

Valutazione della risorsa idrica su base territoriale

La crescente pressione antropica rende sempre più importante lo studio delle risorse naturali. Tra queste, l'acqua è certamente una delle più preziose, tanto da rappresentare uno degli obiettivi strategici di sviluppo sostenibile dell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite. In questo lavoro, gli autori approfondiscono alcuni dei temi di studio e ricerca portati avanti da ENEA nell'ambito di diverse attività progettuali, in relazione a differenti ambiti: dalla cooperazione internazionale ai bacini idrografici dei reticoli fluviali, dalla caratterizzazione e mitigazione del rischio di contaminazione della falda nei siti di bonifica alla determinazione del bilancio idrico nelle piccole isole e nei bacini lacustri.

DOI 10.12910/EAI2023-020

di **Sergio Cappucci**, **Luca Maria Falconi**, **Francesco Pasanisi**, **Carlo Tebano**, *Laboratorio Tecnologie per la dinamica delle strutture e la prevenzione del rischio sismico e idrogeologico*, **Marco Proposito**, *Laboratorio di Osservazioni e Misure per l'ambiente e il clima - ENEA*

I corpi idrici superficiali e sotterranei sono soggetti ad una forte pressione sia naturale, sia antropica, che può comportare un progressivo depauperamento della risorsa idrica in termini quantitativi e qualitativi. Questo rende sempre più difficile il raggiungimento degli obiettivi ambientali previsti dalla Direttiva Quadro Acque 2000/60, cioè il raggiungimento di un buono stato ecologico delle acque. L'attività di ENEA si inserisce nel più ampio contesto di analisi degli impatti che il cambiamento climatico sta determinando, soprattutto nel bacino del Mediterraneo, a causa delle significative variazioni sia delle temperature che delle precipitazioni con rilevanti ripercussioni sulla disponibilità di risorse idriche. Nell'intera regione del Mediterraneo, infatti, le temperature sono mediamente in aumento rispetto all'era preindustriale e alle medie globali, con una riduzione delle precipitazioni estive in alcune aree stimata fino al 10-30%.

I più recenti studi sugli scenari climatici attesi nel prossimo futuro per l'area mediterranea suggeriscono di non sottovalutare l'ipotesi di un aumento sia della frequenza di episodi siccitosi severi, sia della persistenza di tali eventi, con anomalie di precipitazione negative anche per più anni consecutivi (MedECC, 2020). Ne è la dimostrazione il fatto che nel Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici si è posta l'attenzione su diversi indicatori climatici legati alla siccità quali la durata di giorni secchi, gli indici di precipitazione ed evapotraspirazione ed altri parametri aventi dirette ricadute sulla riduzione delle portate fluviali, delle capacità e ricarica degli invasi e sulla disponibilità di acqua nelle falde (McKee et al., 1993). **I corpi idrici possiedono tutte le caratteristiche tipiche di un'infrastruttura naturale, verde-blu, la cui gestione sostenibile rappresenta una misura indispensabile e una sfida sia per le amministrazioni locali e centrali dello Stato sia per**

le imprese del territorio. Al pari di una qualsiasi infrastruttura antropica, come un ponte o una ferrovia, la gestione di una infrastruttura naturale richiede necessariamente la conoscenza delle caratteristiche strutturali, l'osservazione delle sue trasformazioni, la predisposizione di un quadro previsionale e l'esecuzione di interventi di manutenzione per fronteggiare le criticità che emergono nel tempo. Nello specifico, sono elementi indispensabili la conoscenza della struttura dei corpi idrici (es. le caratteristiche geometriche e le dinamiche di interazione con i corpi adiacenti) e il monitoraggio degli indicatori chimico-fisici e bio-ecologici che li caratterizzano. Sulla base conoscitiva, costantemente aggiornata, si sviluppano gli strumenti analitici necessari per interpretare le dinamiche dei sistemi e per produrre scenari previsionali in base a mutate condizioni climatiche e politiche di utilizzo della risorsa. In presenza di un quadro analitico di questo genere, le necessarie misure

di mitigazione delle criticità avranno il carattere di razionalità adeguato e potranno, auspicabilmente, essere meglio condivise e sostenute dalla cittadinanza.

Analisi di bacini e reticoli idrografici

Nella gestione della risorsa idrica, l'analisi territoriale ha un ruolo determinante e i Sistemi Informativi Geografici (GIS) sono uno strumento molto utile per la descrizione e lo studio dei bacini idrografici. A tale scopo, è possibile integrare le funzionalità tipiche di geoprocessing presenti nei software GIS con strumenti specifici di analisi sviluppati autonomamente in base alle esigenze dello studio. In ENEA, il **Laboratorio Tecnologie per la Dinamica delle Strutture e la Prevenzione del rischio sismico e idrogeologico**, ha svolto recentemente attività di valutazione dell'erosione superficiale e del trasporto di sedimenti nei sistemi fluviali per la salvaguardia delle risorse idriche e di supporto alle politiche di pianificazione nell'ambito di diversi progetti e linee di ricerca. L'analisi geomorfica quantitativa costituisce una branca della geomorfologia applicata volta alla descrizione delle caratteristiche morfometriche del territorio, come, ad esempio,

pendenza dei versanti e energia del rilievo, e dei suoi elementi principali. L'applicazione di tecniche di analisi geomorfica quantitativa per la stima del trasporto torbido fluviale è stata condotta attraverso l'implementazione di un applicativo GIS originale (Tebano et al., 2017) con il quale sono stati analizzati 41 bacini idrografici dell'Appennino (Fig. 1A). La correlazione tra i parametri geomorfici ed i dati di trasporto torbido disponibili è stata investigata mediante tecniche di stepwise regression (Grauso et al., 2018; 2018b; 2021).

Nell'ambito del progetto di cooperazione internazionale Renewable Energy Potential Maps for Lesotho (Fig. 1B) è stata ricostruita una mappa digitale del reticolo idrografico del Lesotho, in Africa meridionale (Pasanisi et al., 2020, 2021; Grauso et al., 2020). Il progetto è stato finanziato dall'allora Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare nel quadro del contrasto al cambiamento climatico, contribuendo, quindi, al raggiungimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile (SDGs) e delle misure previste dalla COP21 (Accordo di Parigi). Sono state effettuate anche attività di training e illustrate in dettaglio le metodologie messe a punto per la produzione delle mappe, appro-

fondendo potenzialità e modalità del loro utilizzo per lo sfruttamento delle energie rinnovabili. Il corso ha visto anche lo svolgimento di esercitazioni pratiche, per l'utilizzo di un database sviluppato in ambiente GIS e la consultazione di un WEBGIS opportunamente implementato per gli stakeholder locali.

Risanamento e riqualificazione della risorsa idrica: un'opportunità di transizione energetica ed ecologica

L'acqua è certamente la risorsa naturale maggiormente compromessa dalla contaminazione dei suoli e dagli sversamenti accidentali o volontari che tutt'oggi costituiscono uno dei maggiori impatti della produzione industriale (Fig. 2). In Italia ci sono 16.264 procedimenti di bonifica in corso. Si tratta di aree produttive e non, di diverse dimensioni e rilevanza all'interno delle quali discariche, impianti industriali, centrali, infrastrutture strategiche costituiscono una emergenza ambientale e sanitaria per i lavoratori e le comunità. Bonificare e rendere disponibili questi siti per nuovi insediamenti produttivi, è un'occasione straordinaria di sviluppo per il Paese, che va affrontata nel rispetto degli obiettivi dettati dalla strategia per lo sviluppo sostenibile. Tuttavia, i programmi di investimento sono rallentati a causa dei ritardi nelle bonifiche, acuitizzando gli impatti della contaminazione delle matrici ambientali. L'ENEA, analizzando le metodologie di riqualificazione ambientale delle falde freatiche, applicate in diversi Siti contaminati di Interesse Nazionale, ha stimato volumi di acqua di falda trattata e relativi costi di messa in sicurezza e bonifica dei siti contaminati. Sono stati considerati diversi fattori (Cappucci et al., 2010):

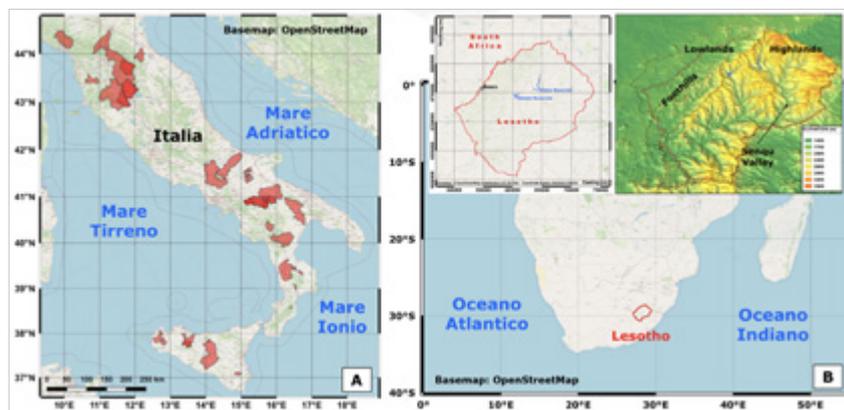


Figura 1: A) Bacini idrografici investigati nell'Appennino. B) Inquadramento geografico e altimetria del territorio del Lesotho.

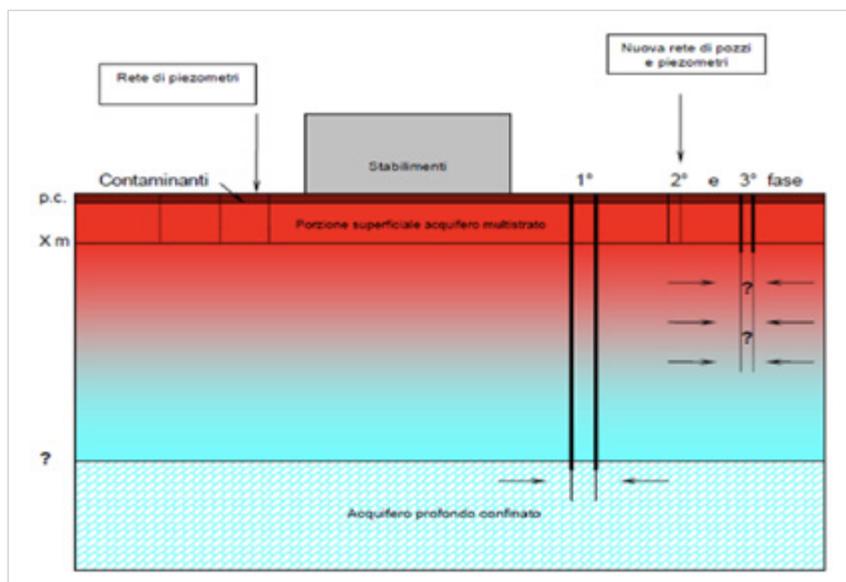


Figura 2. Modello concettuale di trasferimento della sorgente di contaminazione al bersaglio (acque di falda).

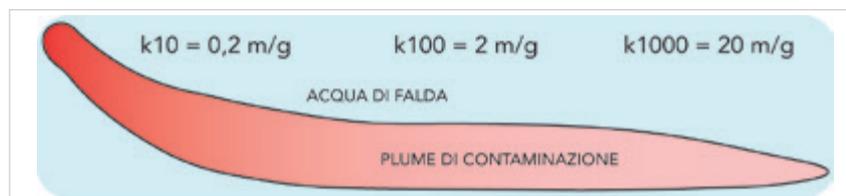


Figura 3. Schema di propagazione di un plume di contaminazione in falda generato da diversi fronti di contaminazione.

1. tipologia di barriera (idraulica: ~50%; fisica: ~10%; trattamento: ~40%);
2. fronte di contaminazione (F), cui sottendono hot spot di contaminazione di ampiezza compresa tra 50 e 300 m;
3. coefficiente di conducibilità idraulica (K), cui corrispondono percorrenze della falda da 0,2 a 20 m/giorno.

Sulla base di questi tre parametri e delle loro possibili combinazioni, è stato costruito un modello previsionale dei volumi di acqua da emungere e trattare in un arco di tempo di circa 30 anni, attraverso cui stimare i costi per le attività di MISE e bonifica. L'analisi ha consentito anche di implementare scenari di ricon-

versione per produzione energetica (Cappucci et al., 2010), lavoro al quale si rimanda per specifiche e dettagli (Fig. 3).

Bilancio idrico di bacini lacustri

I laghi svolgono un ruolo chiave sia per gli ecosistemi naturali che per le attività umane, essendo rari hot spot di biodiversità e fornendo servizi ecosistemici essenziali. Oltre a costituire una risorsa indispensabile in ambito produttivo (energia idroelettrica, agricoltura, pesca, turismo), essi rappresentano spazi ricreativi e di promozione del benessere, contribuiscono alla mitigazione del rischio idraulico e degli eventi climatici estremi, partecipano al ristabilimen-

to della qualità delle matrici ambientali e costituiscono una preziosa risorsa idropotabile.

Negli ultimi decenni, i sistemi lacustri di tutto il mondo sono stati colpiti da molteplici fattori di stress legati al cambiamento climatico e alla pressione antropica. Una repentina variazione delle caratteristiche dei relativi habitat potrebbe ridurre ulteriormente biodiversità e qualità ecologica e, conseguentemente, anche la capacità di fornire servizi ecosistemici.

A fronte delle crisi idriche che si sono susseguite negli ultimi anni, ENEA ha intrapreso un'attività di monitoraggio e analisi del bacino del lago di Bracciano, che riveste un ruolo strategico sia nella sopravvivenza di un'area naturale protetta, sia nel sistema di approvvigionamento idrico dell'area urbana ed extraurbana della città di Roma.

Oltre all'installazione di alcune stazioni di misura meteo e idrometriche, ENEA ha sviluppato un modello di simulazione del bilancio idrico basato sull'approccio della Dinamica dei Sistemi (Falconi et al., in revisione) volto a rispondere a due domande specifiche:

- che dimensioni hanno e in quale rapporto reciproco si trovano i fattori del sistema, naturali e antropici, che influiscono sulle escursioni del livello del lago?
- quale livello del lago è possibile attendersi in un prossimo futuro a fronte di potenziali scenari meteorologici e determinate politiche di approvvigionamento idrico?

Supportato da un'analisi spaziale basata su GIS, il modello sviluppa e simula il bilancio idrico del sistema lago-falda sulla base di un dataset di dati pubblici relativi ad una finestra temporale di cinquanta anni (1970-2019), integrati da alcuni dati di portata dei fossi afferenti al lago,

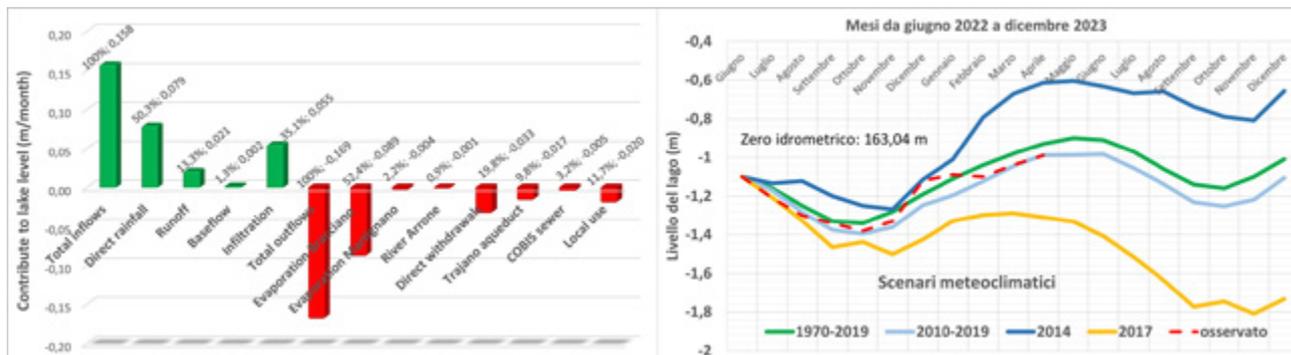


Figura 4 – Fattori del bilancio idrologico del lago (sinistra) ed escursioni del livello del lago previste per quattro scenari meteorologici (destra).

misurati tra il 2018 e il 2019.

I risultati evidenziano che il modello può fornire stime attendibili delle variabili non note che influenzano il bilancio idrico del sistema lago-falda e il livello dell’acqua del lago (Fig. 4, sinistra). Diversamente da quanto riportato in studi pregressi, il bilancio idrico del lago indica una condizione di costante perdita nel corso del cinquantennio 1970-2019: a fronte di 1,724 m/anno di entrate al lago, le uscite ammontano a 1,751 m/anno. Il modello, comprensivo di un modulo per generare scenari futuri, può costituire un supporto efficace alla pianificazione del territorio, alla tutela dell’ambiente e all’ottimizzazione dell’uso delle risorse idriche (Fig. 4, destra).

Strategie di gestione e di approvvigionamento idrico nelle piccole isole

Le comunità isolate hanno sempre utilizzato le risorse naturali in modo ottimale. La disponibilità ed approvvigionamento di acqua dolce, pronta per essere sfruttata in modo sostenibile dalla popolazione durante periodi di maggiore siccità è sempre stata considerata come una strategia di gestione indispensabile, soprattutto nelle piccole isole. Negli ultimi decenni, la crescita del turismo – che oggi contribuisce significativamente al PIL nazionale (Cappucci et al., in stampa; PNACC, in review) – ha di fatto reso indispensabile il ricorso all’approvvigionamento idrico esterno comportando costi, emissioni climalteranti e difficoltà tecniche

di realizzare dissalatori o condotte sottomarine per portare acqua dolce dalla terraferma.

Nell’ambito del **sotto-progetto GERIN** (Progetto Egadi; <http://progettoegadi.enea.it/it>), un team di ricercatori ENEA ha stimato le possibili riserve, individuando quelle di migliore qualità e, al contrario, quelle più esposte al rischio di salinizzazione per intrusione dell’acqua di mare nell’arcipelago delle Isole Egadi. Questo è stato possibile attraverso misure idrogeologiche, analisi chimiche delle acque di falda ed il calcolo dei tassi di precipitazione e di evaporazione. Si tratta di un bilancio idrogeologico che consente di stimare le infiltrazioni, i consumi e le perdite di acqua in territori, come quello di Favignana, scelti per le



Figura 5 – Modello concettuale di galleggiamento di acqua dolce su acqua di mare su una piccola isola e risultati delle valutazioni quali-quantitative effettuate nell’ambito del Progetto Egadi sull’Isola di Favignana.

caratteristiche climatiche, geomorfologiche e la forte presenza turistica in estate. Lo studio, pubblicato sulla rivista *Hydrogeology Journal* (Cappucci et al., 2020), ha stimato che le riserve di acqua potenzialmente disponibili sull'Isola di Favignana, considerando un consumo giornaliero

pro capite di circa 200 litri, potrebbero soddisfare le esigenze di circa ventimila persone. La metodologia utilizzata è replicabile in altri contesti con benefici di rilievo dal punto di vista sociale, economico e ambientale (Fig. 5).

Ringraziamenti: si ringraziano tutti i coautori degli articoli citati che, sebbene non direttamente coinvolti nella redazione del presente lavoro, hanno comunque svolto attività che sono state di fondamentale importanza per il raggiungimento dei risultati.

per info: sergio.cappucci@enea.it

Bibliografia

- Cappucci S., Creo C., Di Giovanni B. (in stampa). La gestione delle biomasse spiaggiate: stato dell'arte e prospettive per la transizione ecologica delle zone costiere. Proceedings of Geografia e Tecnologia conference "Giornate di studi interdisciplinari su tecnologia e transizioni, trasformazioni, rappresentazioni territoriali", 11 p.
- Cappucci S., De Lia F., Maffucci M., Montecchio D., Rolle E. (2010). Energie rinnovabili e messa in sicurezza dei siti contaminati: valutazioni tecnico/economiche. Proceedings of Remtech 4th Edition Conference, 6 pp.
- Cappucci S., De Cassan M., Grillini M., Proposito M., Screpanti A. (2020). Multisource water characterisation for water supply and management strategies on a small Mediterranean Island. *Hydrogeology Journal*, 1: 1-17. DOI 10.1007/s10040-020-02138-6
- Falconi L.M., Mecali A., Musmeci F., Proposito M., Taviani S. (under review). A System Dynamics model for the water balance of Lake Bracciano (Lazio, Italy). *Journal of Environmental and modelling assessment*
- Grauso S., Pasanisi F., Tebano C. (2018^a). Assessment of a Simplified Connectivity Index and Specific Sediment Potential in River Basins by Means of Geomorphometric Tools. *Geosciences* 8(2), 48; doi:10.3390/geosciences8020048
- Grauso S., Pasanisi F., Tebano C., Grillini M., Peloso A. (2018b). Investigating the Sediment Yield Predictability in Some Italian Rivers by Means of Hydro-Geomorphometric Variables. *Geosciences* 8(7), 249; doi:10.3390/geosciences8070249
- Grauso S., Pasanisi F., Tebano C. (2020). Modeling the suspended sediment yield in Lesotho rivers. *Modeling Earth Systems and Environment* 6:759–768; doi:10.1007/s40808-020-00738-5
- Grauso S., Pasanisi F., Tebano C., Grillini M. (2021). A multiple regression model to estimate the suspended sediment yield in Italian Apennine rivers by means of geomorphometric parameters. *Modeling Earth System and Environment* 7:363-371; doi: 10.1007/s40808-020-01077-1
- <http://progettoegadi.enea.it/it> (ultimo accesso 25.1.2023)
- MedECC (2020). Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current Situation and Risks for the Future. First Mediterranean Assessment Report [Cramer, W., Guiot, J., Marini, K. (eds.)] Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/MAP, Marseille, France, 632pp, ISBN 978-2-9577416-0-1, doi: 10.5281/zenodo.4768833
- McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (Anaheim, 17-22 January), 17 (22), 179-184.
- Pasanisi F., Tebano C., Grauso S., Mahahabisa M., Raliselo M. (2020). Producing a Digital Hydrographic Map Aiming at Renewable Energy Potential Mapping of Lesotho. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 10(23):61-68; doi:10.2478/jaes-2020-00010
- Pasanisi F., Righini G., D'Isidoro M., Vitali L., Briganti G., Grauso S., Moretti L., Tebano C., Zanini G., Mahahabisa M., Letuma M., Raliselo M., Seithheko M. (2021). A Cooperation Project in Lesotho: Renewable Energy Potential Maps Embedded in a WebGIS Tool. *Sustainability*, 13, 10132; doi:10.3390/su131810132
- PNACC (in review). Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici. Rapporto sottoposto a consultazione pubblica attraverso Procedura di Valutazione Ambientale Strategica (VAS). <https://va.mite.gov.it/it-IT/Oggetti/Info/7726>
- Tebano C., Pasanisi F., Grauso S. (2017). QMorphoStream: Processing Tools in QGIS Environment for the Quantitative Geomorphic Analysis of Watersheds and River Networks. *Earth Science Informatics* 10:257–268; doi: 10.1007/s12145-016-0284-0