

# Gli impatti dei cambiamenti climatici sulle acque sotterranee e superficiali

Contributi dei relatori  
al seminario  
del 27 ottobre 2023  
Firenze, Palazzo Sacratì



# Gli impatti dei cambiamenti climatici sulle acque sotterranee e superficiali

Contributi dei relatori  
al seminario  
del 27 ottobre 2023  
Firenze, Palazzo Sacrati

Firenze,  
marzo 2024

## **Gli impatti dei cambiamenti climatici sulle acque sotterranee e superficiali**

Contributi dei relatori al seminario del 27 ottobre 2023

Firenze, Palazzo Sacratì - Piazza Duomo 10

A cura di:

ARPAT Settore Comunicazione, informazione e documentazione

Autrici:

*Stefania Calleri, Maddalena Bavazzano, Simona Cerrai -*

ARPAT Settore Comunicazione, informazione e documentazione

Editing e copertina:

ARPAT, Settore Comunicazione, informazione e documentazione



ARPAT 2024

## Indice

Gli impatti dei cambiamenti climatici sulle acque sotterranee e superficiali.....	5
Alterazioni globali e impatti sul clima del Mediterraneo.....	6
I cambiamenti climatici e gli impatti sull'acqua.....	8
L'acqua al centro della crisi climatica.....	10
Effetti reali e potenziali dei cambiamenti climatici sulle acque sotterranee.....	13
Dinamiche di infiltrazione di sostanze indesiderate nell'acquifero della Val di Chiana.....	15
Il monitoraggio dell'arsenico nelle vulcaniti amiatine.....	17
Acquifero della Montagnola Senese: analisi preliminare dei dati di monitoraggio per una gestione sostenibile della risorsa.....	18
Cambiamenti climatici e dispersione di contaminanti: il caso del fiume Paglia.....	20
Specie aliene nelle acque dolci della Toscana.....	22
Impatti del cambiamento climatico sul comparto della pesca al gamberetto in Quebec.....	25

# Gli impatti dei cambiamenti climatici sulle acque sotterranee e superficiali

Il 27 ottobre 2023, a Firenze, ARPAT, LaMMA e Regione Toscana hanno organizzato un seminario dal titolo “Gli impatti dei cambiamenti climatici sulle acque sotterranee e superficiali”.

La stabilità che ha caratterizzato il clima negli ultimi diecimila anni è venuta meno negli ultimi cinquant'anni, creando effetti che sono sotto gli occhi di tutti, basti pensare agli eventi estremi che ormai caratterizzano il nostro quotidiano. Il significativo discostamento dal modello meteorologico medio influenza in modo significativo la qualità delle varie matrici ambientali, in particolare le acque, che risultano oggi fortemente influenzate anche dalle pressioni indirette legate ai cambiamenti climatici.

In questo contesto si impone una riflessione

- sulla capacità degli indicatori attualmente in uso di rappresentare in modo esaustivo le dinamiche ambientali contemporanee
- sull'esigenza impellente di studiare nuovi indicatori e nuove strategie di adattamento.

Di seguito si riportano i contributi dei diversi relatori del seminario.

# Alterazioni globali e impatti sul clima del Mediterraneo

Pietro Rubellini - *Direttore generale ARPAT*

Fra le più vaste correnti che compongono la circolazione globale oceanica c'è il capovolgimento meridionale della circolazione atlantica, "Atlantic meridional overturning circulation", che gli studiosi abbreviano in "Amoc". Si tratta di un flusso che trasporta acqua calda dall'equatore verso le regioni settentrionali dell'oceano Atlantico, flusso del quale fa parte anche la corrente del Golfo. Quest'ultima, lunga circa 10.000 km, è una delle più ampie e potenti correnti oceaniche del pianeta: la sua presenza è di vitale importanza soprattutto per le regioni dell'Europa settentrionale e centrale ed anche per il Mediterraneo. Queste aree dipendono da questa corrente di acqua calda equatoriale per mantenere la propria condizione climatica relativamente mite.

La corrente del Golfo dell'oceano Atlantico è una componente regolatrice del sistema meteorologico mondiale ed è capace di incidere tanto sul clima europeo quanto su quello americano. Recenti studi avvertono che nel prossimo futuro la stabilità climatica che abbiamo conosciuto potrebbe diventare solo un ricordo. La modifica dell'"Amoc" può indurre pesanti cambiamenti, tra cui la modificazione delle dinamiche del sistema degli anticicloni sul Mediterraneo, in particolare il rapporto tra anticicloni sub-sahariani e atlantici. Non siamo di fronte a un fatto nuovo, infatti, si tratta di un fattore previsto dai modelli climatici, come quelli dell'Intergovernmental panel on climate change (di seguito Ipcc), l'ente scientifico intergovernativo a supporto della Conferenza Onu sul cambiamento climatico. A questo si aggiunge, la scoperta da parte degli scienziati, nell'Atlantico settentrionale, a sud della Groenlandia, di una "cold blob", una sorta di anomala macchia fredda che ha effetto sulla corrente che raffreddandosi troppo, rallenta la sua corsa e, di conseguenza, altera il complesso sistema climatico nel quale viviamo. A generare la massa di acqua fredda, è il ghiaccio della Groenlandia che, sciogliendosi, si mescola all'acqua marina, portandola a temperature vicino allo zero, e immettendo acqua dolce che presenta una densità inferiore. Questo impedisce alle correnti d'acqua, così modificate, di inabissarsi e causa il rallentamento della corrente che alimenta la cella atlantica.

Le teorie più accreditate in ambito scientifico ritengono che il raffreddamento e il rallentamento dell'Amoc avvenga per la fusione dei ghiacciai della Groenlandia, che si sciolgono per effetto del cambiamento climatico generato dalle attività umane. Inoltre, il rallentamento dell'inversione della circolazione atlantica potrebbe alterare anche il regime globale delle piogge, a causa della ridotta evaporazione delle acque oceaniche nelle zone divenute più fredde, con l'effetto di modificare gli impatti e la frequenza degli eventi meteorologici estremi.

Il matematico e meteorologo Edward Lorenz diceva: "Può un battito d'ali di una farfalla in Brasile causare un tornado in Texas?". La risposta è positiva, infatti,

l'interconnessione che caratterizza il nostro pianeta fa sì che “quello che accade in una parte del mondo non ha mai effetti solo locali, ma ha sempre ripercussioni più o meno globali.

Presentazione dell'intervento: <https://www.arpat.toscana.it/documentazione/presentazioni-convegni/rubellini-introduzione-acque-e-clima-27102023.pdf>



# I cambiamenti climatici e gli impatti sull'acqua

Bernardo Gozzini - *Amministratore unico Consorzio LaMMA - Laboratorio di Meteorologia Modellistica Ambientale*

La situazione è grave, è necessario agire con urgenza ma senza perdere la speranza, come afferma anche l'ultimo Rapporto IPCC che fa perno su tre parole chiave "Gravità, urgenza, speranza". Analizzando i dati forniti dal servizio Copernicus Climate Change, si osserva che l'aumento della temperatura media globale è stata di +1,1 °C rispetto al clima calcolato nel periodo 1850-1900. L'influenza delle attività umane ha riscaldato il clima a un ritmo senza precedenti almeno negli ultimi 2000 anni.

I dati del 2022 a livello mondiale evidenziano che gli ultimi 8 anni sono stati i più caldi dal 1880 ad oggi. Oltre all'aumento della temperatura, si assiste ad un innalzamento del livello del mare determinato dallo scioglimento dei ghiacciai dell'Antartide, Groenlandia e di quelli montani interni come Himalaya e Alpi e dall'espansione termica degli oceani che assorbono gran parte del calore che arriva sulla Terra. Il tasso di aumento del livello del mare nei mari europei presenta valori in alcuni casi anche significativi come nel Mar Baltico. Questa evidenza può significare, nel contesto di riferimento, una maggiore attenzione alle zone costiere e al problema del cuneo salino, che si verifica quando l'acqua salata del mare riesce a farsi strada nella falda acquifera dell'entroterra a causa di una ridotta portata dei corsi d'acqua dovuta ad esempio alla siccità.

Il Report del Copernicus Climate Change evidenzia come il 2022 sia stato in Europa un anno particolarmente siccitoso, con una distinzione tra il sud Europa, caratterizzato da maggiore siccità, e il nord Europa connotato da maggior umidità, differenza confermata anche dagli scenari futuri che prevedono nel 2070 e 2100 un aumento della siccità in particolare nel bacino del Mediterraneo ed un aumento delle piogge nel Nord Europa. I report del Copernicus Climate Change evidenziano come l'estate 2023 (giugno, luglio, agosto in termini meteorologici) sia stata la più calda mai osservata a livello mondiale e il 6 luglio 2023 un giorno da record: la media delle temperature di tutto il globo ha superato i 17 °C.

In Italia, quella del 2023 è la stata l'ottava estate più calda dal 1800 (da quando cioè sono cominciate le rilevazioni meteorologiche), con un +1,04 °C rispetto al 1991-2000, con questa distinzione: al nord +1,09 °C, centro +1,11 °C, sud +0,98 °C. Spostando i riflettori sulla Toscana, il recente cambiamento climatico non si limita al solo aumento delle temperature ma va a modificare significativamente anche la distribuzione e la stagionalità delle piogge. In Toscana, il 2022 è stato l'anno più caldo con uno scarto di +0,5 °C rispetto agli anni più caldi precedenti; quindi, stiamo assistendo ad un'accelerazione dell'aumento della temperatura e il trend in Toscana è di +1,2 °C per ogni cinquanta anni. Analizzando le varie stagioni, l'estate è sicuramente quella che risente di più dell'aumento della temperatura e questo fenomeno produce numerosi effetti, tra



cui la riduzione della risorsa idrica disponibile per evapotraspirazione, le fioriture anticipate, gli impatti sull'agricoltura, sulla vita degli animali e sul paesaggio.

La distribuzione delle piogge (quando e quanto piove) evidenzia un incremento dell'intensità dei fenomeni estremi (piogge intense e localizzate) nelle zone costiere rispetto alle zone interne con un conseguente aumento dei giorni secchi. In Toscana abbiamo avuto siccità più persistenti e ricorrenti, ogni 5 anni (2003, 2007, 2012, 2017, 2022), causando stress idrico e termico alla vegetazione che diventa combustibile ottimale per gli incendi che stanno, appunto, aumentando (n. 591 incendi e 2247 ettari interessati nel 2022), insieme all'aumento degli ettari per evento (con una media di 3,5 ettari per evento). Il quadro che emerge ha chiaramente effetti sulle acque sotterranee e superficiali in termini di inquinamento dei corpi idrici per deflusso e contaminazione da nutrienti, aumento della formazione di fioriture algali nocive determinato da nutrienti e temperature, riduzione di ossigeno disciolto e aumento della temperatura di fiumi e laghi. Gli effetti del cambiamento climatico si osservano anche nell'aumento della temperatura degli oceani e dei mari. Anche nel Mediterraneo, che mostra un trend di aumento della sua temperatura, abbiamo una maggiore evaporazione, una maggiore umidità ed energia dovuta al cambio di stato nella fase di evaporazione, elementi che favoriscono il manifestarsi di eventi estremi molto localizzati.

Il 2023 sta confermando come il bacino del Mediterraneo sia per il clima un hotspot, un'area dove si concentrano tutti i rischi climatici. Infatti, questa area è conosciuta per essere una delle zone del mondo che si riscalda più rapidamente soprattutto durante l'estate boreale. Questo è il futuro che ci attende per il quale dobbiamo prevedere strategie di adattamento. Le acque sotterranee rivestono un ruolo primario e strategico per l'approvvigionamento idrico, a livello mondiale. Guardando in particolare all'uso idropotabile, questa risorsa copre la maggior parte del fabbisogno, raggiungendo mediamente il 70% della popolazione, a livello europeo. Anche in Italia, così come sul territorio regionale, le risorse idriche ospitate dai sistemi acquiferi rappresentano la principale sorgente di approvvigionamento di acqua per il consumo umano. Questa importanza è destinata ad aumentare in futuro, sia per la crescita demografica che per gli effetti dei cambiamenti climatici.

Nonostante il ruolo chiave che le acque sotterranee ricoprono, manca ancora a livello collettivo la consapevolezza: le conoscenze ed i dati sui sistemi acquiferi e le risorse idriche in essi ospitate non sono infatti molti e sono necessariamente da implementare per avere quadri conoscitivi sempre di maggior dettaglio, che consentano di capitalizzare al meglio il valore di questa risorsa, sfruttandone la capacità di mitigare gli effetti dei cambiamenti climatici.

Presentazione dell'intervento: <https://www.arpat.toscana.it/documentazione/presentazioni-convegni/gozzini-cambiamenti-climatici-e-acqua-acque-e-clima-27102023.zip>

# L'acqua al centro della crisi climatica

Massimiliano Pasqui - *Istituto per la BioEconomia IBE-CNR*

Oggi è necessario rafforzare il convincimento che il cambiamento climatico, ed i suoi effetti, sono anche il frutto dell'attività dell'uomo, prendere atto che l'acqua è al centro della crisi climatica e prospettare possibili modalità per attraversare la crisi climatica.

La crisi climatica ha alcuni tratti caratterizzanti: aumento delle temperature, alluvioni, siccità. Le temperature, a livello mondiale, si stanno modificando, nonostante l'Accordo di Parigi abbia identificato nella soglia di 1,5°-2° il limite da non oltrepassare, stiamo logorando questo margine in modo molto veloce.

All'aumento della temperatura a livello globale si associano fenomeni di alluvioni e siccità.

Le alluvioni dovute alle abbondanti piogge non si manifestano solo in certi periodi dell'anno, come in genere durante l'autunno, ma anche in altri momenti e colpiscono zone anche non soggette a questo tipo di fenomeni, come è successo in Emilia-Romagna nella primavera del 2023.

Negli ultimi dieci anni, le piogge intense sono sempre più localizzate e danno luogo ad allagamenti diffusi soprattutto in aree urbane e peri-urbane, con perdite di vite umane e forti impatti sull'economia locale.

Contemporaneamente alle alluvioni, registriamo fenomeni di siccità, sempre più presenti in alcune zone del pianeta, che, come il Mediterraneo, sono più esposte a deficit di precipitazioni e rappresentano degli hot spot a livello mondiale dove gli effetti del cambiamento climatico appaiono con maggiore evidenza.

L'Italia settentrionale è stata colpita, negli ultimi anni, da una forte siccità, rappresentata, in modo iconico, dalle immagini del fiume Po in secca. Negli ultimi mesi del 2023, si è assistito ad un recupero, che ha attenuato la siccità grave, ma la risorsa idrica sotterranea è ancora in sofferenza, a causa del deficit pluviometrico, che sta ancora vivendo l'Italia e l'Europa.

La siccità è un problema molto complesso, multifaccettato e con elementi insidiosi. Alcuni aspetti di questo fenomeno appaiono evidenti: gli incendi boschivi, i disturbi degli ecosistemi, la minore produzione alimentare, le problematiche del comparto agricolo, la risalita del cuneo salino ed altro ancora. Altri, invece, sono più indiretti, come l'aumento dei prezzi degli alimenti o la presenza di alcuni inquinanti o ancora l'aumento della conflittualità tra gli utenti, che si intensifica di fronte alla riduzione significativa di una risorsa.

Il clima è un sistema molto complesso, ha una serie di interconnessioni molto difficili, quindi, è influenzato da diversi fattori come la modifica dell'asse dell'orbita terrestre, le variazioni nell'attività

solare, l'attività vulcanica ma anche l'azione dell'uomo. Le emissioni di anidride carbonica sono in aumento e, negli ultimi anni, soltanto in due momenti, nel 2008 per la crisi finanziaria e nel 2020 per quella sanitaria, abbiamo assistito a lievi flessioni ma, tutt'oggi, emettiamo grandi quantità di gas serra alteranti in atmosfera.

Per il futuro, tutto dipende dalle nostre scelte e dalle strade che verranno intraprese, consapevoli che le decisioni non saranno mai neutre né neutrali ma ci esporranno, comunque, ad un certo tipo di effetti e di impatti.

Il contrasto al cambiamento climatico rappresenta la più grande delle sfide, almeno da quando sono iniziate le civiltà agricolo-idrauliche nel Neolitico. Tutto dipende dai nostri comportamenti sia a livello individuale che collettivo. Per affrontare la sfida del cambiamento climatico dobbiamo immaginarci un percorso, un processo che:

1. implica una serie di azioni che devono essere intraprese per l'adattamento e la mitigazione degli effetti del clima che muta, questo significa che dobbiamo concentrarci sul processo e non sull'evento
2. si evolve nel tempo, in quanto si tratta di un processo dinamico ed interattivo che non ha confini definiti
3. non è valutabile dal punto di vista economico, perché è un processo intangibile.

Nel determinare il processo di adattamento, dobbiamo sempre tenere conto che questo si articola in diverse fasi: apprendimento, consapevolezza e, soprattutto, pratica. Quest'ultimo fattore risulta sostanziale, il vero motore della trasformazione delle nostre azioni, delle nostre attività come singoli e come collettività.

Dobbiamo continuare a costruire conoscenza, nella consapevolezza che quella che abbiamo appare già sufficiente per prendere delle decisioni. Ad esempio, sappiamo già come ridurre l'uso di risorse limitate, come l'acqua e l'energia o come rendere sostenibili le nostre produzioni. Dobbiamo, a questo punto, avviare un reale percorso di trasformazione che necessita di:

1. agire a livello g-locale (globale e locale), abbracciando il complesso intreccio tra le sfide globali e le azioni locali
2. rafforzare le comunità affinché abbiano un comportamento informato
3. rispondere in modo concreto ai "bisogni degli utenti", frase che non può ridursi ad uno slogan
4. potenziare l'apprendimento sociale, cioè ridurre il divario tra la conoscenza individuale e quella scientifica

5. rendere strutturali i processi di negoziazione sociale, ovvero lavorare con le comunità a tutti i livelli: dalla più piccola alla più grande.

Ricordiamo che senza una trasformazione dell'individuo, parte della collettività, ci saranno grandi problemi ad attraversare questo periodo e sarà difficile intraprendere un percorso trasformativo che richiede l'impegno dell'intera società.

Presentazione dell'intervento: <https://www.arpad.toscana.it/documentazione/presentazioni-convegni/pasqui-crisi-climatica-acque-e-clima-27102023.zip>

# Effetti reali e potenziali dei cambiamenti climatici sulle acque sotterranee

Marco Doveri - *Università degli Studi di Pisa, Dip.to Scienze della Terra*

Esistono alcuni esempi di sistemi acquiferi per i quali le buone conoscenze acquisite - adottando approcci di studio multidisciplinari – hanno permesso di mettere in luce situazioni di sensibilità della risorsa idrica sotterranea ai cambiamenti climatici, sia in termini di quantità che di qualità delle acque. In particolare, in diversi contesti geografico-geologici i cambiamenti climatici possono condizionare la disponibilità idrica effettiva nei sistemi acquiferi.

Il primo esempio è quello di un sistema acquifero multistrato di pianura, ovvero quello piemontese, dove attraverso il progetto NextData è stato studiato ed osservato un aumento nelle concentrazioni di alcuni composti chimici, parallelamente ad un aumento dei livelli quantitativi in falda. La piovosità relativamente elevata che si è avuta nel 2009, e che si è interposta tra due periodi relativamente secchi, ha determinato infatti aumenti sia dei livelli piezometrici che delle concentrazioni di nitrati e cloruri nelle acque sotterranee. Fenomeni estremi possono quindi portare all'accumulo di sostanze nutrienti e salinità nella zona insatura dell'acquifero e ad un loro successivo rilascio concentrato nelle acque sotterranee.

Analogo comportamento è stato osservato in Toscana, a Cecina (LI), dove la concentrazione di nitrati, che raggiunge un massimo di circa 300 mg/L negli orizzonti acquiferi superficiali per poi diminuire in modo piuttosto regolare con la profondità, è fortemente influenzata dalle precipitazioni.

I nuovi regimi pluviometrici favoriscono i fenomeni appena descritti.

Un altro esempio esaminato è quello del sistema pedemontano, ovvero l'alta pianura del fiume Brenta. Gli acquiferi pedemontani hanno un ruolo strategico nella mitigazione degli effetti dei cambiamenti climatici ed è pertanto importante studiarli e conoscerli. In quest'area è stata riscontrata una perdita di efficienza del carattere disperdente del fiume Brenta in un contesto di regimi climatici estremi. Emerge, cioè, il carattere prevalentemente drenante del fiume, che va quindi ad alimentare la portata del fiume stesso e non la falda.

Lo stesso comportamento è stato osservato nell'acquifero pedemontano-costiero della zona versiliese-apuana, dove sull'anno medio il 33% dei contributi all'acquifero deriva dal fiume Versilia, e nella falda pratese, alimentata in modo significativo dal fiume Bisenzio. Quest'ultimo, oltre che da un punto di vista quantitativo, influenza anche lo stato di qualità della falda acquifera, interessata da problemi di nitrati e organoalogenati.

Altro esempio ancora è quello rappresentato dal sistema insulare di Pianosa, in Toscana, che presenta un acquifero sensibile ai cambiamenti climatici. Le piccole isole costituiscono infatti

ambienti sentinella per i cambiamenti climatici e per i loro effetti. A Pianosa non c'è un deflusso significativo: molta acqua torna in atmosfera, mentre solo il 10% finisce in falda. Di fronte ad eventi estremi di piovosità, il sistema insulare risponde con un'inefficace infiltrazione, ovvero con un decremento dei livelli piezometrici ed allo stesso tempo con un incremento della conducibilità elettrica (EC), quindi della salinità.

Presentazione dell'intervento: <https://www.arpad.toscana.it/documentazione/presentazioni-convegni/doveri-acque-sotterranee-acque-e-clima-27102023.zip>

# Dinamiche di infiltrazione di sostanze indesiderate nell'acquifero della Val di Chiana

Stefano Menichetti e Marcello Panarese - *ARPAT*

Il bacino neogenico della Val di Chiana si estende per circa 1300 km<sup>2</sup> nella parte sudorientale della Toscana, fra le province di Arezzo e Siena. L'assestamento appenninico dal Miocene superiore, attraverso un regime tettonico estensionale, comune agli altri bacini plio-quadernari della Toscana, forma questo bacino sedimentario con una depressione asimmetrica di maggior potenza e minor età dei sedimenti verso est. Le potenti conoidi, sviluppate sul solo lato orientale, sembrano indicare la presenza di una grande faglia listrica con orientazione appenninica parallela alla dorsale Arezzo – Città della Pieve. La sedimentazione, iniziata nel Pliocene, dopo varie fasi deposizionali, si chiude nell'Olocene con i depositi fluvio-lacustri recenti. Il modello spaziale del serbatoio idrogeologico della Val di Chiana (CISS 11R030-1) è concettualmente ascrivibile ad un acquifero multistrato a permeabilità variabile verticale ed orizzontale. Il corpo idrico significativo della Chiana è sottoposto al monitoraggio ambientale dalla direttiva 2006/118, recepita dal DLgs 30/2009 e DGRT 847/2013. Il programma di prevede un monitoraggio semestrale, di sorveglianza ogni tre anni e con ricerca estesa di potenziali inquinanti ed un monitoraggio operativo annuale limitato ai parametri critici per i corpi idrici classificati a rischio del non raggiungimento del buono stato chimico.

Dalla verifica dello stato chimico per l'ultimo triennio 2019-2021 è emerso uno stato chimico scarso e tra i parametri responsabili le tendenze statisticamente significative, valutate come da LG SNPA CNR 161/17, per ferro e manganese in incremento e nitrati in inversione. L'analisi delle tendenze è stata dunque aggiornata al 2022 e riferita ai dati semestrali, con la disponibilità di un numero maggiore di stazioni con dati sufficienti, ottenendo la generale conferma delle due opposte tendenze. Per una stazione, il pozzo Manciano MAT-P016, è stata condotta un'ulteriore analisi delle tre serie temporali di Ferro, Manganese e Nitrati, ricercando una possibile relazione tra dato chimico e livello quantitativo, rappresentato dalle serie del pluviometro di Cesa e della stazione freaticometrica più profonda di Cesa L1 (30 mt). L'analisi - consistente nel processo di decomposizione e separazione della serie in tre componenti stagionale (seasonal), tendenza pluriennale (trend) e residuale (random) - ha messo in evidenza una ciclicità di 5 ÷ 6 anni presente nelle piogge, ben riflessa nella freaticometria e, in modo correlato, espressa anche nella serie dei nitrati. La cross correlazione tra piogge e livelli sembra indicare un tempo di risposta, oltre le oscillazioni immediate stagionali, di circa otto mesi. Tutte le serie analizzate indicano l'instaurarsi a partire dal 2012 di una forte variabilità del regime pluviometrico con conseguenze sui livelli piezometrici - in decrescita -, sulle sostanze derivate dalla matrice dell'acquifero - in crescita - e sulle sostanze liscivate dalla ricarica - in decrescita. Il quadro, che lascia supporre un effetto di



ridotta ricarica degli acquiferi come conseguenza di precipitazioni sempre più concentrate, è stato studiato con un focus specifico tra marzo 2021 e settembre 2023, disponendo dei dati di monitoraggio chimico a maggiore frequenza temporale forniti dal gestore del servizio idrico Nuove Acque. L'elaborazione disaggrega il periodo anomalo delle precipitazioni compreso tra l'ultimo trimestre 2021 e l'intero 2022 su cui si ipotizzano le oscillazioni di risposta per la falda freatica e le dinamiche inverse delle concentrazioni di Ferro e Manganese con l'ipotesi di un tempo di risposta di un mese.

Presentazione dell'intervento: <https://www.arpat.toscana.it/documentazione/presentazioni-convegni/menichetti-panarese-valdichiana-acque-e-clima-27102023.zip>

# Il monitoraggio dell'arsenico nelle vulcaniti amiatine

Luca Sbrilli e Stefano Menichetti - *ARPAT*

L'acquifero vulcanico del M. Amiata occupa una superficie di circa 80,5 km<sup>2</sup> e soddisfa le esigenze idriche delle province di Siena, Grosseto e Viterbo, rappresentando di fatto l'area più strategica della Toscana meridionale.

Il sistema idrogeologico del Monte Amiata è schematizzabile a quella di un cono, costituito dalle vulcaniti del Monte Amiata; tali rocce vulcaniche, sovrastano un complesso flyschoidale (costituito prevalentemente dalle formazioni di facies ligure s.l.) a bassa permeabilità che ne costituisce un limite geologico impermeabile. Proprio l'impermeabilità del fondo è il principale motivo di condizionamento della circolazione idrica di base del Monte Amiata dove si forma una falda freatica che trova sbocco, attraverso una moltitudine di sorgenti, al bordo della formazione delle vulcaniti.

ARPAT da oltre un decennio effettua un monitoraggio sulle acque profonde, superficiali e sulle sorgenti in parallelo ad ENEL GP.

I dati ricavati dal monitoraggio permettono di fare un'analisi degli andamenti nel tempo della falda sia da un punto di vista qualitativo, dal 2003, che quantitativo, dal 2008, provvedendo al loro confronto con le precipitazioni.

Le risultanze del monitoraggio della falda confermano lo sfasamento di 1,5 anni ca. già conosciuto tra piovosità e livelli della falda e portate delle sorgenti, aggiornando i dati degli ultimi anni. Lo stesso sfasamento sembra risultare anche con i dati qualitativi, in particolare le concentrazioni dell'Arsenico.

Nell'arco temporale dell'ultimo decennio, si assiste alla variazione delle concentrazioni di Arsenico come del Boro presenti in falda che seguono, in maniera opposta, la variazione della falda.

Una disamina dei dati più significativi relativi ai cambiamenti climatici evidenzia una tendenza di diminuzione delle piogge nel M. Amiata dal 1947 al 2022, mentre, per il periodo dell'ultimo decennio, si osserva una riduzione delle portate delle sorgenti e contestualmente, nello stesso arco temporale, un incremento della temperatura.

L'importanza del contesto idrogeologico del M. Amiata, viste le tendenze relative ai cambiamenti climatici, impone di rafforzare e ulteriormente migliorare, il monitoraggio di tutti i parametri ed al tempo stesso, iniziare ad implementare politiche di difesa della risorsa.

Presentazione dell'intervento: <https://www.arpat.toscana.it/documentazione/presentazioni-convegni/menichetti-vulcaniti-amiatine-sbrilli-acque-e-clima-27102023.zip>

# Acquifero della Montagnola Senese: analisi preliminare dei dati di monitoraggio per una gestione sostenibile della risorsa

Elena Calosi e Marcello Panarese - *ARPAT*

Prendendo in considerazione l'acquifero "CARBONATICO DELLA MONTAGNOLA SENESE E PIANA DI ROSIA" (cod. CISS- 99MM030), di cui non sono noti elementi di criticità, è stata impostata un'analisi dei dati di monitoraggio per verificare la presenza di eventuali tendenze composizionali confrontabili con cambiamenti del regime pluviometrico e piezometrico. Le osservazioni effettuate seppur a livello preliminare hanno fornito elementi utili, per successivi approfondimenti ai fini della gestione sostenibile della risorsa.

L'acquifero della Montagnola Senese è un importante serbatoio idrico strategico della Toscana meridionale, in quanto è utilizzato ad uso potabile da alcuni comuni della provincia di Siena. Nel P.G.A. del Distretto Appennino Settentrionale ne viene indicata la condizioni di "BUONO sia per lo stato chimico che per quello quantitativo.

I dati di monitoraggio presi in considerazione relativi agli ultimi dieci anni sono quelli di Regione Toscana per pluviometrie e piezometrie, di ARPAT e di Acquedotto del Fiora per le analisi chimiche; mentre la parte idrogeologica è stata ripresa da studi pregressi dell'Università di Siena ed in particolare alla Tesi di dottorato del Dott. F. Capacci (a.a. 2021/2022).

Partendo dal modello concettuale sono stati confrontati i livelli piezometrici rilevati sui piezometri di S. Colomba (Monteriggioni) e di Casetta (Sovicille) con le medie giornaliere delle piogge misurate su cinque pluviometri. Da un primo esame sono stati individuati tre intervalli temporali dove sono distinguibili tre andamenti diversi della piezometria/pluviometria.

Per riscontrare eventuali evidenze sulle tendenze composizionali è stato deciso di prendere in considerazione solfati e cloruri in quanto eventuali variazioni di concentrazione di questi ioni potrebbero essere correlati a variazioni di apporto idrico.

In prima battuta sono stati analizzati i dati del Monitoraggio di ARPAT che si riferiscono ad un arco temporale che va dal 1994 al 2021 per 8 pozzi (MAT) oggetto di campionamento.

L'analisi statistiche elaborate secondo la Direttiva 2006/18 e DLgs 30/2009, linee guida MLG 161/17-SNPA, hanno mostrato una tendenza all'incremento della concentrazione dei cloruri e solfati per il pozzo LUCO 4, ad uso acquedottistico, mentre negli altri pozzi ad usi diversi, ove sufficienti i dati per tale analisi, hanno mostrato una tendenza inversa.

Sono stati quindi perse in considerazione le analisi chimiche dei pozzi ad uso acquedottistico del LUCO (concessi da Acquedotto del Fiora), che hanno confermato per l'arco temporale 2013-2023 una tendenza ascendente soprattutto per i cloruri.

È stato utilizzato il rapporto tra cloruri e solfati, che mostra una tendenza ascendente su tutti i pozzi, identificando due intervalli, distinguibili per una diversa distribuzione dei punti. Il limite della discontinuità è individuabile all'anno 2016.

L'andamento del rapporto cloruri/solfati è stato confrontato con la distribuzione delle piogge e con la piezometria. Da tale confronto è stato rilevato che le piogge totali annuali (medie sui cinque piezometri), pur essendo lievemente in diminuzione, non si discostano in modo sostanziale dal valore medio del ciclo decennale. È invece possibile osservare una generale variazione nella distribuzione delle piogge durante l'anno che potrebbe influire nella distribuzione delle concentrazioni ioniche prese in considerazione.

La tendenza rilevata è confermata anche dai grafici che rappresentano l'andamento delle conducibilità dei Pozzi del Luco dal 2013 al 2023, in cui si evidenziano due diverse distribuzioni dei punti con lo stesso il limite di discontinuità posizionabile anch'essa all'anno 2016.

Concludendo gli elementi rilevati da questa analisi preliminare sono:

- la pluviometria presenta ciclicità stagionale, più marcata dal 2016 e caratterizzata da eventi piovosi concentrati, ma nel complesso non mostra tendenze decise di scostamento dalla media decennale;
- i livelli piezometrici mostrano un andamento prevalentemente decrescente;
- si rileva una diversa distribuzione di cloruri e solfati fra pozzi monitorati (in base agli usi);
- i pozzi ad emungimento continuo ad uso potabile (LUCO) mostrano una generale tendenza all'aumento dei cloruri e solfati;
- il rapporto cloruri/solfati presenta un salto dopo il 2016;
- ante e post 2016 si può ipotizzare una distribuzione diversa dei dati di conducibilità potenzialmente correlata con la variazione dell'andamento piezometrico e la distribuzione della piovosità.

Questo lavoro propone un nuovo metodo operativo, che auspichiamo stimoli un'ulteriore implementazione del monitoraggio e la definizione di specifici modelli di analisi per il suo uso attivo ai fini del controllo sulla sostenibilità e qualità della risorsa.

Presentazione dell'intervento: <https://www.arpat.toscana.it/documentazione/presentazioni-convegni/calosi-panarese-montagnola-senese-acque-e-clima-27102023.zip>

# Cambiamenti climatici e dispersione di contaminanti: il caso del fiume Paglia

Pilario Costagliola - *Università degli Studi di Firenze*

Il fiume Paglia e la sua contaminazione da mercurio è oggetto di uno studio che ARPAT ha finanziato e contribuito a realizzare a partire dal 2017.

La popolazione del Mediterraneo è la più esposta al mercurio e lo è per cause principalmente naturali: il Monte Amiata (Abbadia San Salvatore), insieme ad Idrija in Slovenia e Almadén in Spagna sono state infatti, nella storia, le 3 più grandi miniere di mercurio al mondo. Si stima che il 70% del mercurio che si trova oggi al mondo provenga dalla cintura mineraria mediterranea. Il fiume Paglia, affluente del Tevere, drena il lato orientale della miniera di Abbadia San Salvatore che è stata attiva per circa un secolo, fino ai primi anni '80. Il fiume ha drenato, quindi, per questi cento anni i residui dell'attività metallurgica portandoli a valle, passando per il lago di Alviano, fino al Mediterraneo, uno dei mari più ricchi di mercurio. Diversi sono gli effetti dei cambiamenti climatici sul ciclo del mercurio nel sistema del Paglia.

Il primo riguarda gli eventi di piena che contribuiscono a trasportare il mercurio; nei sedimenti fluviali del Paglia quest'ultimo si muove sotto forma di particolato, costituito sostanzialmente da solfuro, che è un composto insolubile in grado di rendere quindi il mercurio poco biodisponibile. Per osservare come si muove il metallo lungo il fiume, Università ed ARPAT hanno studiato i sedimenti ed hanno osservato come il Paglia scorre oggi più in basso rispetto alle terrazze ricche di mercurio, che normalmente quindi non sono raggiunte dalle acque. Quando invece avvengono eventi di piena le acque raggiungono le terrazze, le erodono e ridistribuiscono in maniera importante i sedimenti contaminati nel fiume fino al mare. All'aumentare quindi di eventi estremi aumenta il trasporto dei contaminanti. A seguito delle piene il mercurio viene trasportato anche fuori dall'alveo del Paglia e a tal proposito ARPAT ha ricostruito e disegnato le aree esterne al fiume in cui i sedimenti contaminati arrivano ad impattare.

Un secondo effetto dei cambiamenti climatici sul ciclo di mercurio nel sistema del Paglia riguarda l'aumento delle temperature e la connessa produzione di metilmercurio. Nel luglio 2022 ARPAT, uno dei pochi laboratori in grado di analizzare il metilmercurio - trattandosi di una tipologia di analisi particolarmente delicata - ha analizzato i sedimenti del lago di Alviano prelevati dall'Università. Le acque del lago avevano raggiunto temperature intorno ai 35 gradi, condizione che facilita la formazione del metilmercurio che infatti è stato osservato in valori piuttosto elevati. Il metilmercurio è il composto più ecotossico del mercurio, è estremamente biodisponibile ed è prodotto da dei batteri che popolano il fondo del lago e che con l'aumento delle temperature tendono a crescere.

Un terzo impatto è legato agli incendi che contribuiscono a vaporizzare il mercurio intrappolato nei boschi. Questi ultimi infatti sulfidano il mercurio, lo rendono, cioè, poco biodisponibile e lo intrappolano nella superficie del suolo. Se però i boschi prendono fuoco il mercurio si vaporizza e finisce in aria. Si stima quindi che con l'aumento degli incendi, che sono uno degli effetti dei cambiamenti climatici in atto, il flusso di mercurio che entrerà in mare aumenterà.

Per affrontare la situazione della contaminazione del fiume Paglia, ci sono possibili risposte, come evitare gli incendi, limitare l'erosione delle sponde, coltivando ad esempio la vegetazione ripariale, ma soprattutto effettuare un monitoraggio in continuo del flusso di mercurio lungo il fiume. A questo proposito Università ed ARPAT stanno lavorando alla realizzazione di un sistema low cost che permetta di ottenere una stima della quantità di mercurio trasportato dal fiume, attraverso i dati della torbidità dell'acqua ed il loro collegamento con la concentrazione di mercurio.

Presentazione dell'intervento: <https://www.arpat.toscana.it/documentazione/presentazioni-convegni/costagliola-fiume-paglia-acque-e-clima-27102023.zip>

# Specie aliene nelle acque dolci della Toscana

Letizia Marsili - *Università degli Studi di Siena*

I cambiamenti climatici stanno incidendo sulla biodiversità delle specie che vivono in habitat acquatici, questa situazione è visibile anche analizzando le specie aliene nelle acque dolci presenti in Toscana. Le specie non native sono oggetto di osservazione dal 18° secolo. Nel 1958, Charles Elton, “padre” della biologia invasiva, definì le invasioni biologiche come “esplosioni ecologiche”. Queste sono trasportate dall'uomo, in modo volontario o accidentale, al di fuori della loro area di origine. La Convenzione sulla Biodiversità (CBD) del 1992 e il Regolamento EU 1143/2014 comprendono, tra le specie aliene, anche i semi, i propaguli (piante, funghi, batteri in grado di svilupparsi separatamente per dare vita ad un organismo identico da quello da cui deriva), le uova ma anche le razze e le varietà delle specie in grado di sopravvivere e riprodursi in un'area differente da quella di origine. comprendono, tra le specie aliene, anche i semi, i propaguli (piante, funghi, batteri in grado di svilupparsi separatamente per dare vita ad un organismo identico da quello da cui deriva), le uova ma anche le razze e le varietà delle specie in grado di sopravvivere e riprodursi in un'area differente da quella di origine. Al contrario, una specie presente nella sua area nativa è definita autoctona o indigena.

L'uomo ha un ruolo importante nel movimento delle specie: diaspora dei coloni europei, rapido sviluppo economico e crescente commercio globale e sugli impatti ecologici, economici e sulla salute che queste sono in grado di produrre.

A livello globale, su 1517 specie aliene invasive registrate, il 39% è stato introdotto intenzionalmente, il 26% involontariamente, il 22% sia intenzionalmente che involontariamente, mentre del 13% non si hanno informazioni disponibili.

La biodiversità viene messa a dura prova dalle specie aliene, che sono la causa del 25% delle estinzioni vegetali e del 33% delle estinzioni animali. Le specie native sono coinvolte in meno del 5% e del 3% delle estinzioni vegetali e animali. L'introduzione e diffusione di specie aliene o esotiche invasive comportano impatti anche sui servizi ecosistemici: l'approvvigionamento di acqua e aria, legname, impollinazione ecc. Inoltre, le specie aliene sono responsabili della perdita della diversità filogenetica, che riguarda quanto le specie sono vicine o distanti da un punto di vista evolutivo; l'11% delle specie native sono minacciate da quelle invasive proprio su questo aspetto.

L'impatto economico dovuto alle specie invasive aliene è incredibile; i costi sono ingenti, stimati a livello globale in 26,8 miliardi di dollari annui, sia per gli impatti diretti che per la gestione delle specie invasive. In Italia, il costo economico è stimato in più di 700 milioni di euro, spesi nel periodo tra il 1990 e il 2020. Gli impatti prodotti dalle specie aliene possono coinvolgere anche la salute umana; infatti, le malattie emergenti nell'uomo possono essere causate direttamente da agenti patogeni invasivi, da agenti patogeni trasportati da vettori o da organismi serbatoio che



possono essere anche ospiti intermedi o facilitati da specie invasive non direttamente coinvolte nel ciclo di vita o nel trasporto dell'agente patogeno, ma possono creare condizioni di habitat favorevole per la proliferazione locale. Per fortuna, non tutte le specie aliene creano danni nei territori in cui si insediano.

Le specie aliene invasive sono arrivate, nel nostro paese, tra il 1970 e il 2014; delle 3000 specie aliene registrate negli ultimi trent'anni, il 15% sono considerate invasive. Quelle maggiormente conosciute sono: la nutria, la zanzara tigre, il gambero della Louisiana, il giacinto di acqua.

Per fronteggiare questa situazione, a livello europeo, è stato adottato il Regolamento 1143 del 2014, che detta disposizioni per prevenire e gestire l'introduzione e la diffusione di specie esotiche invasive. Il regolamento è in vigore dal 1° gennaio 2015. A livello nazionale, con il Decreto legislativo 230 del 2017, è stato affidato alle Regioni e alle Province autonome il compito di effettuare, per tutte le specie di interesse dell'Unione europea, il monitoraggio, il rilevamento precoce, l'eradicazione rapida e il controllo e, qualora necessario, il ripristino degli ecosistemi danneggiati.

Per quanto riguarda le specie aliene nelle acque dolci, bisogna premettere che quest'ultime rappresentano una parte minima delle acque del mondo, lo 0,01% ma sono ricche di biodiversità, il 10% di tutte le specie descritte e il 30% dei vertebrati. Per questo, devono essere oggetto di particolare attenzione visto che le specie aliene invasive mettono a forte rischio quelle autoctone, come nel caso dei vertebrati di acqua dolce particolarmente minacciati, secondo la red list della IUCN- 2022. In generale, 83% delle popolazioni animali di acqua dolce ha mostrato una marcata tendenza alla diminuzione di abbondanza tra il 1970 e il 2018. Il cambiamento climatico e il commercio globale, soprattutto legato agli acquisti elettronici su Web, sono la causa della perdita di biodiversità, anche nelle acque dolci.

I cambiamenti climatici possono avere effetti sulla perdita di biodiversità nelle acque dolci sia in modo diretto che indiretto. Nel primo caso, incidono sui cambiamenti del ciclo idrologico e sull'aumento di temperatura dell'acqua, nel secondo caso, invece, riguardano l'aumento del prelievo delle acque per l'agricoltura o altri usi umani, l'aumento della frammentazione dei fiumi per la costruzione di dighe, il peggioramento qualitativo delle acque o l'invasione, appunto, di specie aliene. Le mutazioni nel clima e le specie aliene lavorano anche in modo sinergico, incidendo sulla biodiversità delle specie di acqua dolce, tanto che, in questo habitat, le specie aliene hanno occupato il 50% della superficie totale; si tratta di molte d'interesse europeo: 36 specie di piante e 30 specie di animali.

Le specie ittiche di acqua dolce, che rappresentano il 51% della diversità ittica conosciuta a livello mondiale, sono particolarmente minacciate. La fauna ittica italiana, d'acqua dolce, è composta da 48 specie autoctone e 41 specie introdotte. 15 specie introdotte, tra quelle segnalate, non sono

ancora considerate naturalizzate. Su 44 bacini indagati, 10 hanno un numero di specie introdotte pari o superiore al numero di specie native.

In Toscana ci sono molte specie aliene nelle acque interne ed anche transfaunate ovvero sono specie nazionali ma appartengono ad un altro distretto ittiogeografico. Nel complesso si tratta di 25 specie aliene e 10 transfaunate. Alcuni esempi di specie aliene invasive presenti nella nostra regione sono:

- la *Pseudorasbora parva*, un ciprinide originario dell'Asia centrale, che rappresenta un competitore dell'alborella. Presente in Toscana dal 1994, soprattutto nel territorio senese e grossetano. Questo pesce è la causa del declino di numerose specie di pesci, a livello europeo, per un patogeno a questo associato
- il siluro è un pesce presente dagli anni '90 nel fiume Arno, grande predatore di specie endemiche senza competitori naturali
- la noce di mare, specie marina ritrovata nell'Ombrone
- le vongole asiatiche e chiocciole asiatiche presenti nel Bisenzio, nel territorio pratese e pistoiese, specie che, negli anni passati, sono state anche oggetto di un commercio illegale.

C'è, poi, il caso del fiume Elsa, non tra i più importanti a livello toscano, ma che rappresenta un hot-spot per il suo stato ecologico differente nei vari tratti analizzati, dove si trovano tantissime specie ittiche e vegetali introdotte ed anche acquariofile nelle zone con acque termali, (le caldane) trasformatesi in aree tropicali, presenti anche a Rimigliano, dove esistono due fosse calde con specie di acquario.

Per quanto riguarda il ritrovamento di specie aliene in Toscana: 19 casi sono legati ad attività di ripopolamento finalizzate al miglioramento delle attività alieutiche in genere, 5 casi di acquariofilia e solo un caso di controllo biologico: la *Gambusia*, introdotta negli anni '50 per il controllo della zanzara causa della malaria. Ricordiamo infine il granchio blu, che non abbandona le proprie attività biologiche, fisiologiche e metaboliche al di sotto dei 15 gradi di temperatura. Purtroppo, ormai le acque, per effetto del cambiamento climatico, si sono riscaldate; quindi, questo granchio mangia e si riproduce in continuazione senza avere antagonisti, se non l'uomo. Il polpo potrebbe essere un importante predatore ma ancora non ha imparato a riconoscere il granchio blu come una sua preda.

Presentazione dell'intervento: <https://www.arp.toscana.it/documentazione/presentazioni-convegni/marsili-acque-e-clima-27102023.zip>

# Impatti del cambiamento climatico sul comparto della pesca al gamberetto in Quebec

Ella Guscelli - *Università del Quebec a Rimouski*

Il lavoro presentato è frutto di un dottorato di ricerca sul gamberetto nordico, finanziato dall'Università del Quebec a Rimouski in Canada.

Questo gamberetto vive nelle acque fredde, predilige temperature tra 0° e 5°, si trova nelle acque fredde dell'Oceano atlantico, in particolare, nella parte est del Canada. Ha un'importanza ecologica, trovandosi alla base del regime alimentare di altre specie, tra cui diversi pesci e ricopre anche un valore socio-economico, visto che, da più di 50 anni, risulta fonte di sostentamento economico per le comunità locali.

I monitoraggi (abbondanza, sesso, taglia e distribuzione) hanno mostrato una crescita di questa specie fino al 2005, poi è iniziato un declino, tuttora in corso, dovuto anche al cambiamento climatico, che ha modificato le condizioni fisico-chimiche dell'habitat in cui vivono i gamberetti impattato dall'aumento delle temperature delle acque, dall'acidificazione delle acque profonde e dall'ipossia (perdita di disponibilità di ossigeno).

In laboratorio è emerso che questa specie di gamberetto risulta piuttosto tollerante ai singoli effetti del cambiamento climatico, meno a quelli combinati. I tre fattori: aumento delle temperature delle acque, acidificazione delle acque profonde ed ipossia, determinano, insieme, una riduzione della sopravvivenza di questa specie. Infatti, solo il 40% riesce a sopravvivere a queste condizioni, che incidono sulla loro performance energetica, i gamberetti mangiano meno, si riproducono meno, crescono poco e mostrano difficoltà di adattamento. La taglia dei gamberetti è un elemento importante anche dal punto di vista economico, perché sono pagati in base alla taglia e al peso, una diminuzione di questi fattori determina impatti economici.

Nel Quebec, sia il settore produttivo che quello governativo stanno cercando soluzioni per affrontare la riduzione di abbondanza del gamberetto nordico che potrebbe rendere la sua pesca non vantaggiosa economicamente. Il dibattito è aperto e coinvolge, in riunioni periodiche, tutte le parti interessate che dibattono, in base anche ai dati scientifici emersi, sulle quote di pesca e sulla potenziale adattabilità del settore ittico ai cambiamenti climatici, puntando, per il futuro, ad una pesca qualitativa più che quantitativa.

Presentazione dell'intervento: <https://www.arpato.toscana.it/documentazione/presentazioni-convegni/guscelli-pesca-gamberetto-quebec-acque-e-clima-27102023.zip>