ogni stazione la variazione nel tempo della profondità dell'interfaccia stessa in modo da caratterizzare l'ingressione stagionale del cuneo salino e valutare nel medio-lungo periodo se è presente una tendenza significativa all'ingressione del cuneo oppure se si tratta di un fenomeno ciclico stazionario.

Il monitoraggio svolto nelle stazioni del transetto A (Bosco della Mesola) evidenzia un'omogeneizzazione dei valori di conducibilità dalla superficie della falda fino a profondità variabili nel tempo da 7 a 11 metri con valori tendenzialmente crescenti di conducibilità elettrica dal 2018 al 2023 fino a raggiungere i

16 mS/cm (figura 3a). Nell'estate 2022 l'interfaccia acqua dolce-salmastra con l'acqua salata è stata individuata a 7,5 m di profondità vicino la costa (FE-F28-00), dove si assiste a una brusca variazione dei valori di conducibilità,

mentre nella stazione più interna rispetto alla costa (FE-F29-00) questa profondità si è ridotta a 4 m, in concomitanza con la registrazione del minimo storico del livello di falda. L'intrusione salina registrata in quest'area è derivante da

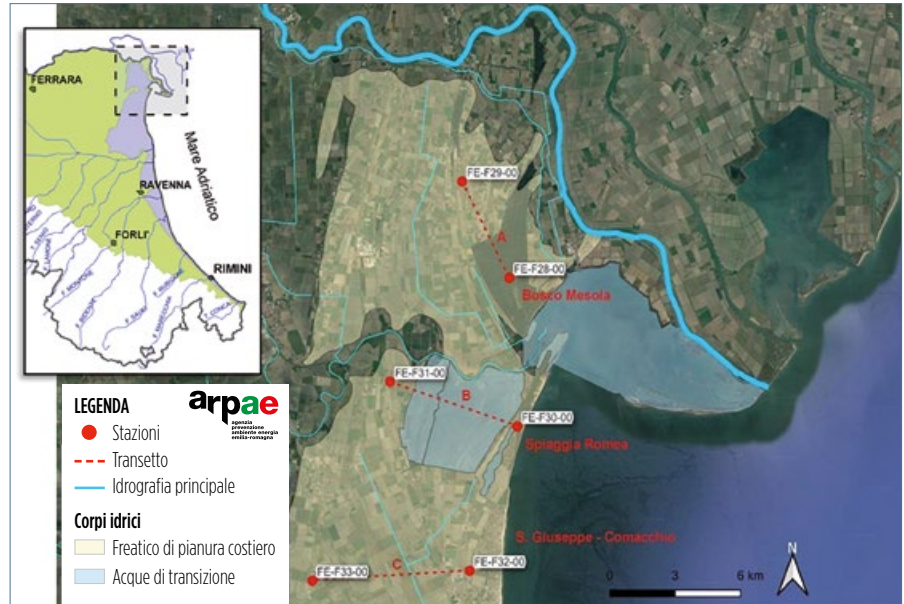


FIG. 1 MONITORAGGIO CUNEO SALINO  
Corpo idrico freatico costiero lungo la costa ferrarese e i 6 punti del monitoraggio del cuneo salino in falda.

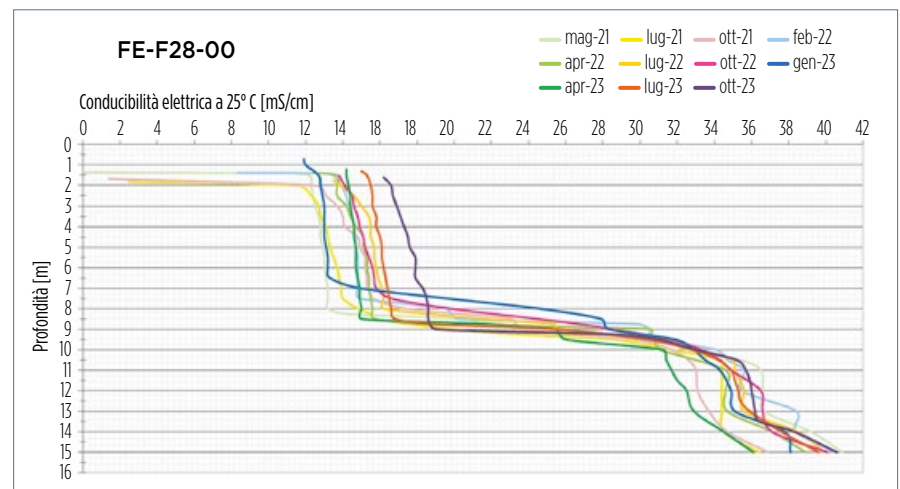


FIG. 2 STAZIONE DI BOSCO MESOLA  
Esempio di variazione della conducibilità elettrica in falda con la profondità nel periodo 2021-2023 (Stazione FE-F28-00).

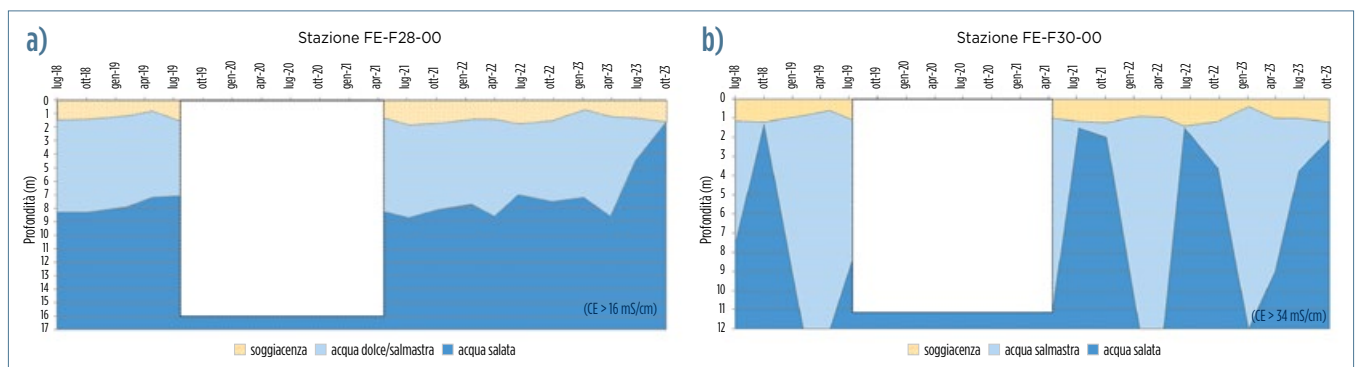


FIG. 3 TRANSETTI A E B  
Andamento nel tempo della profondità della falda e dell'interfaccia acqua dolce, salmastra e salata nella stazione lato mare del transetto A a sinistra e del transetto B a destra (2018-2023).

una serie di fattori, tra cui l'avanzamento del cuneo salino riscontrato nel 2022 nelle acque del fiume Po che ricarica l'acquifero lateralmente, il minore apporto di acqua dolce dovuto alle scarse precipitazioni nel 2022 e lo sfruttamento locale della falda a scopi irrigui o per attività antropiche.

Nel 2023 il fenomeno di salinizzazione è rientrato per la stazione più interna, mentre ciò non è avvenuto per la stazione prossima alla costa, dove si registra un trend statisticamente significativo dell'interfaccia acqua salmastra e salata (16 mS/cm) in incremento di 0,44 m/anno dal 2018 al 2023 (0,21 m/anno escludendo il 2023).

#### Nel transetto B (Spiaggia Romea)

l'intrusione del cuneo salino proveniente dal mare è fortemente condizionato dalla presenza delle valli, e in parte dal regime dei canali di irrigazione (figura 3b). In corrispondenza della stazione interna rispetto alla costa (FE-F31-00) l'interfaccia acqua dolce e acqua salmastra è stata individuata a circa 8 m di profondità, dove si ha una brusca variazione di conducibilità elettrica rispetto ai 2,5 mS/cm, dopo la quale si osserva l'interferenza delle acque marine. In questo punto di monitoraggio i livelli di conducibilità elettrica sono influenzati dalle acque di transizione di valle Cantone e valle Nuova e dalle acque superficiali provenienti dal bacino del fiume Po di Volano che alimentano la falda, diluendo e attenuando i valori di conducibilità elettrica e contribuendo a rendere omogeneo il valore di tale parametro per i periodi estivi, così come avvenuto durante il periodo di siccità del 2022. In corrispondenza della stazione lungo costa (FE-F30-00), in cui risulta assente la colonna di acqua dolce, si assiste a un'omogeneizzazione ciclica dei valori di conducibilità elettrica pari a 34 mS/cm, valore in questo punto interpretato come l'interfaccia acqua salmastra-salata che, nel luglio 2022, ha raggiunto il minimo storico di profondità di 1,5 m da piano campagna. Si osserva pertanto che il volume di acqua salmastra qui disponibile viene fortemente ridotto durante l'estate, sia a causa dell'ingressione del cuneo salino proveniente da mare sia a causa di un probabile aumento, nei mesi estivi, dell'evaporazione delle acque di transizione del lago delle Nazioni, valle Cantone e valle Nuova che conseguentemente risultano più salate e concorrono, seppure in misura minore, all'aumento dei valori di conducibilità elettrica nel punto monitorato.

Nel transetto C (San Giuseppe – Comacchio) l'interfaccia acqua dolce/salmastra e acqua salata si colloca dove la conducibilità elettrica varia bruscamente rispetto i 2,5 mS/cm per entrambi i punti di monitoraggio, e ciò avviene a circa 6,5 m di profondità nel punto più distante dalla costa e tra la superficie della falda e i 7 m da piano campagna nel punto lungo la costa (figura 4). Tuttavia, per queste stazioni di monitoraggio, in particolare per la stazione prossima all'abitato di San Giuseppe (FE-F32-00), risulta difficile rilevare l'intrusione del cuneo salino nei mesi estivi, in quanto il carico idraulico dei canali di irrigazione vicini ne contrasta l'ingressione.

### Le prospettive

Il monitoraggio del cuneo salino in falda, svolto a partire dal 2018 nell'acquifero freatico costiero ferrarese, risponde alle richieste delle direttive 2000/60/CE e 2006/118/CE in merito alla salinizzazione degli acquiferi e in particolare è funzionale a valutare la variabilità naturale dell'ingressione del cuneo salino marino in relazione alle condizioni climatiche. L'ingressione del cuneo salino marino interessa maggiormente l'area del Bosco della Mesola (transetto A), dove un aumento della conducibilità è determinato

periodicamente sia dal deflusso sotterraneo delle acque di ricarica provenienti dal fiume Po, esso stesso già interessato dalla risalita del cuneo salino marino, sia dall'ingressione del cuneo salino in falda proveniente direttamente dal mare. Nella stazione lato mare si osserva una tendenza persistente di medio periodo all'ingressione del cuneo salino in falda.

Situazione diversa si osserva più a sud, nella spiaggia Romea (transetto B), dove l'intrusione del cuneo salino proveniente dal mare è condizionato dalla presenza delle valli di Cantone-Nuova e del lago delle Nazioni, mentre in località San Giuseppe-Comacchio (transetto C) si riscontrano gli effetti legati alla presenza di acqua dolce all'interno dei canali di irrigazione, che contrasta efficacemente l'aumento della salinità nelle acque della falda superficiale.

Queste prime evidenze dell'ingressione del cuneo salino marino nella prima falda freatica costiera del ferrarese evidenziano che il fenomeno in generale è stagionale e non persistente nel tempo. Solo in una limitata zona del Bosco della Mesola il fenomeno è caratterizzato da una ingressione significativa e persistente del cuneo salino marino negli ultimi anni.

**Marco Marcaccio, Manuela Mengoni**

Arpae Emilia-Romagna

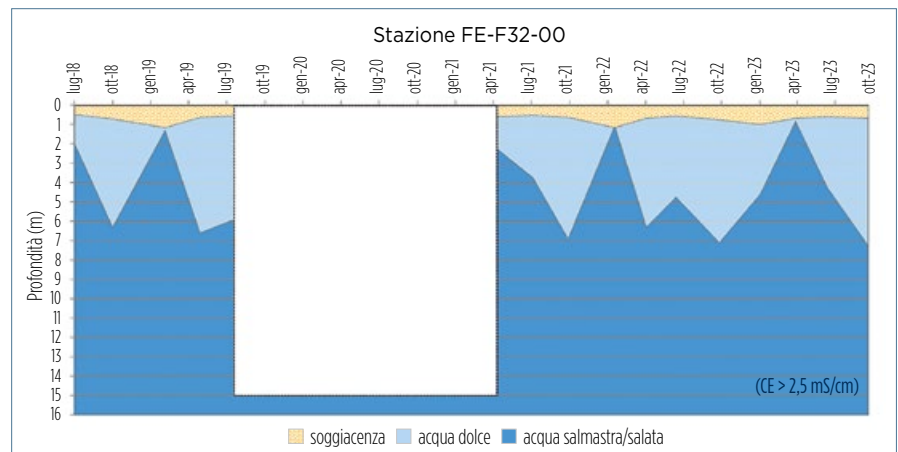


FIG. 4 TRANSETTO C

Andamento nel tempo della profondità della falda (soggiacenza) e dell'interfaccia acqua dolce/salmastra e salata nella stazione lato mare del transetto C (2018-2023).

### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Arpae Emilia-Romagna, 2021. "Valutazione dello stato delle acque sotterranee 2014-2019", a cura di M. Marcaccio e D. Lucchini, Bologna, 114 pp., <https://bit.ly/arpae-acque-sott-2014-2019>

Werner A.D., Bakker M., Post V.E., Vandenbohede A., Lu C., Ataie-Ashtiani B., Craig T.S., Barry D.A., 2013, "Seawater intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges", *Adv Water Resour*, 51: 3-26.



# SALINIZZAZIONE E MINACCE PER L'AGRICOLTURA

L'UNIVERSITÀ DI PADOVA HA AVVIATO NEL 2022 UNA RICERCA, FINANZIATA CON IL PNRR, PER MONITORARE L'IMPATTO DI SICCIÀ E RISALITA DEL CUNEO SALINO SULLE COLTURE DEL DELTA. IL PROGETTO, IN COLLABORAZIONE CON IL CONSORZIO DI BONIFICA DELTA DEL PO, PROPONE PER LA PRIMA VOLTA UN APPROCCIO INTEGRATO DI RACCOLTA ED ELABORAZIONE DEI DATI.

L'area del comprensorio del Consorzio di bonifica Delta del Po, delimitata da un reticolo di canali e isole, si estende per 62.780 ettari e rappresenta una delle aree a maggiore vocazione agricola della pianura Padana. Secondo le stime più recenti, circa il 70% del territorio del delta è costituito da superfici agricole, prevalentemente rappresentate da seminativi. A questi si aggiungono le valli da pesca, che trovano un ambiente ideale nelle acque salmastre marginali, dove il mare si mescola all'acqua dolce del Po. Proprio la vocazione agricola di questo territorio costituisce anche un elemento di enorme vulnerabilità nell'attuale contesto dei cambiamenti climatici e del verificarsi di fenomeni di intrusione del cuneo salino fino a 40 km nell'entroterra.

## Gli effetti della risalita del cuneo salino nel comparto agricolo

La conseguenza primaria dell'intrusione del cuneo salino nelle aree agricole costiere è la salinizzazione dei suoli, che si manifesta con un accumulo di sali nella soluzione circolante. Tale processo può avvenire sia a causa della diretta irrigazione con acqua salmastra, sia a causa di fenomeni di risalita capillare e infiltrazione laterale che, nel caso del delta del Po, è facilitata da un piano campagna al di sotto del livello del mare e da una tessitura con elevate percentuali di argilla e limo.

La salinizzazione ha un notevole impatto negativo sulla produzione agricola, in quanto la maggioranza delle specie coltivate risulta sensibile allo stress salino, che può danneggiare irreversibilmente i processi metabolici e compromettere lo sviluppo vegetativo. In aggiunta, la salinizzazione può alterare la struttura dei suoli e l'attività dei microorganismi che li popolano, portando nei casi più estremi



FOTO: A. GHIRARDELLI

1 a una drastica riduzione del contenuto di sostanza organica e a veri e propri fenomeni di micro-desertificazione (foto 1). Inoltre, lo stress salino, che spesso si presenta in concomitanza con le temperature elevate e i periodi prolungati di siccità estivi, può indebolire le colture anche in modo indiretto, favorendo la proliferazione di microorganismi e insetti nocivi e di piante infestanti, più adattabili agli stress abiotici e più competitive rispetto alle specie vegetali coltivate [1].

Malgrado i fenomeni di intrusione del cuneo salino in periodi estivi siano noti e testimoniati nell'area del delta almeno dai primi anni Duemila, grazie alle campagne di monitoraggio effettuate dalle Agenzie regionali per la protezione ambientale del Veneto e dell'Emilia-Romagna, nonché a quelle del Consorzio di bonifica Delta del Po, lo studio metodico si è concentrato sulle acque, e non direttamente sul comparto agricolo, nonostante esso sia il principale settore produttivo danneggiato [2]. Tuttavia, l'intensificazione dei fenomeni di siccità estiva, culminata con l'episodio estremo della primavera-estate 2022, ha gettato luce sulla necessità di indagare in maniera più approfondita l'impatto del cuneo salino sull'agricoltura del delta [3,4].

## Monitoraggio dell'impatto, la ricerca dell'Università di Padova

In questo contesto, nascono le ricerche del dipartimento Territorio e sistemi agro-forestali (Tesaf) dell'Università degli studi di Padova. Nel 2022 è stato avviato un progetto di ricerca finanziato dai fondi del Piano nazionale di ripresa e resilienza Agritech (*spoke 4, work package 4.2, task 4.2.2*), con l'obiettivo di monitorare l'impatto della siccità e dell'intrusione del cuneo salino sulle colture del delta, in collaborazione con il Consorzio di bonifica Delta del Po. Il progetto, di durata quadriennale, si propone per la prima volta un approccio integrato di raccolta ed elaborazione di dati su più livelli: l'impiego di tecniche di *remote sensing* per stimare lo stato generale di salute della vegetazione, sia a scala regionale sia aziendale, la ricostruzione storica dei cambiamenti d'uso suolo e dell'ordinamento culturale, il prelievo e l'analisi periodica di campioni di suolo, con la contestuale

1 Superficie coltivata a mais nella località di Scardovari (Porto Tolle, RO), dove sono evidenti tracce di micro-desertificazione in prossimità del canale irriguo.

misura in situ della conducibilità elettrica (Ec) e dell'umidità tramite la tecnica della *time domain reflectometry* (Tdr) e, infine, l'installazione di sensori a terra per il monitoraggio in continuo della Ec, della temperatura e dell'umidità dei suoli a profondità multiple. Mentre le indagini su scala regionale sono riferite all'intero comprensorio del Consorzio di bonifica Delta del Po, per i campionamenti e le misure puntuali sono state individuate otto aree studio nel comune di Porto Tolle (figura 1), il più esteso del delta e fortemente colpito dalle problematiche di intrusione del cuneo salino. Nel 2023 è iniziata la prima raccolta di campioni, effettuata da giugno a settembre ogni due settimane, che sarà ripetuta nei prossimi anni. I suoli raccolti saranno analizzati per determinare la tessitura, la Ec degli estratti acquosi, il contenuto di ioni sodio e cloruro, e il rapporto di adsorbimento del sodio (Sar).

Una delle principali tecniche di monitoraggio a larga scala dello stress salino sulla vegetazione si avvale di immagini satellitari ad alta risoluzione

acquisite tramite sensori multispettrali, dalle quali è possibile calcolare il *Normalized difference vegetation index* (Ndvi), un indice di vigoria della vegetazione che permette di identificare le aree maggiormente impattate dal cuneo salino. Una recente pubblicazione [5] ha messo in relazione i valori interpolati di salinità nell'acqua del delta, ricavati dalle misure puntuali effettuate nell'estate 2006 dal Consorzio di bonifica Delta del Po, con i valori di Ndvi calcolati a partire dalle immagini multispettrali relative allo stesso periodo. I risultati, filtrati selezionando i valori di Ndvi solo nei campi coltivati, hanno dimostrato che la vigoria vegetale nelle aree prossime ai tratti fluviali è statisticamente inferiore (Ndvi più basso) rispetto alle aree lontane, meno affette dalla salinità dell'acqua (figura 2). Analogamente, le indagini condotte nella stagione primaverile-estiva 2022 e 2023 hanno mostrato una tendenza delle colture a presentare valori bassi di Ndvi, corrispondenti a una scarsa vigoria vegetale, in prossimità dei tratti fluviali (figura 3). È da notare che questo gradiente risulta più facilmente

osservabile nei periodi in cui a parità di salinità non c'è eccessiva carenza idrica, mentre è meno apprezzabile nei periodi con temperature elevate e prolungata siccità. Questo perché la carenza idrica e le alte temperature sono ulteriori elementi di stress per le colture, e possono tradursi in valori più bassi di Ndvi anche lontano dalle sponde del fiume. L'elaborazione di dati in serie temporali ampie è quindi fondamentale per l'individuazione delle aree più critiche, la cui vegetazione presenterà un minore vigore anche in periodi non siccitosi.

Le colture primaverili-estive, il cui apice vegetativo coincide generalmente con l'avanzata del cuneo salino, sono le più esposte alle problematiche di salinità e di carenza di acqua irrigua. Ciò ha almeno in parte influito sulle scelte colturali delle aziende del Consorzio, che dal 2015 hanno visto un incremento delle superfici a grano, la coltura autunno-vernina più diffusa nel comprensorio e una netta riduzione delle superfici a riso, una coltura estiva distintiva della zona ma con un fabbisogno idrico estremamente

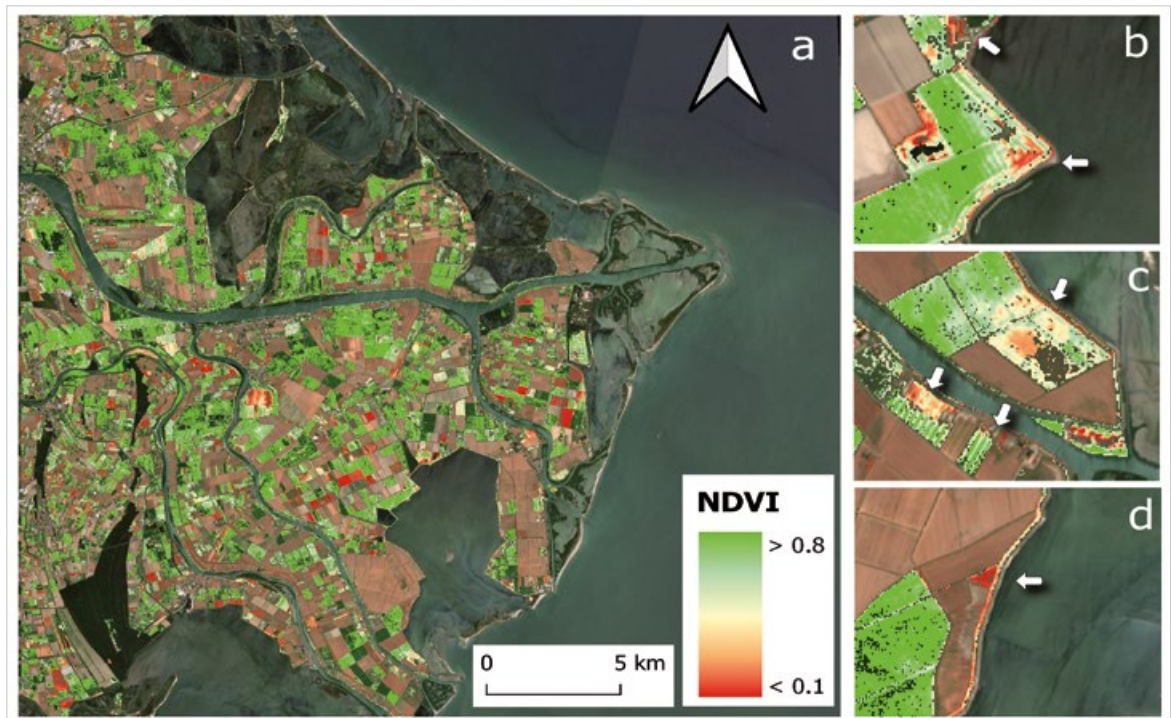


FIG. 1 MONITORAGGIO IMPATTO SALINIZZAZIONE  
 (a) Posizione geografica dei siti di campionamento all'interno del territorio del Consorzio di bonifica Delta del Po.  
 (b) (c) Campagna di rilievi dell'estate 2023.

FOTO: V. BALDANI E A. GHIRARDELLI

FIG. 2  
INDICE NDVI

Luglio 2023, aree coltivate dell'intero comprensorio del delta del Po (a) e in aree ingrandite (b), (c), (d), dove è possibile osservare un gradiente di Ndvi (Normalized difference vegetation index) in funzione della distanza dall'acqua.



elevato [6]. Il futuro del settore agricolo del delta è quindi strettamente vincolato all'evoluzione dei cambiamenti climatici.

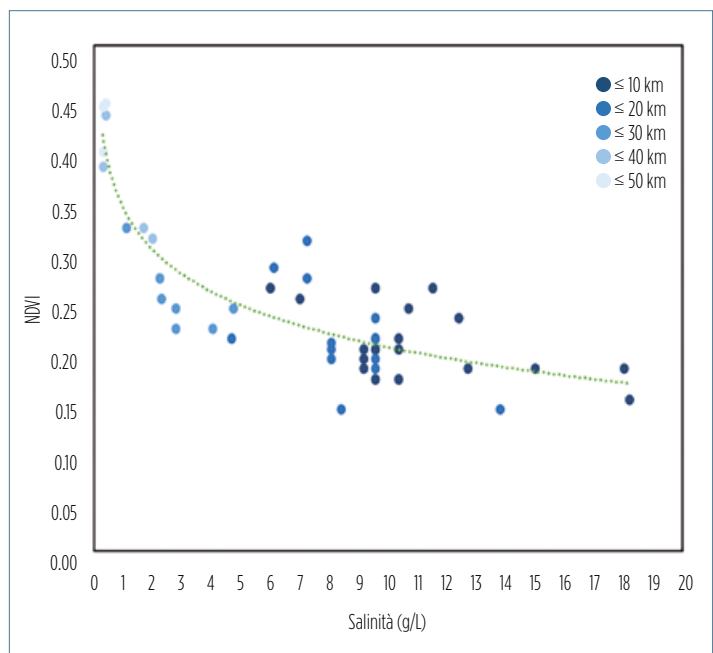
L'elaborazione dei dati relativi alle campagne di rilievi 2023, 2024 e 2025 punta quindi a raggiungere tre principali obiettivi: l'individuazione degli *hotspot* di salinizzazione nelle aree agricole del delta con l'elaborazione di mappe di rischio; la pubblicazione di indicazioni operative di supporto agli agricoltori per la gestione e mitigazione del rischio anche con soluzioni basate sulla natura (*nature-based solutions*) [7]; la raccolta di linee-guida per i decisori politici responsabili della gestione territoriale.

**Paolo Tarolli, Aurora Ghirardelli**

Dipartimento Territorio e sistemi agro-forestali, Università degli studi di Padova

FIG. 3  
NDVI E SALINITÀ

Relazione tra Ndvi medio e salinità dell'acqua del Po nell'estate 2006. All'aumentare della salinità, l'Ndv risulta inferiore, mostrando un peggioramento delle condizioni vegetative. I valori di Ndv sono anche raggruppati in funzione della distanza dall'acqua, come mostrato dal gradiente di colori dei cerchi. La curva tratteggiata rappresenta una linea di tendenza logaritmica. Elaborazione da: Luo et al. 2023 [5].



## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] Cirillo V., Masin R., Maggio A., Zanin G., "Crop-weed interactions in saline environments", *Eur. J. Agron.*, 2018, 99, 51-61, doi:10.1016/J.EJA.2018.06.009.

[2] Bellafiore D., Ferrarin C., Maicu F., Manfè G., Lorenzetti G., Umgiesser G., Zaggia L., Levinson A.V., "Saltwater intrusion in a Mediterranean Delta under a changing climate", *J. Geophys. Res. Ocean.*, 2021, 126, e2020JC016437, doi:10.1029/2020JC016437.

[3] Tarolli P., Luo J., Straffellini E., Liou Y.-A., Nguyen K.-A., Laurenti, R., Masin R., D'Agostino V., "Saltwater intrusion and climate change impact on coastal agriculture", *Plos Water.*, 2023, 2, e0000121, doi:10.1371/journal.pwat.0000121.

[4] Montanari A., Nguyen H., Rubineti S., Ceola S., Galelli S., Rubino A., Zanchettin D., "Why the 2022 Po river drought is

the worst in the past two centuries", *Sci. Adv.*, 2023, 9, 1-9, doi:10.1126/sciadv.adg8304.

[5] Luo J., Straffellini E., Bozzolan M., Zheng Z., Tarolli P., "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.*, 2023, In press, doi:10.1016/j.iswcr.2023.09.009.

[6] Avepa, "Piano d'azione per l'energia sostenibile ed il clima", [www.avepa.it/paesc](http://www.avepa.it/paesc).

[7] Tarolli P., Luo J., Park E., Barcaccia G., Masin R., "Soil salinization in agriculture: Mitigation and adaptation strategies combining nature-based solutions and bioengineering", *iScience*, 2024, 27, 108830, doi:10.1016/j.isci.2024.108830.