

# Siccità, scarsità e crisi idriche

Il contributo della ricerca  
a supporto della definizione  
del bilancio idrico

A cura di  
Emanuele Romano  
Ivan Portoghese



#### **HABITAT SIGNA**

**Studi e ricerche su sistema terra e ambiente**

collana del  
Consiglio Nazionale delle Ricerche  
Dipartimento Scienze del sistema terra e tecnologie per l'ambiente

diretta da  
**Francesco Petracchini**

comitato scientifico a cura del consiglio scientifico di dipartimento  
**Andrea Billi, Claudio Faccenna, Gian Luigi Liberti, Andrea Rinaldo, Sabrina Speich**

comitato editoriale  
**Sara Di Marcello, Maria Elena Martinotti**

ideazione del nome e design della collana  
**Lucia Caraffa**

#### **Siccità, scarsità e crisi idriche**

Volume 1 della collana HABITAT SIGNA

editing  
**Sara Di Marcello, Ivan Portoghese, Emanuele Romano, Angelica Zonta**

impaginazione e copertina  
**Lucia Caraffa**

graphical abstract  
**Matteo Tucci**  
[www.luminescentia.com](http://www.luminescentia.com)

#### crediti fotografici

Copertina e pag. 4 - Greg Montani, Pixabay.com; pagg. 20, 27, 562 - Carolyn, Pexels.com; pag. 238 - George Becker, Pexels.com; pagg. 477 e 512 - Frank Cone, Pexels.com; pag. 482 - FOX, Pexels.com; pag. 495 - Teono123, Pexels.com  
Freepik.com: pagg. 30, 47, 50, 56, 68, 70,75, 86, 89, 96, 99, 104, 118, 121, 202, 212, 258, 268, 278, 284, 301, 303, 304, 311,325, 328, 339, 347, 350, 357, 366, 369, 384, 388, 391, 397, 406, 401, 402, 432, 426, 438, 440, 461, 480, 513, 514, 517, 518, 523, 541.  
L'Editore è a disposizione degli aventi diritto per eventuali inesattezze nella citazione delle fonti.

© Cnr Edizioni, 2024

P.le Aldo Moro 7  
00185 Roma  
[www.edizioni.cnr.it](http://www.edizioni.cnr.it)

ISSN 3035-2290

ISBN (ed. stampa) 978 88 8080 673 8

ISBN (ed. digitale) 978 88 8080 674 5

DOI <https://doi.org/10.69115/habitatsigna-2024-1>



This work is licensed under CC BY-SA 4.0



# Siccità, scarsità e crisi idriche

Il contributo della ricerca  
a supporto della definizione  
del bilancio idrico

A cura di  
**Emanuele Romano**  
**Ivan Portoghese**



# Indice

[5](#)  
[21](#)

Prefazioni  
Introduzione

[29](#)

1

**Il bilancio idrologico, la disponibilità di risorsa idrica e il bilancio idrico**

a cura di **Stefano Mariani**  
Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale (ISPRA)

[49](#)

2

**La governance dell'acqua in Italia**

a cura di **Gerardo Sansone**  
Presidenza del Consiglio dei ministri

[73](#)

3

**Previsione, prevenzione e contrasto delle crisi idriche: il valore aggiunto della conoscenza tecnico-scientifica nelle attività di protezione civile**

a cura di **Andrea Duro**  
Dipartimento della protezione civile

[103](#)

4

**Il regime meteo-climatico**

a cura di **Stefano Federico**  
CNR - Istituto di scienze dell'atmosfera e del clima (ISAC)

[145](#)

5

**La criosfera**

a cura di **Fabrizio de Blasi**  
CNR - Istituto di scienze polari (ISP)

[201](#)

6

**Il suolo e la zona insatura**

a cura di **Marco Berardi**  
CNR - Istituto di ricerca sulle acque (IRSA)

[237](#)

7

**Acque superficiali e invasi**

a cura di **Luca Brocca**  
CNR - Istituto di ricerca per la protezione idrogeologica (IRPI)

[267](#)

8

**Acque sotterranee**

a cura di **Cristina di Salvo**  
CNR - Istituto di geologia ambientale e geoingegneria (IGAG)  
**Matia Menichini**  
CNR - Istituto di geoscienze e georisorse (IGG)

[327](#)

9

**Interazione acque continentali - acque marine**

a cura di **Christian Ferrarin**  
CNR - Istituto di scienze marine (ISMAR)

[349](#)

10

**Le risorse idriche non convenzionali**

a cura di **Domenica Mosca Angelucci**  
CNR - Istituto di ricerca sulle acque (IRSA)

[386](#)

11

**Gli utilizzi idrici e la gestione sostenibile delle risorse**

a cura di **Marco Lauteri**  
CNR - Istituto di ricerca sugli ecosistemi terrestri (IRET)  
**Emanuele Romano** e **Ivan Portoghese**  
CNR - Istituto di ricerca sulle acque (IRSA)

[475](#)

12

**Siccità ed ecosistemi**

a cura di **Fabrizio Stefani**  
CNR - Istituto di ricerca sulle acque (IRSA)

[513](#)

13

**Siccità e Land Degradation**

a cura di **Vito Imbrenda**  
CNR - Istituto di metodologie per l'analisi ambientale (IMAA)

[554](#)

**Conclusioni**





**Keywords**

river discharge  
reservoir management  
multi-annual drought  
ephemeral rivers  
sediments

**Parole-chiave**

portata fluviale  
gestione degli invasi  
siccità pluriennale  
fiumi temporanei  
sedimenti

**Curatore**

Luca Brocca  
CNR  
Istituto di ricerca  
per la protezione idrogeologica

**Con contributi di**

CNR  
Istituto sull'inquinamento atmosferico  
Maria Adamo  
Fabio Michele Rana

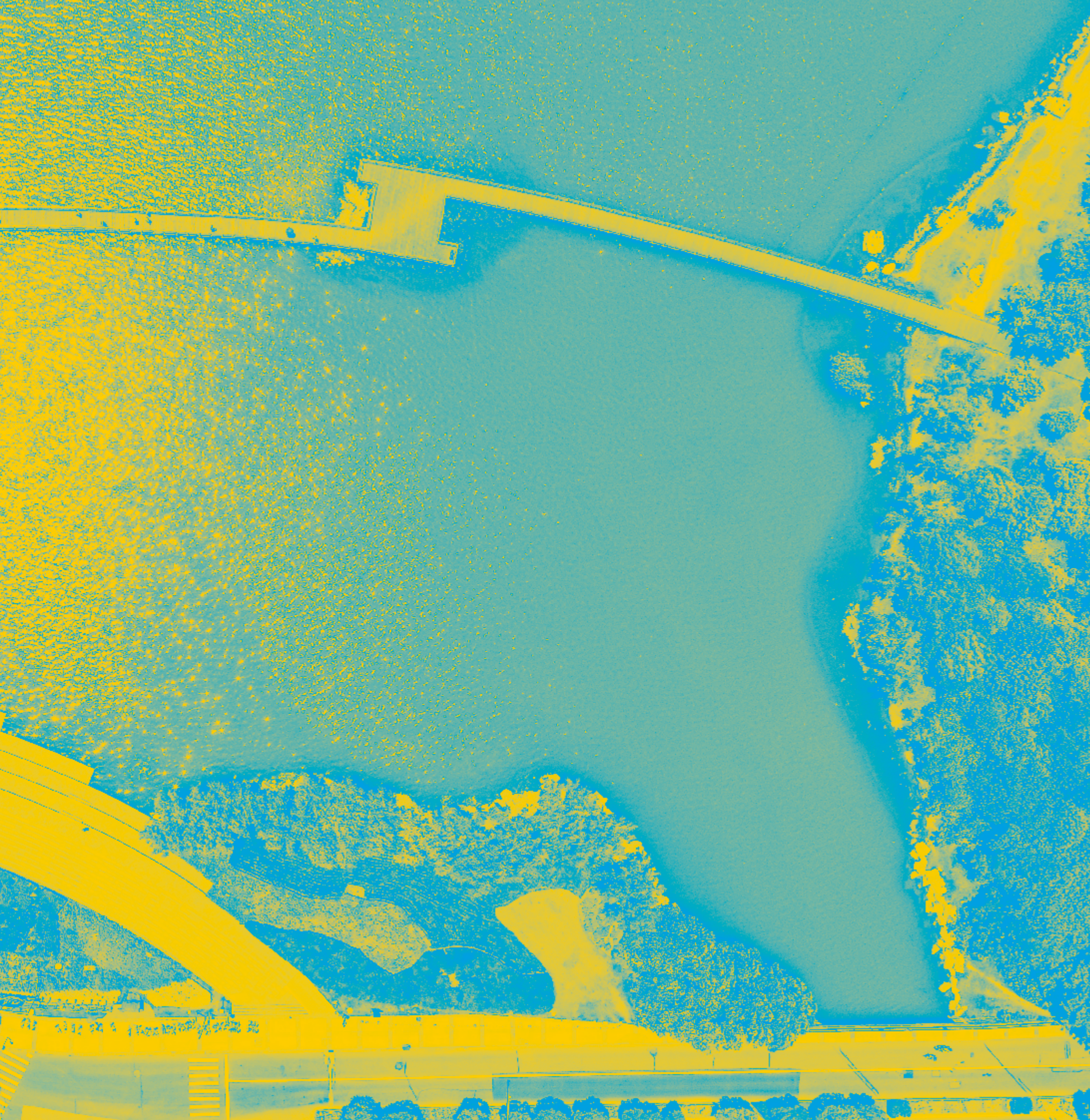
CNR  
Istituto di ricerca sulle acque  
Angela Boggero  
Marzia Ciampittiello  
Diego Copetti  
Anna Maria de Girolamo  
Claudia Dresti  
Monica Garnier  
Laura Marziali  
Stefano Polesello

CNR  
Istituto di ricerca  
per la protezione idrogeologica  
Christian Massari

# Acque superficiali e invasi

7.1	<b>Introduzione</b>	<a href="#">239</a>
7.2	<b>Monitoraggio</b>	<a href="#">240</a>
7.3	<b>Regime pregresso e stato attuale</b>	<a href="#">245</a>
7.4	<b>Impatti del cambiamento climatico sulle acque superficiali</b>	<a href="#">248</a>
7.5	<b>Strumenti modellistici di analisi e previsionali</b>	<a href="#">250</a>
7.6	<b>Relazione quantità - qualità delle acque superficiali</b>	<a href="#">252</a>
7.6.1	Aumento delle concentrazioni a causa della diminuzione dei volumi disponibili	<a href="#">252</a>
7.6.2	Variazioni dei carichi di nutrienti e risposta degli ecosistemi lacustri	<a href="#">254</a>
7.6.3	Mobilizzazione di sedimenti e fosforo a seguito di eventi meteorici intensi	<a href="#">255</a>
7.6.4	Qualità e gestione dei sedimenti negli invasi	<a href="#">256</a>
7.7	<b>Le domande di ricerca</b>	<a href="#">257</a>
7.8	<b>Referenze bibliografiche</b>	<a href="#">259</a>





# Introduzione

71

L'acqua disponibile nei corpi idrici superficiali (corsi d'acqua e laghi naturali) e negli invasi (artificiali) è di fondamentale importanza per l'approvvigionamento delle risorse idriche in Italia. A titolo di esempio, e in riferimento al trentennio 1991-2020, in Italia si è stimato un apporto di acqua piovana annua di circa 285 km<sup>3</sup> corrispondente a un'altezza di precipitazione media annuale di circa 943 mm. Il 53% delle precipitazioni (circa 498 mm) è ritornato in atmosfera per evapotraspirazione; il restante 47%, rimasto al suolo, è ripartito tra infiltrazione nel sottosuolo (21%) e deflusso superficiale (26%). Pertanto, i corpi idrici superficiali contengono circa un quarto dell'acqua disponibile su scala annuale (Spano et al., 2020).

L'assetto idrologico del territorio italiano comprende oltre 9000 corpi idrici naturali – definiti come significativi ai sensi del Codice dell'ambiente – e artificiali, composti dai canali di scolo e irrigazione, di lunghezza totale pari a oltre 180 000 km, secondo i dati forniti nel Piano nazionale di adattamento ai cambiamenti climatici redatto dal Ministero dell'ambiente e della sicurezza energetica nel 2023 ([https://www.mase.gov.it/sites/default/files/PNACC\\_DOCUMENTO\\_DI\\_PIANO.pdf](https://www.mase.gov.it/sites/default/files/PNACC_DOCUMENTO_DI_PIANO.pdf)).

I grandi invasi possono regolare un volume di risorsa corrispondente a 14.2 miliardi di m<sup>3</sup>, distribuiti in 526 dighe in esercizio, comprendendo gli sbarramenti che regolano il deflusso dei grandi laghi naturali ([https://www.dighe.eu/dati/grandi\\_dighe\\_italiane.htm#tabella](https://www.dighe.eu/dati/grandi_dighe_italiane.htm#tabella)). A queste si aggiungono 26 288 piccole dighe, e molte altre, in mano a privati, non ancora censite.



Il monitoraggio delle acque superficiali in Italia viene eseguito attraverso misuratori del livello idrometrico sia dei corsi d'acqua che dei laghi e degli invasi. In particolare, vengono monitorati tutti i fiumi principali e tutti i bacini idrografici con una superficie superiore ai 400 km<sup>2</sup> per scopi di protezione civile (a tal proposito si veda anche il Capitolo 2). Per quanto riguarda invece gli invasi, il monitoraggio del livello del lago artificiale, e del corso d'acqua a monte e a valle dell'invaso è richiesto dalla normativa (Circolare Ministero dei lavori pubblici 28 agosto 1986, n. 1125). Pertanto, il monitoraggio idrometrico in Italia è molto diffuso pur se la disponibilità di misure di livello dei corsi d'acqua spesso non è accompagnata da misure di portata fluviale, che è la quantità necessaria per conoscere i volumi di acqua transitanti in un determinato tempo in una data sezione di un corso d'acqua. Un censimento da parte di ISPRA nel 2018 ([https://www.isprambiente.gov.it/pre\\_meteo/idro/BIGBANG/BRACA\\_MARIANI\\_CReIAMO\\_PA.pdf](https://www.isprambiente.gov.it/pre_meteo/idro/BIGBANG/BRACA_MARIANI_CReIAMO_PA.pdf)) ha individuato 1276 stazioni di misura del livello idrometrico dei corsi d'acqua, per le quali solo su 747 sono disponibili misure di portata (cioè misure puntuali nel

tempo che forniscono il volume di acqua che passa in una data sezione in un certo momento temporale). La Figura 7.1 mostra alcuni esempi di sensori per la misura del livello idrometrico e della portata fluviale.

La scala di deflusso, la relazione che converte il livello idrometrico in portata fluviale che viene sviluppata a partire da diverse misure contemporanee di livello idrometrico e portata fluviale, è disponibile per circa la metà delle stazioni (621, sebbene in alcune stazioni vi siano misure di portata ma non sufficienti per costruire la scala di deflusso) (Fig. 7.2). A valle di questo censimento sono state stipulate una serie di convenzioni con le Regioni per aggiornare il sistema di monitoraggio. Si sottolinea inoltre che a livello regionale le reti di monitoraggio sono ancora più dense, come ad esempio mostrato in Figura 7.2 per il bacino del fiume Po dove si contano 1 628 stazioni di misura (Piano di gestione del distretto idrografico del fiume Po, 2021, [https://www.adbpo.it/PianoAcque2021/PdGPo2021\\_22dic21/Elaborato\\_01\\_Aggiornamento\\_caratteristiche\\_22dic2021/PdGPo2021\\_Elab\\_1\\_Stato\\_22dic21\\_revDSG.pdf](https://www.adbpo.it/PianoAcque2021/PdGPo2021_22dic21/Elaborato_01_Aggiornamento_caratteristiche_22dic2021/PdGPo2021_Elab_1_Stato_22dic21_revDSG.pdf)).

**Figura 7.1**

Esempi di strumentazione per il monitoraggio del livello idrometrico e della portata fluviale.

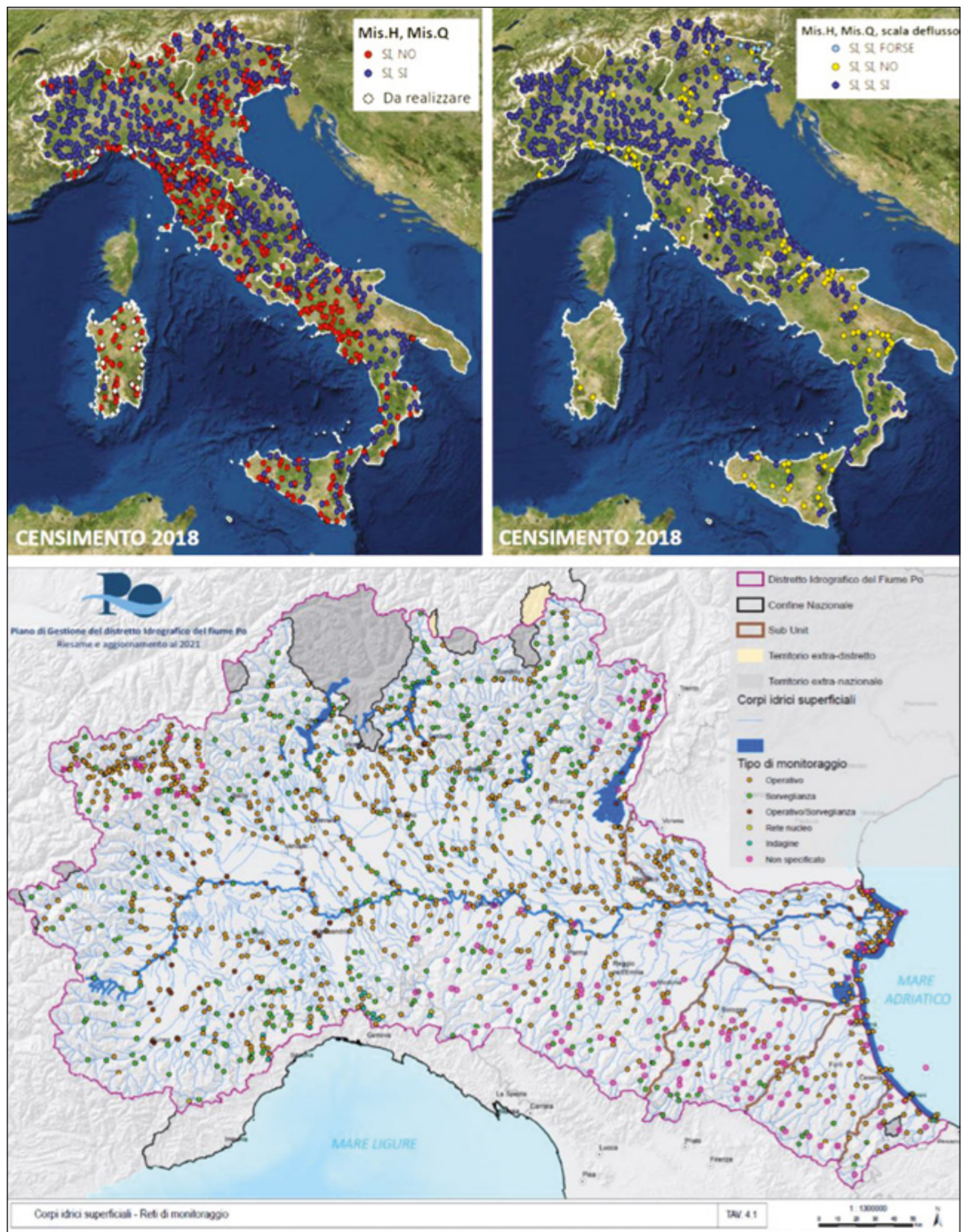




**Figura 7.2**

Nei pannelli superiori sono mostrate le stazioni di misura del livello idrometrico in Italia censite da ISPRA nel 2018, con l'indicazione delle stazioni per cui vengono fatte misure di portata fluviale, e per le quali è presente la scala di deflusso.

Il pannello inferiore mostra la rete di monitoraggio del bacino del fiume Po riportata nel Piano di gestione del distretto idrografico del Fiume Po del 2021.



Una possibile alternativa alle metodologie presentate in Figura 7.1 per il monitoraggio del livello idrometrico e della portata fluviale dei corsi d'acqua è rappresentata dall'uso di dati satellitari. L'approccio più consolidato per la misura del livello idrometrico si basa sull'uso dell'altimetria, che fornisce una stima della quota dell'acqua che deve essere convertita in altezza idrometrica conoscendo la geometria della sezione (ad esempio, Tarpanelli et al., 2021). Sulla base di tali misure, sono attualmente disponibili diversi sistemi operativi che forniscono stime del livello idrometrico su diversi corsi d'acqua a scala mondiale (ad esempio: Copernicus: <https://land.copernicus.eu/global/products/wl/>; Theia: <https://hydroweb.theia-land.fr/>; Dahiti: <https://dahiti.dgfi.tum.de/en/map/>; Hydrosat: <http://hydrosat.gis.uni-stuttgart.de/php/index.php>). In un recente lavoro, Deidda et al. (2021) hanno analizzato le serie idrometriche fornite dalla piattaforma Copernicus in 19 stazioni sul territorio italiano, ottenendo buoni risultati in termini di coerenza con le misure effettuate da stazioni a terra.

In alternativa ai dati altimetrici, di recente è stata sviluppata una metodologia per la stima della portata fluviale da dati forniti da sensori satellitari ottici (Tarpanelli et al., 2015), come ad esempio il ben noto satellite (<https://sentinel.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>). La metodologia può anche essere implementata considerando i dati ad alta risoluzione spaziale (Sentinel-2, risoluzione 20 m), garantendo quindi la possibilità di monitorare corsi d'acqua anche di limitate dimensioni (Filippucci et al., 2022). Tuttavia, le tecniche di monitoraggio satellitare del livello idrometrico e della portata fluviale sono ancora in fase sperimentale e si prevede che un loro utilizzo per affiancare le reti di monitoraggio a terra, in un territorio come quello italiano

caratterizzato da corsi d'acqua di limitate dimensioni, siano necessari ancora diversi anni (5-10) di sviluppo. Diversamente, tali tecniche sono attualmente molto utili per il monitoraggio dei grandi fiumi (es., Rio delle Amazzoni, Congo) per i quali le reti di misura a terra sono abbastanza limitate.

Anche il monitoraggio dell'estensione del reticolo idrografico e della superficie dei laghi e degli invasi può essere effettuato mediante tecniche basate sull'utilizzo di dati satellitari multi-temporali di diversa tipologia, sia di tipo ottico multispettrale che da radar ad apertura sintetica (SAR). L'elevata ripetitività di acquisizione e risoluzione spaziale, nonché la copertura geografica, ottenibile con sensori montati su piattaforme satellitari consentono l'estrazione nel tempo delle maschere water/non-water (presenza/assenza di acqua superficiale) e, di conseguenza, la stima delle variazioni intra-annuali e inter-annuali della copertura d'acqua. Numerosi algoritmi e metodi sono stati sviluppati a tale scopo, e si basano su diverse tipologie di utilizzo, anche integrato, delle immagini satellitari. Ad esempio, dalle immagini ottiche (in assenza di copertura nuvolosa) possono essere estratti indici spettrali quale il Normalized Difference Water Index (NDWI) per discriminare l'acqua dalle altre superfici (Özelkan, 2020; Sekertekin, 2021). Le immagini SAR, utilizzate in qualsiasi condizione di copertura nuvolosa, consentono invece di individuare la presenza di acqua superficiale in virtù della debole risposta radar derivante dallo scattering superficiale dell'acqua stessa rispetto ad altri target (suolo, vegetazione, strutture antropiche, etc.). Alcune delle metodologie SAR sviluppate si caratterizzano come tecniche tradizionali di *thresholding* o di *clustering*, ma altre più recenti si basano su approcci di Machine Learning e Deep Learning (Guo et al., 2022).



Di recente, integrando osservazioni satellitari di livello idrometrico, con dati sulla morfologia, sono stati sviluppati algoritmi e tecniche per il monitoraggio sia del livello idrometrico che dei volumi degli invasi (ad esempio G-REALM: [https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/global\\_reservoir/](https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/global_reservoir/)). Un recentissimo lavoro (Hou et al., 2024) ha permesso di monitorare 27 000 laghi su scala globale dal 1984 a oggi, con 36 invasi presenti sul territorio italiano e una frequenza di campionamento circa mensile (Fig. 7.3). Questi dati devono ancora essere validati con dati a terra, ma hanno un elevato potenziale per integrare il monitoraggio degli invasi su scala nazionale. Il Dipartimento della protezione civile ha iniziato nel 2023 un'attività per comprendere potenzialità e limiti di tali tecniche sul territorio italiano.



**Figura 7.3**

Stazioni di monitoraggio dei volumi degli invasi da satellite in Italia presenti nel database: <https://www.globalwater.online/global-water/in-dex.html>.

## Regime pregresso e stato attuale

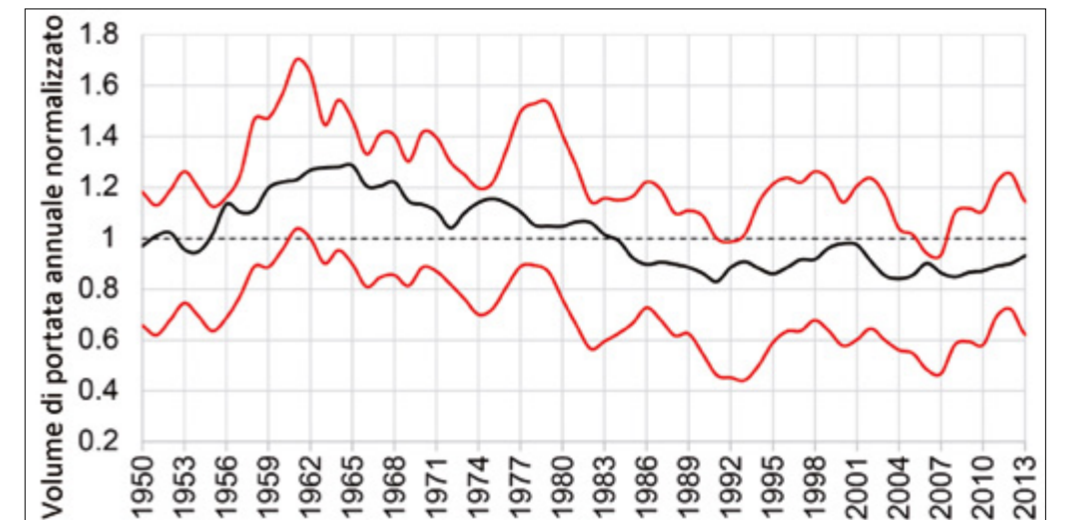
Come evidenziato in precedenza, in riferimento al trentennio 1991-2020, in Italia si è stimato un apporto di acqua piovana annua di circa 285 km<sup>3</sup>, ovvero 15 km<sup>3</sup> in meno rispetto alla media del trentennio 1951-1980. Questa riduzione intorno al 5% non è significativa dal punto di vista meteorologico, e quindi non si può parlare di siccità meteorologica. Tuttavia, la siccità idrologica, ovvero la riduzione dei volumi di fiumi, laghi, e falde sul lungo periodo risulta evidente. Ad esempio, le portate in ingresso del lago di Como e del fiume Adda si sono ridotte del 20% negli ultimi 170 anni, e questo rappresenta una riduzione significativa. La principale ragione di questo andamento è da attribuire all'aumento delle temperature medie, che producono quindi una maggiore evapotraspirazione dai corsi d'acqua, dagli invasi, dal suolo, e dalle piante. Quindi, pur con un calo di piogge limitato, oggi abbiamo meno acqua disponibile.

Andando più nel dettaglio e considerando studi a scala europea, le serie sto-

riche di dati di portata fluviale indicano un aumento della frequenza delle magre nel Sud Europa (Stahl et al., 2016), in particolare in Francia (Giuntoli et al., 2013), Spagna (Coch e Mediero, 2016; Lorenzo-Lacruz et al., 2010) e Turchia (Cigizoglu et al., 2005), e una diminuzione complessiva della disponibilità di acqua nel dominio euro-mediterraneo (Gudmundsson et al., 2016, Masseroni et al., 2021) dovuta al cambiamento del clima. In particolare, lo studio di Masseroni et al. (2021) è stato il primo a collezionare dati idrometrici su lungo periodo (dal 1950 al 2013) sull'intero territorio italiano (circa 100 stazioni distribuite su tutto il territorio) e ad analizzare le tendenze della portata fluviale, anche in connessione con le tendenze delle precipitazioni e della temperatura dell'aria. Lo studio riporta che nell'area mediterranea, il declino dei volumi annui di flusso è iniziato nel 1965 e dall'inizio degli anni '80 i volumi sono stati costantemente inferiori alla media del periodo 1950-2013 (Fig. 7.4).

**Figura 7.4**

Andamento del volume annuo standardizzato dei volumi di deflusso dal 1950 al 2013. La linea nera mostra la media mobile del volume di flusso annuale standardizzato sull'intera area mediterranea. Le linee rosse mostrano il 25° e il 75° percentile (adattata da Masseroni et al., 2021).





In generale, tali tendenze negative mostrano un'influenza del clima su scala multi decennale (Hannaford et al., 2013) dovuta anche a dinamiche relative alla circolazione atmosferica come l'Oscillazione Nord Atlantica (NAO) e l'Oscillazione Multidecennale Atlantica (AMO) (Giuntoli et al., 2013). Inoltre, l'espansione delle foreste con un aumento della domanda evaporativa e dei terreni irrigati spiega in molti casi la diminuzione della portata in molti fiumi nella regione del Mediterraneo (Massari et al., 2022; Teuling, 2018; Vicente-Serrano et al., 2020). Si nota in particolare un aumento dell'intensità delle siccità idrologiche specie durante periodi di siccità multi-annuali in concomitanza a un aumento dell'evapotraspirazione in bacini naturali (Massari et al., 2022). L'aumento delle siccità idrologiche avviene in modo marcato nelle zone caratterizzate da alta domanda irrigua (Vicente-Serrano et al., 2017a, Vicente-Serrano et al., 2017b), come ad esempio la siccità nel bacino del Po del 2022. In relazione a tale evento, Montanari et al. (2023) hanno mostrato che la recente siccità che ha colpito il Nord Italia possa essere la più grave negli ultimi due secoli. Un altro aspetto importante da tenere in conto per valutare come la siccità meteorologica si propaga nello spazio e nel tempo sono le caratteristiche del bacino, e in particolare la capacità di immagazzinare l'acqua nel suolo, nel sottosuolo e nella vegetazione. Bruno et al. (2022) hanno mostrato che in più di 100 bacini italiani le anomalie nella capacità di immagazzinamento a scala di bacino idrografico giocano un ruolo fondamentale nella propagazione della siccità meteorologica.



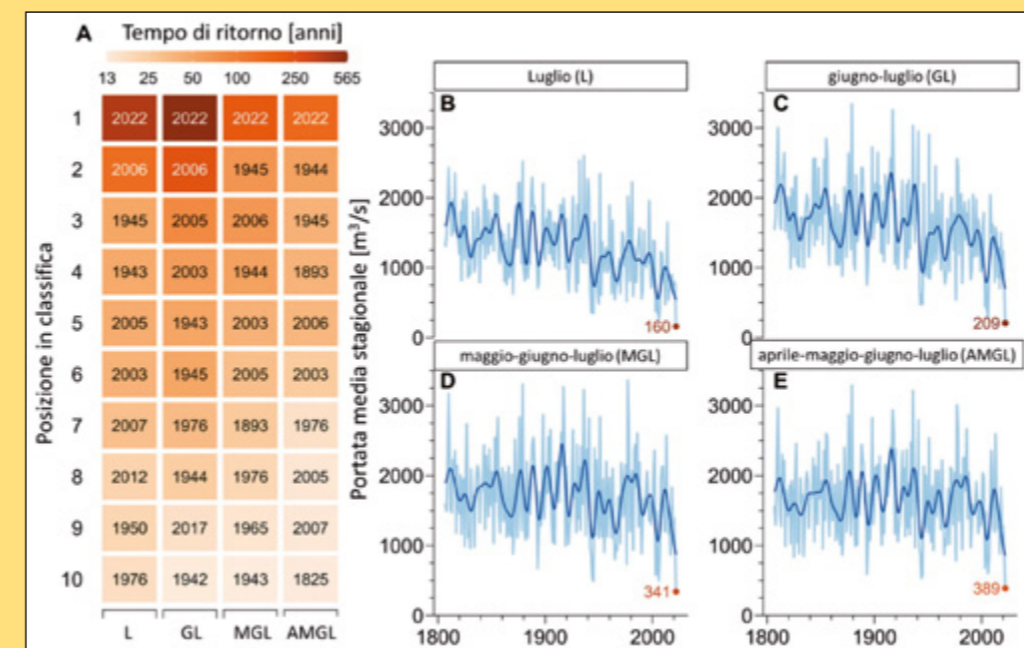
## La siccità del 2022-2023 nel bacino del fiume Po. Aspetti idrologici

L'analisi fatta da Montanari et al. (2023) mostra chiaramente che la siccità del 2022 è un evento-record in termini di portata fluviale lungo l'asta principale del Fiume Po. Indipendentemente dalla finestra di aggregazione considerata: se, cioè, si considerano uno o più mesi a partire da luglio 2022, la portata media del fiume Po a Pontelagoscuro, in prossimità della foce, osservata nell'estate 2022 è di gran lunga la più bassa degli ultimi due secoli. La Figura 7.5, ripresa dall'articolo mostra:

**A.** Le dieci siccità più severe secondo diverse finestre di aggregazione: L (luglio), GL (giugno-luglio), MGL (maggio-giugno-luglio) e AMGL (aprile-maggio-giugno-luglio); i numeri indicano gli anni di siccità e il colore il corrispondente periodo di ritorno.

**B-E** Portata media del fiume Po a Pontelagoscuro durante il periodo di osservazione per le finestre di aggregazione considerate. Le linee blu chiaro mostrano la portata media stagionale del fiume, mentre le linee blu scuro indicano la media mobile centrata su dieci anni. Le portate fluviali registrate nell'estate 2022 sono riportate in tonalità di rosso in base ai rispettivi periodi di ritorno.

Oltre a evidenziare che il 2022 è sempre al primo posto, si può constatare che 6 delle 10 peggiori annate siccitose si sono verificate nel periodo contemporaneo (dal 2003 in poi).



**Figura 7.5** Analisi delle portate del fiume Po registrate a Pontelagoscuro nel periodo 1807-2022 (modificata da Montanari et al. 2023).



# Impatti del cambiamento climatico sulle acque superficiali

Secondo il Sesto rapporto (AR6) dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2023), si prevede una riduzione della quantità della risorsa idrica rinnovabile, sia superficiale che sotterranea, in gran parte del territorio italiano. Questa riduzione è principalmente dovuta a un'attesa riduzione delle precipitazioni, sia liquide (pioggia) che solide (neve). D'altro canto, la crescente temperatura aumenterà l'evapotraspirazione potenziale (cioè quella massima in corrispondenza di laghi o terreni saturi), seppur l'impatto sull'evapotraspirazione reale (cioè quella effettiva che tiene conto della quantità di acqua disponibile nel suolo) è molto più complesso. L'aumento delle temperature innalzerà il limite nevoso ad altitudini maggiori e diminuirà le riserve idriche nivali e glaciali, non necessariamente a discapito del deflusso. Ci si attende infatti un aumento dei deflussi nel breve periodo nella stagione primaverile, e una riduzione complessiva a lungo termine. Pertanto, ci si attendono variazioni marcate del flusso fluviale stagionale.

Per i torrenti montani (cioè quelli che si originano a quote elevate, superiori a 1500 metri sul livello del mare), ci si attende un aumento di flusso invernale, e minori portate estive. In generale, si prevede una diminuzione importante delle portate di magra pari a circa il 40% (Forzieri et al., 2014), ulteriormente aggravata dall'aumento dei prelievi antropici che potrebbe causare un'ulteriore riduzione pari al 10-15%.

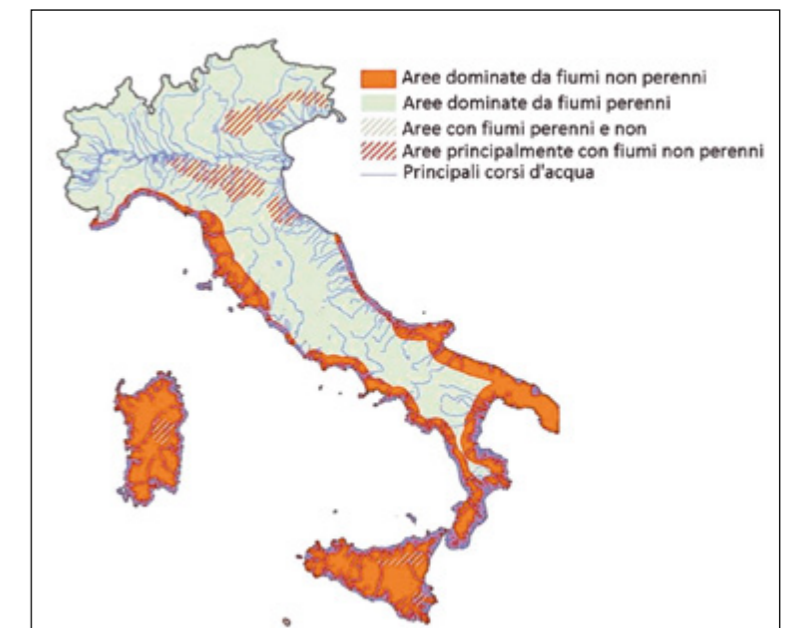
La maggior parte degli studi disponibili che hanno valutato gli effetti dei cambiamenti climatici sulle risorse idriche superficiali sono concentrati sui bacini idrografici più grandi come, ad esempio, il bacino del fiume Po (Coppola et al., 2014; Vezzoli et al., 2015) e del fiume Toce (Ravazzani et al., 2014). Per il bacino del Po, si prevede un anticipo della portata di picco primaverile da maggio ad aprile, un aumento del deflusso invernale soprattutto in alta quota e una riduzione delle portate primaverili e soprattutto estive (fino al 40%). Un ulteriore aspetto importante che accomuna diversi studi è rappresentato da un notevole aumento della variabilità intra-annuale, soprattutto in autunno e in inverno. Per quanto riguarda invece i bacini di altri distretti idrografici del centro e Sud Italia (ad esempio, D'Oria et al., 2019), si prevede una riduzione dei deflussi di minore entità (tra l'1% e il 7%).

In merito al volume delle riserve idriche, Pedro-Monzonis et al. (2016) hanno stimato una riduzione del 24% nel bacino del Po e hanno trovato che l'aumento dell'evapotraspirazione ha un impatto più rilevante dei prelievi antropici su tale riduzione. Al Sud Italia, Longobardi et al. (2014) attribuiscono alla riduzione delle precipitazioni la causa principale dell'insufficienza dei sistemi idrici piuttosto che a un aumento della domanda idrica. Diversamente, in Italia centrale, la riduzione della capacità dei serbatoi rappresenta il problema principale da affrontare per migliorare l'efficienza dei sistemi di approvvigionamento idrico (Preziosi et al., 2013).

Un tema rilevante riguarda i fiumi temporanei, il cui regime idrologico naturale è fortemente alterato dal cambiamento climatico (Brouziyne et al., 2021). I fiumi temporanei (Fig. 7.6), intermittenti ed effimeri sono sistemi fluviali caratterizzati da periodi di asciutta totale o di tratti della rete idrografica (Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare, decreto ministeriale n. 131 del 16 giugno 2008). Essi sono predominanti nella regione del Mediterraneo e costituiscono circa il 50% della rete idrografica a livello globale (Tramblay et al., 2021). Nelle regioni del Sud Italia (in particolare Puglia, Calabria, Sardegna e Sicilia) buona parte dei corsi d'acqua mostra un carattere temporaneo. Essi costituiscono un'importante risorsa per l'agricoltura che potrebbe essere a rischio in futuro. Recenti studi condotti in Puglia hanno evidenziato che negli ultimi decenni si sono registrati cambiamenti del regime delle portate, in particolare un significativo aumento del numero di giorni con deflusso nullo e un anticipo del periodo di asciutta, oltre a una generale riduzione dei deflussi (De Girolamo et al., 2022). Queste alterazioni sono state causate in buona parte dalla riduzione delle precipitazioni nevose indotta dall'aumento della temperatura registrata nelle aree montane. De Girolamo et al. (2022) hanno stimato che dal 1950 al 2012, nella stazione di monte Faeto (866 m s.l.m.) nel bacino idrografico del fiume Celone, il numero di giorni con temperature inferiori a 0 °C è diminuito di 12 giorni ogni 10 anni con conseguente riduzione delle precipitazioni nevose.

Per i prossimi decenni, le proiezioni climatiche indicano un aumento delle temperature e una riduzione delle precipitazioni i cui principali effetti sul regime idrologico, stimati mediante modello, sono una transizione verso condizioni più estreme (estensione del periodo di asciutta, aumento degli eventi di piena, cosiddetti *flash floods*) e un aggravamento delle condizioni estreme di magra (De Girolamo et al., 2022). Le alterazioni del regime idrologico potranno avere importanti implicazioni sull'ecosistema e sulla qualità delle acque superficiali. La riduzione dei volumi addotti agli invasi, inoltre, richiederà una revisione periodica dei deflussi ecologici. La gestione dei fiumi temporanei dovrà necessariamente affrontare nuove sfide per mantenere e/o ripristinare gli ecosistemi fluviali e al tempo stesso soddisfare l'aumento della domanda in un contesto di ridotta disponibilità.

**Figura 7.6**  
Distribuzione dei fiumi temporanei in Italia (modificata da Skoulikidis et al., 2017).





# Strumenti modellistici di analisi e previsionali

L'Istituto italiano per la ricerca e la protezione dell'ambiente (ISPRA), nell'ambito delle attività di idrologia operativa nazionale, ha sviluppato un modello di bilancio idrico distribuito denominato BIGBANG - Bilancio Idrologico GIS BAsed a scala Nazionale su Griglia regolare - volto a valutare le diverse componenti del bilancio idrologico idrico su scala mensile (Braca et al., 2018; Braca et al., 2021; Braca et al., 2023 <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/il-bilancio-idrologico-gis-based-a-scala-nazionale-su-griglia-regolare-bigbang>). L'idea di BIGBANG, arrivato ora alla sua versione 7.0, è quella di fornire una immagine a scala nazionale dell'attuale condizione delle risorse idriche focalizzandosi sul deficit di precipitazioni e sulla conseguente riduzione della disponibilità naturale di risorse idriche rinnovabili. I principali vantaggi di questo modello consistono nell'elevato numero di osservazioni a terra utilizzato per produrre tali stime. A partire dal suo iniziale sviluppo, il modello BIGBANG è stato oggetto di una continua attività di aggiornamento e miglioramento dei codici utilizzati, oltre che di ampliamento della base dati e delle carte tematiche utilizzati nelle valutazioni del bilancio idrologico. Tale attività continuerà anche nei prossimi anni sia nell'ambito del "Progetto Bilancio Idrologico Nazionale", specifica linea di azione prevista nel Piano operativo ambiente FSC 2014-2020 promosso dal MiTE, sia nel corso dell'Azione di accompagnamento del programma Mirror Copernicus del Piano strategico Space Economy promossa dal Ministero dello

sviluppo economico (MISE). Per maggiori dettagli sul modello BIGBANG si rimanda al Capitolo 1.

Un'altra iniziativa a scala nazionale rivolta principalmente allo studio delle alluvioni ma di recente utilizzata sempre di più anche in ambito siccità è il modello idrologico Continuum, descritto in Silvestro et al. (2013) e Silvestro et al. (2015), che è stato utilizzato per molti studi di ricerca sugli estremi idrologici (ad esempio, Alfieri et al., 2022; Corral et al., 2019; Laiolo et al., 2016). Il modello risolve sia i bilanci di massa che quelli energetici su una maglia quadrata regolare utilizzando un approccio "force-restore" per la parte energetica e uno schema classico a serbatoi con un singolo strato per il contenuto idrico del suolo nella zona delle radici. Continuum gira operativamente sul territorio italiano nell'ambito delle attività di monitoraggio e previsione a supporto della Protezione civile italiana alla scala di 500 m producendo mappe dell'umidità del suolo con una risoluzione temporale di 1h. Il modello genera inoltre portate orarie sulle maggiori stazioni di monitoraggio idrologico regionale.

In ambito operativo, le diverse regioni e distretti idrografici si sono serviti di svariati strumenti modellistici di letteratura o sviluppati *ad hoc*, che integrano in un unico modello numerico, sia la modellistica idrologica e idrogeologica che la modellistica relativa agli utilizzi. Una panoramica di alcuni di questi strumenti è riportata nel Capitolo 11.

Sebbene non specificatamente sviluppate per il monitoraggio e la previsione della siccità idrologica, numerose iniziative sono state intraprese nell'ambito della modellazione utilizzando sia modelli concettuali che fisicamente basati, delle quali si riportano qui alcuni brevi cenni. In Italia centrale e in Nord Italia, il Modello idrologico semidistribuito in continuo (MISDc), a cura del gruppo di idrologia del CNR-IRPI (Brocca et al., 2011; Camici et al., 2020; Cislighi et al., 2020), originariamente sviluppato per la previsione delle inondazioni e successivamente declinato in diverse versioni, ha trovato di recente applicazione anche per gestione delle risorse idriche nell'ambito del progetto dell'Agenzia spaziale europea (ESA): Digital Twin Earth Hydrology (Brocca et al., 2023; Brocca et al., 2024). Il modello Soil Water Assessment Tool (SWAT, <https://swat.tamu.edu/>), noto modello sviluppato dall'United States Department of Agriculture (USDA) per la gestione delle risorse idriche a scala di bacini, ha trovato anch'esso applicazioni al contesto italiano per la valutazione degli effetti della siccità idrologica nel Nord Italia (Bernini et al., 2023). Il modello Topkapi (Ciarapica e Todini, 2002) è inoltre utilizzato in diversi contesti operativi nei centri funzionali regionali della protezione civile. In Calabria, a fronte dell'aumentato rischio di siccità favorito dalle mutate condizioni climatiche, sono stati proposti sistemi d'allertamento (Mendicino e Versace, 2007) e modelli di gestione per sistemi irrigui, potabili e a utilizzo multiplo (ad esempio Maiolo et al., 2017; Senatore et al., 2022).

In campo non operativo, una iniziativa degna di nota è la Rianalisi MERIDA (Meteorological Reanalysis Italian DATaset, Bonanno et al., 2019, si veda a tal proposito anche il Capitolo 4 del presente volume) sviluppata per far fronte alle

sempre più frequenti condizioni meteorologiche estreme degli ultimi 20 anni. Il sistema di rianalisi MERIDA - richiesto dal 'Tavolo di lavoro per la resilienza' istituito dall'Autorità di regolazione per energia reti e ambiente (ARERA) per far fronte ai diversi disservizi al sistema elettrico italiano a seguito di eventi estremi meteo-idrologici - consiste in un *downscaling* dinamico della rianalisi globale ERA5 utilizzando il modello ad area limitata Advanced Research - Weather Research & Forecasting Model (ARW). In ambito acque superficiali, tale rianalisi non produce dati di ruscellamento e portata, ma risulta comunque importante la sua citazione per qualsiasi iniziativa futura in tale ambito.

Una recente e interessante soluzione alla modellazione idrologica anche allo scopo di predire la siccità idrologica è costituita da GEOframe (Formetta et al., 2014), un sistema informatico per la modellazione idrologica che mira a incorporare il paradigma Digital Twin Earth (Rigon et al., 2022). Il termine "sistema" sottolinea che si tratta di un'infrastruttura flessibile in grado di ospitare diverse soluzioni di modellazione (componenti del modello). Questa caratteristica deriva dall'uso del sistema-framework Object Modeling System (v3) (David et al., 2013), che permette di collegare queste componenti per studiare specifici problemi idrologici, fornendo molteplici alternative per la loro descrizione matematica e numerica. Per la sua adattabilità GEOframe è stato impiegato in simulazioni idrologiche a diverse scale spaziali, dall'idrologia di bacino per lo studio delle interazioni tra acque superficiali e sotterranee e le loro dinamiche anche in condizioni di siccità (Azimi et al., 2023), ai bacini medio-grandi come il fiume Po e il fiume Adige (Morlot et al., 2024) nel contesto italiano (applicazioni in altri contesti non sono qui riportate).



# Relazione quantità - qualità delle acque superficiali

Le variazioni del regime idrologico su diversi orizzonti temporali, siano esse indotte da variazioni del regime termo-pluviometrico e/o da interventi antropici, hanno un indubbio impatto non solo sulla quantità delle acque superficiali e sotterranee e quindi sulla variabilità nel tempo e nello spazio delle risorse idriche, ma anche sulla loro qualità. Una trattazione

estesa della relazione quantità-qualità delle acque superficiali esula dagli scopi del presente capitolo. Tuttavia, riteniamo utile accennare ad alcuni aspetti di carattere quantitativo che, specie in un contesto di cambiamento climatico, possono determinare un deterioramento qualitativo delle risorse idriche e dunque, di fatto, un'ulteriore riduzione di disponibilità.

## Aumento delle concentrazioni a causa della diminuzione dei volumi disponibili

In generale, i carichi apportati dalle sorgenti di immissione puntuali degli inquinanti sono indipendenti dal regime idrologico o dalle condizioni meteorologiche, mentre gli apporti inquinanti da fonti diffuse sono estremamente dipendenti dall'alternanza di eventi meteorologici estremi quali la siccità e le piogge intense. L'apporto di pesticidi da suoli agricoli e di inquinanti depositati sulle superfici urbane ai corpi idrici superficiali è dovuto principalmente al dilavamento o deflusso superficiale indotto da eventi di precipitazione, nel caso di sostanze chimiche provenienti dall'uso quotidiano come residui farmaceutici e prodotti per la cura della persona ed emesse dagli impianti di trattamento civili, oppure sostanze chimiche di sintesi emesse da impianti di trattamento industriali, il carico emesso delle sostanze emesse è costante e quindi indipendente dal regime pluviometrico

e quindi dalla disponibilità di acqua del corpo idrico recettore. Di conseguenza, in regime di siccità idrologica la riduzione di portata dei corsi d'acqua o del livello dei laghi e bacini ha come ricaduta immediata l'aumento delle concentrazioni degli inquinanti dovuti agli scarichi urbani o industriali nei corpi idrici recettori, con un inevitabile peggioramento della qualità delle acque e impatti sulle biocenosi (Keller et al., 2014). In molti casi di corsi d'acqua a ridotta portata o a carattere temporaneo o intermittente si giunge alla situazione limite che l'acqua proveniente dalla depurazione urbana diventa la principale se non unica sorgente di acqua per il corso d'acqua stesso (Ricci et al., 2022). Uno studio su scala mondiale sull'impatto degli impianti di trattamento sui fiumi recettori ha stimato quale sia la percentuale di acqua proveniente dagli impianti nei fiumi italiani (Tab. 7.1).

Paese	Lunghezza totale di fiumi a valle di impianti di depurazione (km)	Percentuale di fiumi a valle di impianti di depurazione che contengono più di x di acqua di scarico trattata (%)							
		Condizioni di portata media x=1% x=5% x=10% x=50%				Condizioni di portata bassa x=1% x=5% x=10% x=50%			
Italia	19 777	53.9	12	4.8	0.2	83.5	41.8	21.3	1
Globale	1 214 36	32.8	10.9	5.9	0.9	55.9	27.1	17.6	5.1

Tabella 7.1

Percentuale di fiumi a valle di impianti di depurazione che contengono più di x % di acqua di scarico trattata in diverse condizioni idrologiche (modificata da Ehalt Macedo et al., 2022).

In regime di portata media solo il 4.8% dei fiumi italiani ha una percentuale di acqua proveniente dagli impianti >10%. In regime di magra questa percentuale aumenta fino al 21.3% dei fiumi italiani. Sempre in regime di magra il 41.8% dei fiumi ha una frazione di acqua >5% proveniente da impianti di depurazione e l'83.5% dei fiumi ha una frazione d'acqua > % proveniente da impianti di depurazione, e vi è anche un 1% dei fiumi nei quali la frazione di acqua da depurazione supera il 50% dell'acqua totale del fiume stesso (Ehalt Macedo et al., 2022). Una stima del contributo degli impianti di trattamento urbani sul reticolo idrografico del fiume Po in occasione dell'evento di siccità estrema del 2022 è riportato nel Capitolo 10.

Uno studio recente (Büttner et al., 2022) ha cercato di identificare una soglia percentuale di scarico delle acque reflue rispetto alla portata del corpo idrico, al di sopra della quale può verificarsi un danno ecologico. A tal fine è stato sviluppato un database da una serie di set di dati europei contenenti lo stato ecologico, la portata fluviale modellata e la quantità stimata di effluenti scaricati dai 26 523 impianti di trattamento delle acque reflue europei nei fiumi e nei torrenti. Utilizzando questi dati, è stata poi calcolata la quota di scarico delle acque reflue urbane rispetto alla portata dei corsi d'acqua. L'analisi ha dimostrato che lo stato ecologico dei corsi d'acqua europei (e dei piccoli fiumi) diminuisce in modo consistente con l'aumento della frazione di scarico delle acque reflue urbane rispetto al flusso di corrente. I ricercatori

hanno calcolato che il valore critico della quota di scarico al di sopra del quale si sarebbe verificato un danno ecologico era del 6.5%. Come evidenziato dalla Tabella 7.1 in regime di magra in Italia quasi il 40% dei fiumi sarebbe a rischio di non rispettare il buono stato ecologico previsto dalla normativa (Direttiva WFD 2000/60/CE). Questa situazione ha un'ovvia ricaduta in termini di scadimento della qualità del corpo idrico anche ai fini della classificazione di qualità prevista dalla normativa europea (Direttiva 2000/60/CE), ma soprattutto pone dei rischi accresciuti per le funzioni che il corso d'acqua svolge in termini di ricarica della falda e uso agricolo.

Alla riduzione delle portate sono però collegati altri impatti sulla qualità delle acque strettamente connessi con episodi siccitosi (eventualmente accompagnati da temperature elevate) e tali per cui la disponibilità di risorsa per i diversi usi si riduce significativamente (ad esempio indisponibilità di acqua invasata a causa di bloom algale, salinizzazione delle falde per diminuzione delle portate e/o aumento delle pressioni, etc.). Tra queste ricadute della riduzione di portate dei principali fiumi, una delle più studiate per i suoi impatti economici e sanitari è la risalita del cuneo salino di cui si tratterà in modo diffuso nel Capitolo 9. Gli effetti di questo fenomeno sul Po impattano sulla disponibilità di acqua di buona qualità destinata alla potabilizzazione e all'irrigazione e di conseguenza impatta sulle rese agricole, nonché sulla salinizzazione dei terreni stessi.



Nel caso degli ambienti lacustri di notevole importanza è la stima dei carichi di nutrienti trasferiti dal bacino idrografico al lago, attraverso i principali immissari. Tali carichi dipendono sia dalla portata del tributario sia dalle concentrazioni di nutriente. Il carico di nutrienti, in particolare di fosforo, influenza l'intera ecologia del lago, ma è spesso conosciuto con un grado di dettaglio insufficiente. Le portate dei tributari minori possono essere in genere stimate solo attraverso approcci indiretti (ad esempio Fenocchi et al., 2023), mentre le concentrazioni delle sostanze nutrienti sono soggette a dinamiche complesse, che dipendono da diversi fattori quali il regime idrologico e l'antropizzazione del territorio (Moatar et al., 2017; Musolff et al., 2015). Una adeguata comprensione della relazione portata - concentrazione è quindi necessaria per una corretta simulazione dei processi fisico-chimico-biologici che avvengono nell'ambiente lacustre. I carichi di nutrienti influenzano in particolare fioriture algali la cui intensità e frequenza potrebbe

diminuire in anni caratterizzati da scarsa piovosità per poi aumentare durante i periodi di elevati apporti da bacino (Copetti et al., 2017). Nella gestione dei laghi lacustri risulta di particolare interesse l'utilizzo di modelli accoppiati idrodinamico/ecologici in grado di simulare le risposte degli ambienti lacustri ai carichi di nutrienti e alle forzanti climatiche (Hipsey et al., 2019; Nielsen et al., 2017).

Tali modelli sono quindi di particolare interesse anche per la modellazione dell'impatto della siccità e delle fluttuazioni di livello sui corpi idrici lentici. Riproducendo l'andamento delle dinamiche di mescolamento e stratificazione dei laghi, i cicli di ossigeno/fosforo/azoto e carbonio e i bloom algali (Dresti et al., 2021). I modelli accoppiati sono adatti per studiare i fenomeni a lungo termine nei corpi idrici lentici, supportando anche simulazioni che considerino i cambiamenti climatici e le variazioni di nutrienti in ingresso dovute a periodi siccitosi oppure ad eventi estremi di precipitazione.

Tra gli aspetti qualitativi degli impatti del cambiamento climatico sulle acque superficiali è importante considerare le conseguenze su mobilizzazione e trasporto di sedimento e fosforo lungo i versanti dei bacini idrografici. Non si può infatti non accennare alle conseguenze delle piogge particolarmente intense e di breve durata, che si verificano con frequenza sempre maggiore in vaste aree non solo del nostro Paese, ma di tutta l'Europa e che, pur non costituendo l'argomento principale del presente volume, rappresentano un importante aspetto dei cambiamenti climatici, in relazione alla gestione delle risorse idriche.

Questi eventi sono responsabili, tra l'altro, del trasporto di sedimento e fosforo verso i corpi idrici superficiali e del conseguente verificarsi non solo di fenomeni di eutrofizzazione, ma anche della perdita di fertilità dei suoli e dell'interrimento di laghi e bacini di raccolta delle acque piovane.

Piogge intense e di breve durata causano il distacco delle particelle di terreno e se la quantità di pioggia supera la capacità di infiltrazione del terreno, anche il verificarsi di fenomeni di ruscellamento superficiale e di conseguenza, di erosione. Indicativamente, in riferimento alle aree temperate, Evans (1978) riporta che 7.5 mm/giorno di pioggia possono causare erosione, mentre Boardman e Robinson (1985) riportano 5 mm/ora come la più bassa intensità di pioggia in grado di causare erosione severa. Il ruscellamento superficiale è inoltre responsabile del trasporto di considerevoli quantità di nutrienti e in particolare di fosforo verso i corpi idrici superficiali. È noto, infatti, che la maggior parte del fosforo che raggiunge i corpi idrici superficiali nell'arco dell'anno è asportato duran-

te pochi eventi di pioggia particolarmente intensi. È quindi possibile ipotizzare che molto probabilmente, alla sopra menzionata intensificazione del ciclo idrologico causata dal cambiamento climatico, consegua un'intensificazione del ciclo del fosforo. I fenomeni appena descritti sono in grado di amplificare gli effetti delle temperature più elevate e dell'aggravarsi della siccità sulla disponibilità delle risorse idriche. Esiste infatti, un'interdipendenza anche tra le conseguenze delle diverse manifestazioni dei cambiamenti climatici (ad esempio, aumento delle temperature e clima secco da un lato e precipitazioni estreme dall'altro) i cui opposti effetti, invece di neutralizzarsi l'uno con l'altro, come potrebbe apparire ad un primo esame, si amplificano a vicenda. A tale riguardo, basti pensare alle aree coltivate in cui poche specie vegetali sopravvivono alle estati calde e secche e le piogge autunnali già di per sé piuttosto intense, cadono su suoli non protetti, causando fenomeni significativi di erosione e trasporto di inquinanti, che interessano quindi anche aspetti qualitativi della gestione della risorsa. A proposito degli argomenti trattati nel paragrafo, vale la pena menzionare l'interessante review di van Vliet et al. (2023) in cui sono riportati numerosi esempi concreti di indisponibilità della risorsa dovuta al deterioramento della qualità conseguente ai cambiamenti climatici.

Infine, per quanto accennato nel presente paragrafo, va da sé che problemi complessi come quelli legati alle conseguenze dei cambiamenti climatici sulla qualità delle acque superficiali, non possono non essere affrontati che con un approccio olistico, che prenda in considerazione oltre agli aspetti legati alla siccità, anche quelli conseguenti agli eventi estremi di pioggia.



Le dighe stanno diventando sempre più strategiche per la conservazione delle risorse idriche e per la transizione energetica. Tuttavia, negli invasi si accumulano ingenti quantitativi di sedimenti che intrappolano inquinanti di origine naturale e antropica e possono compromettere la qualità delle acque invase e ridurre la capacità utile degli invasi. Si calcola che l'accumulo di sedimenti in 468 grandi invasi possa ridurre il volume di invaso del 20% (2<sup>a</sup> Relazione alla cabina di regia. <https://commissari.gov.it/scarsitaidrica/attivita/cabina-di-regia/relazioni-per-la-cabina-di-regia/seconda-relazione-del-commissario/seconda-relazione/>). Per questo, il "Decreto siccità" (D.M. n. 39/2023, legge n. 68/2023) prevede che in diversi invasi, ritenuti strategici per la conservazione delle risorse idriche, siano rimossi i sedimenti accumulati, per recuperare così volume utile. Il tasso di interrimento degli invasi può essere consistente anche in assenza di precipitazioni intense, in quanto diverse dighe collettano le acque di bacini allacciati presenti a monte, utilizzati per la produzione di energia idroelettrica (Regione Lombardia, 2008).

In Nord Italia, una delle strategie più utilizzate per rimuovere i sedimenti dagli inva-

si è la fluitazione, ossia il rilascio controllato di sedimenti nel corpo idrico di valle, un'operazione che determina, in primo luogo, un impatto fisico immediato sull'ecosistema fluviale a valle, che viene fortemente alterato dal punto di vista idromorfologico, ma che può provocare anche un impatto ecotossicologico a lungo termine, a causa del rilascio di contaminanti accumulati nei sedimenti, tra cui elementi in traccia, IPA e PCB (Marziali et al., 2017; Lepage et al., 2020). Il rilascio di contaminanti dai sedimenti nella colonna d'acqua può diventare particolarmente critico in condizioni di basse portate, dove la diluizione in acque provenienti da monte può risultare scarsa. La necessità di una caratterizzazione chimica ed ecotossicologica dei sedimenti degli invasi ai fini della gestione delle operazioni di mobilizzazione degli stessi è stata recentemente introdotta con il D.M. 205 del 12 ottobre 2022 (Regolamento recante criteri per la redazione del progetto di gestione degli invasi) e, a livello regionale, è parte integrante delle "Direttive tecniche per la predisposizione, l'approvazione e l'attuazione dei progetti di gestione degli invasi" della Regione Lombardia (D.G.R. X/5736 del 24 ottobre 2016), alla cui stesura ha partecipato l'Istituto di ricerca sulle acque del CNR.



Sulla base delle evidenze riportate in questo capitolo, sono state individuate le principali domande di ricerca da indirizzare per migliorare la definizione del bilancio idrico nel comparto delle acque superficiali. Ovviamente, alcune domande si intersecano con quelle riportate in altri capitoli perché riguardano i deficit di conoscenza attualmente presenti in altri comparti (ad esempio, criosfera, atmosfera e usi dell'acqua).

La rete di monitoraggio delle acque superficiali in Italia è molto ben sviluppata, grazie all'eredità del Servizio Idrografico Nazionale che ha garantito il monitoraggio dei corsi d'acqua e degli invasi a partire dai primi anni del 1900. Tuttavia, risulta chiaro che ancora abbiamo un deficit di conoscenza per il monitoraggio del reticolo secondario, soprattutto dei fiumi temporanei e dei piccoli bacini montani. Per indirizzare il monitoraggio dei fiumi temporanei risulta fondamentale lo sviluppo di tecniche di telerilevamento per monitorare cambiamenti nella superficie (riduzione delle dimensioni fino alla scomparsa) (Salerno et al., 2014), e nel colore dell'acqua come proxy del carico solido sospeso (Matta et al., 2017). Il monitoraggio biologico volto a verificare gli effetti ambientali dei cambiamenti (eutrofizzazione, acidificazione, cambiamento climatico) può essere un'ulteriore tecnica per il monitoraggio dei fiumi temporanei. Se si considerano i piccoli bacini montani, l'influenza della neve, e soprattutto dei ghiacciai sui deflussi, rappresenta oggi la maggior fonte di incertezza anch'essa potenzialmente affrontabile utilizzando tecniche di telerilevamento (ad esempio, Alfieri et al., 2022).

Un secondo aspetto che richiede particolare attenzione riguarda la capacità di comprendere e prevedere l'intensificazione della siccità idrologica, sia per le cosiddette "siccità lampo" (tipo di siccità caratterizzata da un rapido inizio, intensificazione e gravità in un arco di tempo relativamente breve, di solito entro pochi giorni o settimane) che risultano essere sempre più frequenti, sia, e soprattutto, per le "siccità idrologiche multi-annuali" (la siccità nel bacino del Po è un classico esempio di siccità multi-annuale). Lo studio di questi fenomeni richiede il monitoraggio non solo delle portate fluviali, ma anche delle altre componenti del ciclo idrologico e in particolare della quantità di acqua immagazzinata nel suolo e nel sottosuolo e dell'evapotraspirazione. Risulta necessario comprendere quali sono le ragioni dell'innescarsi di questi fenomeni, probabilmente legati non solo a fattori climatici ma anche alle caratteristiche geomorfologiche dei bacini, così come la copertura dei suoli, la vegetazione e le caratteristiche dei suoli. Tale attività richiede uno studio multidisciplinare e le recenti osservazioni satellitari ad alta risoluzione possono rappresentare un elemento fondamentale per colmare questo importante divario di conoscenza.

A fare da contrappunto all'aumento dei fenomeni di siccità idrologica, il verificarsi sempre più frequente di piogge molto intense e di breve durata altera in maniera significativa gli apporti idrici a fiumi, laghi e alle acque del mare con conseguenze sui termini del bilancio. Un esempio sono gli eventi occorsi su parte della Lombardia a maggio 2024, e sul territorio dell'Emilia-Romagna nello stesso periodo del 2023, che inoltre



rappresentano una crescente minaccia per l'ambiente, la salute umana e lo sviluppo socioeconomico. Anche a tale riguardo, come per i fenomeni di siccità idrologica, vi è una mancanza di analisi approfondite sulle cause fisiche responsabili di questi eventi, spesso collegati a interazioni tra terre emerse, oceani e atmosfera (Wang et al., 2022), e su come il riscaldamento globale indotto dalle attività umane, contribuisca al loro verificarsi.

Un altro aspetto di notevole importanza riguarda l'impatto degli interventi dell'uomo attraverso la costruzione e la regolazione degli invasi e l'irrigazione, sui deflussi, e in particolare sui regimi di magra, sugli ecosistemi fluviali, e sui sistemi lacustri stessi (Balbus et al., 2013). Risulta necessario valutare gli impatti della presenza di invasi/sbarramenti fluviali, in generale sugli ecosistemi fluviali di valle e di monte, sulla ricarica della falda acquifera e sul ritiro delle coste. È possibile sviluppare protocolli gestionali che permettano di utilizzare gli invasi in maniera (più) soste-

nibile, in modo da minimizzare gli impatti sugli ecosistemi fluviali, anche alla luce del cambiamento climatico in atto; in particolare, è necessario focalizzare il problema della gestione della qualità e quantità dei sedimenti accumulati (Marziali et al., 2017; Lepage et al., 2020), e quindi sottratti alla naturale morfologia fluviale e al ripascimento delle coste, e arrivare a definire il Deflusso Ecologico specifico per ogni corso d'acqua.

Sempre a proposito degli effetti indiretti, causati dall'uomo sui termini del bilancio riferiti al comparto acque superficiali, ma non solo, si possono menzionare infine, anche i cambiamenti dell'uso del suolo. Tra questi, ad esempio, l'urbanizzazione che determina l'impermeabilizzazione dei terreni, la riduzione dell'infiltrazione e dell'evaporazione, l'aumento del ruscellamento superficiale, nonché variazioni della ricarica delle acque sotterranee, tutti fenomeni ancora particolarmente difficili da quantificare, allo stato attuale delle conoscenze (Orr et al., 2022).



## Referenze bibliografiche

Alfieri, L., Avanzi, F., Delogu, F., Gabellani, S., Bruno, G., Campo, L., Libeno, A., Massari, C., Tarpanelli, A., Rains, D., Miralles, D. G., Quast, R., Vreugdenhil, M., Wu, H., Brocca, L., 2022. High-resolution satellite products improve hydrological modeling in northern Italy. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 26(14), 3921–3939. <https://doi.org/10.5194/hess-26-3921-2022>

Azimi, S., Massari, C., Formetta, G., Barbetta, S., Tazioli, A., Fronzi, D., ... Rigon, R., 2023. On understanding mountainous carbonate basins of the Mediterranean using parsimonious modeling solutions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 27(24), 4485–4503. <https://doi.org/10.5194/hess-27-4485-2023>

Balbus, J. M., Boxall, A. B. A., Fenske, R. A., McKone, T. E., Zeise, L., 2013. Implications of global climate change for the assessment and management of human health risks of chemicals in the natural environment. *Environ. Toxicol. Chem.*, 32(1), 62–78. <https://doi.org/10.1002/etc.2046>

Bernini, A., Becker, R., Adeniyi, O. D., Pilla, G., Sadeghi, S. H., Maerker, M., 2023. Hydrological implications of recent droughts, (2004–2022): A SWAT-based study in an ancient lowland irrigation area in Lombardy, northern Italy. *Sustainability*, 15(24), 16771. <https://doi.org/10.3390/su152416771>

Boardman, J., Robinson, D. A., 1985. Soil erosion, climatic vagary and agricultural change on the Downs around Lewes and Brighton, autumn 1982. *Applied Geography*, Sevenoaks, England), 5(3), 243–258. [https://doi.org/10.1016/0143-6228\(85\)90025-6](https://doi.org/10.1016/0143-6228(85)90025-6)

Bonanno, R., Lacavalla, M., Sperati, S., 2019. A new high-resolution Meteorological Reanalysis Italian Dataset: MERIDA. *Q. J. R. Meteorol. Soc. (Great Britain)*, 145(721), 1756–1779. <https://doi.org/10.1002/qj.3530>

Braca, G., Ducci, D., 2018. Development of a GIS based procedure (BIGBANG 1.0) for evaluating groundwater balances at national scale and comparison with groundwater resources evaluation at local scale. In En-

viron. Earth Sci., (pp. 53–61). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-69356-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-69356-9_7)

Braca, G., Bussettini, M., Lastoria, B., Mariani, S., Piva, F., 2021. Il Bilancio Idrologico Gis BAsed a scala Nazionale su Griglia regolare – BIGBANG: metodologia e stime. Rapporto sulla disponibilità naturale della risorsa idrica. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Rapporti 339/21, Roma. ISBN: 978-88-448-1041-2

Braca, G., Mariani, S., Lastoria, B., Piva, F., Archi, F., Botto, A., Casaioli, M., Forte, T., Marchetti, G., Peruzzi, C., Tropeano, R., Vendetti, Cl., Bussettini, M., 2023. Bilancio idrologico nazionale: focus su siccità e disponibilità naturale della risorsa idrica rinnovabile. Aggiornamento al 2022. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Rapporti 388/2023. ISBN: 978-88-448-1167-9

Brocca, L., Melone, F., Moramaro, T., 2011. Distributed rainfall-runoff modelling for flood frequency estimation and flood forecasting. *Hydrol. Process.*, 25(18), 2801–2813. <https://doi.org/10.1002/hyp.8042>

Brocca, L., 2023. Digital Twin Earth Hydrology (Evolution): Final Report. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.8089044>

Brocca, L., Barbetta, S., Camici, S., Ciabatta, L., Dari, J., Filippucci, P., Massari, C., Modanesi, S., Tarpanelli, A., Bonaccorsi, B., Mossaffa, H., Wagner, W., Vreugdenhil, M., Quast, R., Alfieri, L., Gabellani, S., Avanzi, F., Rains, D., Miralles, D.G., Mantovani, S., Briese, C., Domeneghetti, A., Jacob, A., Castelli, M., Camps-Valls, G., Volden, E. and Fernandez, D., 2024. A Digital Twin of the terrestrial water cycle: a glimpse into the future through high-resolution Earth observations. *Front. Sci.*, 1. <https://doi.org/10.3389/fsci.2023.1190191>

Brouziyne, Y., De Girolamo, A. M., Aboubdillah, A., Benaabidate, L., Bouchaou, L., Chehbouni, A., 2021. Modeling alterations in flow regimes under changing climate in a Mediterranean watershed: An analysis of ecologically-relevant hydrological indicators.



- Ecol. Inform., 61(101219), 101219. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101219>
- Bruno, G., Avanzi, F., Gabellani, S., Ferraris, L., Cremonese, E., Galvagno, M., Massari, C., 2022. Disentangling the role of subsurface storage in the propagation of drought through the hydrological cycle. *Adv. Water Resour.*, 169(104305), 104305. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2022.104305>
- Büttner, O., Jawitz, J. W., Birk, S., Borchardt, D., 2022. Why wastewater treatment fails to protect stream ecosystems in Europe. *Water Res.*, 217(118382), 118382. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118382>
- Camici, S., Massari, C., Ciabatta, L., Marchesini, I., Brocca, L., 2020. Which rainfall score is more informative about the performance in river discharge simulation? A comprehensive assessment on 1318 basins over Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24(10), 4869–4885. <https://doi.org/10.5194/hess-24-4869-2020>
- Ciarapica, L., Todini, E., 2002. TOPKAPI: a model for the representation of the rainfall-runoff process at different scales. *Hydrol. Process.*, 16(2), 207–229. <https://doi.org/10.1002/hyp.342>
- Cigizoglu, H. K., Bayazit, M., Önöz, B., 2005. Trends in the maximum, mean, and low flows of Turkish rivers. *J. Hydrometeorol.*, 6(3), 280–290. <https://doi.org/10.1175/jhm412.1>
- Cislaghi, A., Masseroni, D., Massari, C., Camici, S., Brocca, L., 2020. Combining a rainfall-runoff model and a regionalization approach for flood and water resource assessment in the western Po Valley, Italy. *Hydrol. Sci. J.*, 65(3), 348–370. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1690656>
- Coch, A., Mediero, L., 2016. Trends in low flows in Spain in the period 1949–2009. *Journal Des Sciences Hydrologiques [Hydrological Sciences Journal]*, 61(3), 568–584. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1081202>
- Copetti, D., Salerno, F., Valsecchi, L., Viviano, G., Buzzi, F., Agostinelli, C., ... Tartari, G., 2017. Restoring lakes through external phosphorus load reduction: the case of Lake Pusiano (Southern Alps). *Inland Waters: Journal of the International Society of Limnology*, 7(1), 100–108. <https://doi.org/10.1080/20442041.2017.1294354>
- Coppola, E., Verdecchia, M., Giorgi, F., Colaiuda, V., Tomassetti, B., Lombardi, A., 2014. Changing hydrological conditions in the Po basin under global warming. *Sci. Total Environ.*, 493, 1183–1196. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.003>
- Corral, C., Berenguer, M., Sempere-Torres, D., Poletti, L., Silvestro, F., Reborá, N., 2019. Comparison of two early warning systems for regional flash flood hazard forecasting. *J. Hydrol.*, 572, 603–619. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.026>
- D'Oria, M., Ferraresi, M., Tanda, M. G., 2019. Quantifying the impacts of climate change on water resources in northern Tuscany, Italy, using high-resolution regional projections. *Hydrol. Process.*, 33(6), 978–993. <https://doi.org/10.1002/hyp.13378>
- David, O., Ascough, J. C., II, Lloyd, W., Green, T. R., Rojas, K. W., Leavesley, G. H., Ahuja, L. R., 2013. A software engineering perspective on environmental modeling framework design: The Object Modeling System. *Environ. Model. Softw.*, 39, 201–213. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.03.006>
- De Girolamo, A. M., Barca, E., Leone, M., Lo Porto, A., 2022. Impact of long-term climate change on flow regime in a Mediterranean basin. *J. Hydrol. Reg. Stud.*, 41(101061), 101061. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101061>
- Deidda, C., De Michele, C., Arslan, A., Pecora, S., Taburet, N., 2021. Accuracy of Copernicus altimeter water level data in Italian rivers accounting for narrow river sections. *Remote Sens.*, 13(21), 4456. <https://doi.org/10.3390/rs13214456>
- Dresti, C., Fenocchi, A., Copetti, D., 2021. Modelling physical and ecological processes in medium-to-large deep European perialpine lakes: a review. *J. Limnol.*, 80(3). <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2021.2041>
- Ehalt Macedo, H., Lehner, B., Nicell, J., Grill, G., Li, J., Limtong, A., Shakya, R., 2022. Distribution and characteristics of wastewater treatment plants within the global river network. *Earth Syst. Sci. Data*, 14(2), 559–577. <https://doi.org/10.5194/essd-14-559-2022>
- Evans, R., Nortcliff, S., 1978. Soil erosion in north Norfolk. *The Journal of Agricultural Science*, 90(1), 185–192. <https://doi.org/10.1017/s0021859600048735>
- Fenocchi, A., Buzzi, F., Dresti, C., Copetti, D., 2023. Estimation of long-term series of total nutrient loads flowing into a large perialpine lake (Lake Como, Northern Italy) from incomplete discrete data by governmental monitoring. *Ecol. Indic.*, 154(110534), 110534. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110534>
- Filippucci, P., Brocca, L., Bonafoni, S., Saltalippi, C., Wagner, W., Tarpanelli, A., 2022. Sentinel-2 high-resolution data for river discharge monitoring. *Remote Sens. Environ.*, 281(113255), 113255. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113255>
- Formetta, G., Antonello, A., Franceschi, S., David, O., Rigon, R., 2014. Hydrological modelling with components: A GIS-based open-source framework. *Environ. Model. Softw.*, 55, 190–200. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.01.019>
- Forzieri, G., Feyen, L., Rojas, R., Flörke, M., Wimmer, F., Bianchi, A., 2014. Ensemble projections of future streamflow droughts in Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18(1), 85–108. <https://doi.org/10.5194/hess-18-85-2014>
- Giuntoli, I., Renard, B., Vidal, J.-P., Bard, A., 2013. Low flows in France and their relationship to large-scale climate indices. *J. Hydrol.*, 482, 105–118. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.038>
- Gudmundsson, L., Seneviratne, S. I., 2016. Anthropogenic climate change affects meteorological drought risk in Europe. *Environ. Res. Lett.*, 11(4), 044005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/044005>
- Guo, Z., Wu, L., Huang, Y., Guo, Z., Zhao, J., Li, N., 2022. Water-body segmentation for SAR images: Past, current, and future. *Remote Sens.*, 14(7), 1752. <https://doi.org/10.3390/rs14071752>
- Hannaford, J., Buys, G., Stahl, K., Tallaksen, L. M., 2013. The influence of decadal-scale variability on trends in long European streamflow records. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17(7), 2717–2733. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2717-2013>
- Hipsey, M. R., Boon, C., Paraska, D., Bruce, L. C., Huang, P., 2019. *AquaticEcoDynamics/libaed2: v1.3.0-rc2*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.2538495>
- Hou, J., Van Dijk, A. I. J. M., Renzullo, L. J., Larraondo, P. R., 2024. GloLakes: water storage dynamics for 27000 lakes globally from 1984 to present derived from satellite altimetry and optical imaging. *Earth Syst. Sci. Data*, 16(1), 201–218. <https://doi.org/10.5194/essd-16-201-2024>
- IPCC, 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland. <https://doi.org/https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Keller, V. D. J., Williams, R. J., Lofthouse, C., Johnson, A. C., 2014. Worldwide estimation of river concentrations of any chemical originating from sewage-treatment plants using dilution factors. *Environ. Toxicol. Chem.*, 33(2), 447–452. <https://doi.org/10.1002/etc.2441>
- Laiolo, P., Gabellani, S., Campo, L., Silvestro, F., Delogu, F., Rudari, R., ... Puca, S., 2016. Impact of different satellite soil moisture products on the predictions of a continuous distributed hydrological model. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 48, 131–145. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.06.002>
- Lepage, H., Launay, M., Le Coz, J., Angot, H., Miede, C., Gairoard, S., Radakovitch, O., Coquery, M., 2020. Impact of dam flushing operations on sediment dynamics and quality in the upper Rhône River, France. *J. Environ. Manage.*, 255(109886), 109886. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109886>
- Longobardi, A., Mautone, M., de Luca, C., 2014. Reservoirs performances under climate variability: a case study. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 364, 526–531. <https://doi.org/10.5194/piahs-364-526-2014>
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Beguería, S., García-Ruiz, J. M., Cuadrat, J. M., 2010. The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). *J. Hydrol.*, 386(1–4), 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.001>
- Maiolo, M., Mendicino, G., Pantusa, D., Senatore, A., 2017. Optimization of drinking water distribution systems in relation to the effects of climate change. *Water*, 9(10), 803. <https://doi.org/10.3390/w9100803>



- Massari, C., Avanzi, F., Bruno, G., Gabellani, S., Penna, D., Camici, S., 2022. Evaporation enhancement drives the European water-budget deficit during multi-year droughts. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 26(6), 1527–1543. <https://doi.org/10.5194/hess-26-1527-2022>
- Masseroni, D., Camici, S., Cislighi, A., Vacchiano, G., Massari, C., Brocca, L., 2021. The 63-year changes in annual streamflow volumes across Europe with a focus on the Mediterranean basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25(10), 5589–5601. <https://doi.org/10.5194/hess-25-5589-2021>
- Marziali, L., Tartari, G., Salerno, F., Valsecchi, L., Bravi, C., Lorenzi, E., ... Guzzella, L., 2017. Climate change impacts on sediment quality of subalpine reservoirs: Implications on management. *Water*, 9(9), 680. <https://doi.org/10.3390/w9090680>
- Matta, E., Giardino, C., Boggero, A., Bresciani, M., 2017. Use of satellite and in situ reflectance data for lake water color characterization in the Everest Himalayan region. *Mt. Res. Dev.*, 37(1), 16–23. <https://doi.org/10.1659/mrd-journal-d-15-00052.1>
- Mendicino, G., Versace, P., 2007. Integrated drought watch system: A case study in southern Italy. *Water Resour. Manag.*, 21(8), 1409–1428. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9091-6>
- Moatar, F., Abbott, B. W., Minaudo, C., Curie, F., Pinay, G., 2017. Elemental properties, hydrology, and biology interact to shape concentration-discharge curves for carbon, nutrients, sediment, and major ions. *Water Resour. Res.*, 53(2), 1270–1287. <https://doi.org/10.1002/2016wr019635>
- Montanari, A., Nguyen, H., Rubinetti, S., Ceola, S., Galelli, S., Rubino, A., Zanchettin, D., 2023. Why the 2022 Po River drought is the worst in the past two centuries. *Sci. Adv.*, 9(32), eadg8304. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adg8304>
- Morlot, M., Rigon, R., Formetta, G., 2024. Hydrological digital twin model of a large anthropized Italian alpine catchment: The Adige river basin. *J. Hydrol.*, 629(130587), 130587. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130587>
- Musolff, A., Schmidt, C., Selle, B., Fleckenstein, J. H., 2015. Catchment controls on solute export. *Adv. Water Resour.*, 86, 133–146. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.09.026>
- Nielsen, A., Bolding, K., Hu, F., Trolle, D., 2017. An open source QGIS-based workflow for model application and experimentation with aquatic ecosystems. *Environ. Model. Softw.*, 95, 358–364. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.032>
- Orr, A., Ahmad, B., Alam, U., Appadurai, A., Bharucha, Z. P., Biemans, H., ... Wescoat, J. L., Jr., 2022. Knowledge priorities on climate change and water in the upper Indus basin: A horizon scanning exercise to identify the top 100 research questions in social and natural sciences. *Earth's Futur.*, 10(4). <https://doi.org/10.1029/2021ef002619>
- Özelkan, E., 2020. Water body detection analysis using NDWI indices derived from Landsat-8 OLI. *Pol. J. Environ. Stud.*, 29(2), 1759–1769. <https://doi.org/10.15244/pjoes/110447>
- Pedro-Monzonis, M., del Longo, M., Solera, A., Pecora, S., Andreu, J., 2016. Water accounting in the Po river basin applied to climate change scenarios. *Procedia Eng.*, 162, 246–253. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.051>
- Preziosi, E., Del Bon, A., Romano, E., Petrangeli, A. B., Casadei, S., 2013. Vulnerability to drought of a complex water supply system. The upper Tiber basin case study (central Italy). *Water Resour. Manag.*, 27(13), 4655–4678. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0434-9>
- Ravazzani, G., Ghilardi, M., Mendlik, T., Gobiet, A., Corbari, C., Mancini, M., 2014. Investigation of climate change impact on water resources for an Alpine basin in northern Italy: implications for evapotranspiration modeling complexity. *PloS One*, 9(10), e109053. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0109053>
- Regione Lombardia., 2008. Definizione dell'impatto degli svassi dei bacini artificiali sull'ittiofauna e valutazione di misure di protezione. Quaderni della Ricerca 90/2008.
- Ricci, F., G., Zahi, F., D'Ambrosio, E., De Girolamo, A. M., Parete, G., Debieche, T. H., Gentile, F., 2022. Evaluating flow regime alterations due to point sources in intermittent rivers: A modelling approach. *J. Agric. Eng.*, (1974-7071), 53(2). <https://www.agroengineering.org/index.php/jae/article/view/1333>
- Rigon, R., Formetta, G., Bancheri, M., Tubbini, N., D'Amato, C., David, O., Massari, C., 2022. HESS Opinions: Participatory Digital eARth Twin Hydrology systems (DARTHS) for everyone – a blueprint for hydrologists. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 26(18), 4773–4800. <https://doi.org/10.5194/hess-26-4773-2022>
- Salerno, F., Gambelli, S., Viviano, G., Thakuri, S., Guyennon, N., D'Agata, C., Diolaiuti, G., Smiraglia, C., Stefani, F., Bocchiola, D., Tartari, G., 2014. High alpine ponds shift upwards as average temperatures increase: A case study of the Ortles–Cevedale mountain group (Southern Alps, Italy) over the last 50 years. *Water*, 6(12), 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.06.003>
- Sekertekin, A., 2021. A survey on global thresholding methods for mapping open water body using sentinel-2 satellite imagery and normalized difference water index. *Arch. Comput. Methods Eng.*, 28(3), 1335–1347. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09416-2>
- Senatore, A., Fuoco, D., Maiolo, M., Mendicino, G., Smiatek, G., Kunstmann, H., 2022. Evaluating the uncertainty of climate model structure and bias correction on the hydrological impact of projected climate change in a Mediterranean catchment. *J. Hydrol. Reg. Stud.*, 42(101120), 101120. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101120>
- Silvestro, F., Gabellani, S., Delogu, F., Rudari, R., Boni, G., 2013. Exploiting remote sensing land surface temperature in distributed hydrological modelling: the example of the Continuum model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17(1), 39–62. <https://doi.org/10.5194/hess-17-39-2013>
- Silvestro, F., Gabellani, S., Rudari, R., Delogu, F., Laiolo, P., Boni, G., 2015. Uncertainty reduction and parameter estimation of a distributed hydrological model with ground and remote-sensing data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19(4), 1727–1751. <https://doi.org/10.5194/hess-19-1727-2015>
- Skoulikidis, N. T., Sabater, S., Datry, T., Morais, M. M., Buffagni, A., Dörfinger, G., ... Tockner, K., 2017. Non-perennial Mediterranean rivers in Europe: Status, pressures, and challenges for research and management. *Sci. Total Environ.*, 577, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.147>
- Spano, D., Mereu, V., Bacciu, V., Marras, S., Trabucco, A., Adinolfi, M., Barbato, G., Bosello, F., Breil, M., Chiriaco, M.V., Coppini, G., Essenerfeld, A., Galluccio, G., Lovato, T., Marzi, S., Masina, S., Mercogliano, P., Mysiak, J., Noce, S., Pal, J., Reder, A., Rianna, G., Rizzo, A., Santini, M., Sini, E., Staccione, A., Villani, V., Zavarelli, M., 2020. Analisi del Rischio. I cambiamenti climatici in Italia. [https://doi.org/10.25424/CMCC/ANALISI\\_DEL\\_RISCHIO](https://doi.org/10.25424/CMCC/ANALISI_DEL_RISCHIO)
- Stahl, K., Kohn, I., Blauhut, V., Urquijo, J., De Stefano, L., Acácio, V., ... Van Lanen, H. A. J., 2016. Impacts of European drought events: insights from an international database of text-based reports. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 16(3), 801–819. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-801-2016>
- Tarpanelli, A., Brocca, L., Barbetta, S., Faruolo, M., Lacava, T., Moramarco, T., 2015. Coupling MODIS and radar altimetry data for discharge estimation in poorly gauged river basins. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 8(1), 141–148. <https://doi.org/10.1109/istars.2014.2320582>
- Tarpanelli, A., Brocca, L., Benveniste, J., 2021. Potentials and limitations of Sentinel-3 for river discharge assessment. *Advances in Space Research: Adv Space Res.*, 68(2), 593–606. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.08.005>
- Teuling, A. J., 2018. A hot future for European droughts. *Nat. Clim. Change.*, 8(5), 364–365. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0154-5>
- Tramblay, Y., Rutkowska, A., Sauquet, E., Sefton, C., Laaha, G., Osuch, M., Albuquerque, T., Alves, M.H., Banasik, K., Beaufort, B., Brocca, L., Camici, S., Csabai, Z., Dakhlaoui, H., DeGirolamo, A.M., Dörfinger, G., Gallart, F., Gauster, T., Hanich, L., Kohnová, S., Mediero, L., Plamen, N., Parry, S., Quintana-Seguí, P., Tzoraki, O., Datry, T., 2021. Trends in flow intermittence for European rivers. *Hydrol. Sci. J.*, 66(1), 37–49. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1849708>
- van Vliet, M. T. H., Thorslund, J., Stokal, M., Hofstra, N., Flörke, M., Ehalt Macedo, H., Nkwasa, A., Tang, T., Kaushal, S.S., Kumar, R., van Griensven, A., Bouwman, L., Mosley, L. M., 2023. Global river water quality under climate change and hydroclimatic extremes. *Nat. Rev. Earth Environ.*, 4(10), 687–702. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00472-3>



Vezzoli, R., Mercogliano, P., Pecora, S., Zollo, A. L., Cacciamani, C., 2015. Hydrological simulation of Po River (North Italy) discharge under climate change scenarios using the RCM COSMO-CLM. *Sci. Total Environ.*, 521–522, 346–358. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.096>

Vicente-Serrano, S. M., Zabalza-Martínez, J., Borràs, G., López-Moreno, J. I., Pla, E., Pascual, D., Savé, R., Biel, C., Funes, I., Azorin-Molina, C., Sanchez-Lorenzo, A., Martín-Hernández, N., Peña-Gallardo, M., Alonso-González, E., Tomas-Burguera, M., El Kenawy, A., 2017a. Extreme hydrological events and the influence of reservoirs in a highly regulated river basin of northeastern Spain. *J. Hydrol. Reg. Stud.*, 12, 13–32. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.01.004>

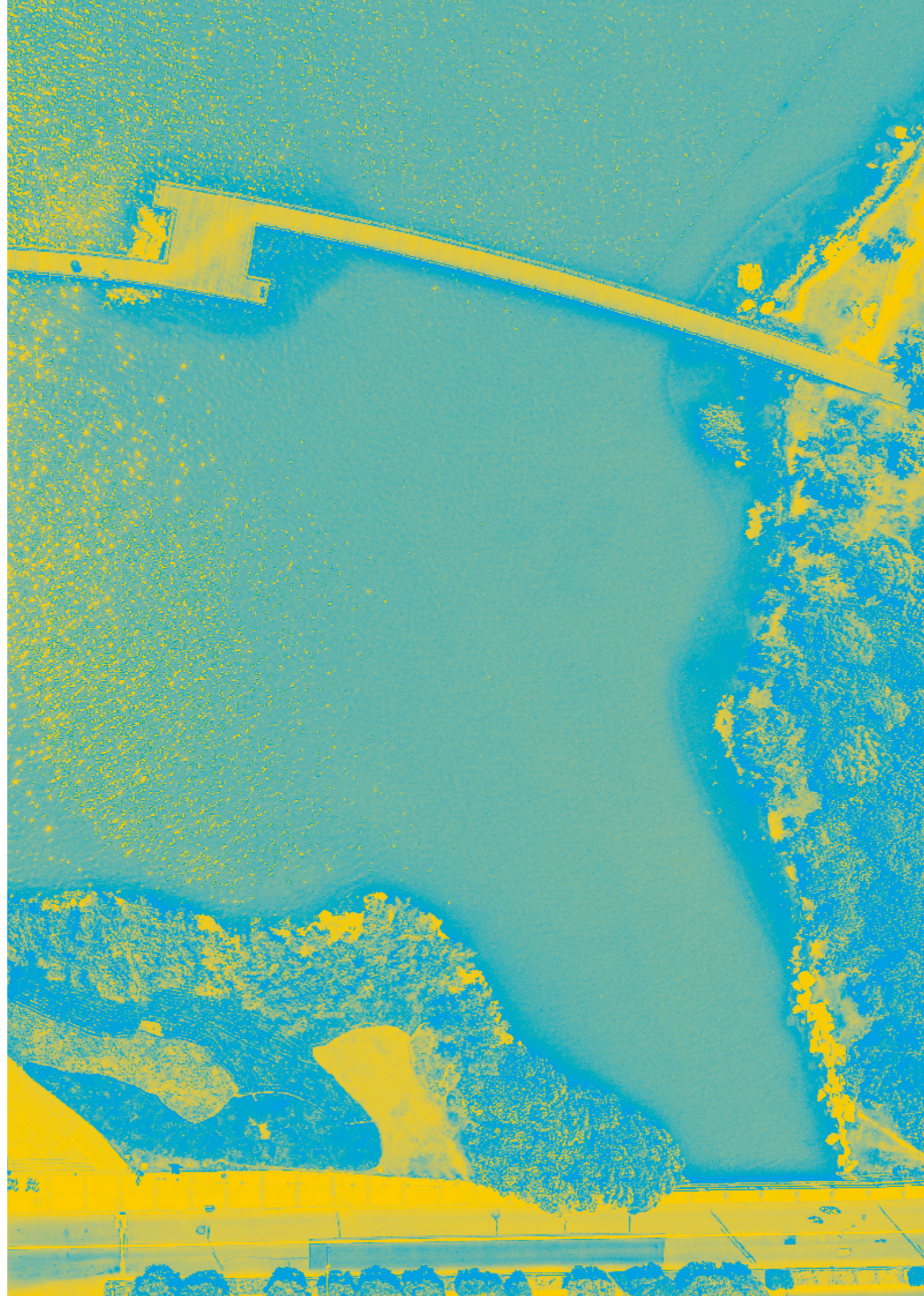
Vicente-Serrano, S. M., Zabalza-Martínez, J., Borràs, G., López-Moreno, J. I., Pla, E., Pascual, D., Savé, R., Biel, C., Funes, I., Martín-Hernández, N., Peña-Gallardo, M., Beguería, S., Tomas-Burguera, M., Tomas-Burguera, M., 2017b. Effect of reservoirs on streamflow and river regimes in a heavily regulated river basin of Northeast Spain. *Catena*, 149, 727–741. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.03.042>

Vicente-Serrano, Sergio M., Dominguez-Castro, F., McVicar, T. R., Tomas-Burguera, M., Peña-Gallardo, M., Noguera, I., López-Moreno, J. I., Peña, D., El Kenawy, A., 2020. Global characterization of hydrological and meteorological droughts under future climate change: The importance of timescales, vegetation-CO2 feedbacks and changes to distribution functions. *Int. J. Climatol.*, 40(5), 2557–2567. <https://doi.org/10.1002/joc.6350>

Wang, S., Ancell, B., Yang, Z.-L., Duan, Q., Anagnostou, E. N., 2022. Hydroclimatic extremes and impacts in a changing environment: Observations, mechanisms, and projections. *J. Hydrol.*, 608(127615), 127615. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127615>

## How to cite

Brocca, L., Adamo, M., Boggero, A., Ciampittiello, M., Copetti, D., de Girolamo, A.M., Dresti, C., Garnier, M., Marziali, L., Massari, C., Polesello, S., Rana, F.M. 2024. “Acque superficiali e invasi”, in *Siccità, scarsità e crisi idriche*, Emanuele Romano, Ivan Portoghese (a cura di), Habitat signa 1, 237-264. Roma: Cnr Edizioni. <https://doi.org/10.69115/habitatsigna-2024-1/07>





**Emanuele Romano** è ricercatore presso l'Istituto di ricerca sulle acque del CNR. Laureato in Fisica presso l'Università degli studi di Milano, ha conseguito il Dottorato di ricerca in Scienze della terra, svolgendo parte dell'attività presso l'École des Mines di Parigi. Autore di più di cinquanta pubblicazioni scientifiche, negli ultimi anni ha focalizzato le proprie ricerche sulla valutazione degli impatti dei cambiamenti climatici sulle risorse idriche e sui sistemi di approvvigionamento, con particolare riferimento agli eventi siccitosi. Membro della Commissione grandi rischi del Dipartimento della protezione civile, settore "Rischio da incendi boschivi e da deficit idrico" dal 2023, collabora con numerosi enti pubblici (Ministero dell'ambiente, ISPRA, Istat, Autorità di distretto) e gestori del servizio idrico integrato.

**Ivan Portoghese** è ricercatore presso l'Istituto di ricerca sulle acque del CNR. Laureato in Ingegneria civile presso il Politecnico di Bari, ha conseguito un Dottorato di ricerca in Idrologia sviluppando modelli matematici per la caratterizzazione dei bacini idrografici soggetti a forte variabilità climatica stagionale e inter-annuale. Negli ultimi anni si è occupato dello sviluppo e validazione di metodi e strumenti per la pianificazione e la gestione delle risorse idriche pubblicando numerosi articoli scientifici su varie riviste internazionali. È inoltre coinvolto nello sviluppo di studi e di politiche per la gestione sostenibile delle risorse idriche a supporto di istituzioni ed enti operanti nel settore.

**S**empre più spesso i mezzi di comunicazione riportano eventi di siccità sul territorio italiano con impatti drammatici sulla popolazione e sugli ecosistemi.

L'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Forum scientifico intergovernativo sul cambiamento climatico istituito presso le Nazioni Unite, da tempo segnala l'intensificarsi di tali fenomeni nell'area mediterranea a seguito del cambiamento climatico.

Che fare? E quale può essere il ruolo della comunità scientifica a supporto di una *governance* dell'acqua? Il presente volume, redatto dal Gruppo di lavoro "Siccità, scarsità e crisi idriche" del Dipartimento di scienze del sistema terra e tecnologie per l'ambiente del CNR, con il supporto di altre Istituzioni (Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale, Dipartimento della protezione civile, Struttura commissariale per l'adozione di interventi urgenti connessi al fenomeno della scarsità idrica), ha visto il coinvolgimento di quasi cento ricercatrici e ricercatori che hanno tentato di dare risposta a tali quesiti fornendo elementi tecnico-scientifici a supporto di tutti i soggetti che, con diversi ruoli, contribuiscono alla *governance* dell'acqua.

