

La risorsa idrica nel Mediterraneo e in Sicilia: Trend storici e proiezioni future

di Antonio Francipane e Leonardo Valerio Noto

SOMMARIO: 1. Dal riscaldamento globale agli impatti locali: il caso del bacino del Mediterraneo. – 2. Effetti dei cambiamenti climatici sul ciclo idrologico del bacino del Mediterraneo. – 3. Il futuro della risorsa idrica nel bacino del Mediterraneo. – 4. Gli impatti dei cambiamenti climatici sulla risorsa idrica in Sicilia. – 5. Considerazioni finali e spunti per il futuro.

1. *Dal riscaldamento globale agli impatti locali: il caso del bacino del Mediterraneo*

Negli ultimi anni si sta assistendo a un cambiamento sostanziale del clima e, di conseguenza, di tutte le componenti principali che costituiscono il ciclo idrologico: dalle precipitazioni all'evaporazione, dalla formazione del deflusso alla disponibilità d'acqua nel sottosuolo e in superficie. Tutto ciò ha modificato in maniera profonda, oltre alla frequenza e alla severità di eventi estremi come siccità e alluvioni in molte aree del mondo¹, anche la distribuzione spaziale e temporale della risorsa idrica, con importanti ricadute in settori come l'agricoltura, l'economia, la produzione di energia e perfino la salute umana. In alcuni casi, ciò ha anche aumentato il rischio di conflitti in diverse regioni del pianeta, a causa della competizione tra settori diversi, come quelli civile, agricolo e industriale, per accaparrarsi quanta più risorsa disponibile possibile², influenzando anche i flussi migratori tra diversi Paesi.

Oggi, alla luce dei cambiamenti già osservati e di quelli in atto, appare fondamentale comprendere quale potrà essere il futuro del clima in alcune aree del globo, in particolare nel bacino del Mediterraneo, per cercare di valutarne gli effetti potenziali sulle risorse idriche e, conseguentemente, sui settori che da esse dipendono strettamente³.

¹ A. KAHADUWA, L. RAJAPAKSE, *Review of climate change impacts on reservoir hydrology and long-term basin-wide water resources management*, in *Building Research and Information*, 2021, 515-526.

² M. FLÖRKE, C. SCHNEIDER, R. McDONALD, *Water competition between cities and agriculture driven by climate change and urban growth*, in *Nature Sustainability*, 2018, 51-58.

³ Y. TRAMBLAY, A. KOUTROULIS, L. SAMANIEGO, S.M. VICENTE-SERRANO, F. VOLAIRE, A. BOONE, M. LE PAGE, M.C. LLASAT, C. ALBERGEL, S. BURAK, M. CAILLERET, K.C. KALIN, H. DAVI, J.L. DUPUY, P. GREVE, M. GRILLAKIS, L. HANICH, L. JARLAN, N. MARTIN-STPAUL,

Gli aumenti di temperatura riscontrati nelle regioni del Mediterraneo, dove la disponibilità idrica dipende anche dalle fluttuazioni nei tassi di evapotraspirazione⁴, possono portare a una riduzione dei deflussi superficiali, della ricarica delle falde e dell'acqua accumulata negli invasi naturali e artificiali, contribuendo così a un aumento della frequenza, durata e severità degli eventi siccitosi⁵. Questo fenomeno risulta particolarmente accentuato quando all'aumento delle temperature e dei tassi evapotraspirativi si associa anche una diminuzione delle precipitazioni su scala mensile e annuale⁶.

In generale, qualsiasi alterazione dell'equilibrio dei flussi radiativi della Terra può avere effetto sulla temperatura e precipitazione⁷, poiché l'aumento delle temperature comporta una maggiore capacità dell'atmosfera di trattenere vapore acqueo e, di conseguenza, una maggiore quantità d'acqua potenzialmente disponibile per le precipitazioni. Tuttavia, poiché i cambiamenti climatici interessano anche i regimi dei venti e le correnti oceaniche, che costituiscono i principali motori del sistema climatico a scala globale⁸, ciò non implica necessariamente un aumento complessivo delle precipitazioni. Alcune aree, infatti, potrebbero sperimentare variazioni nella frequenza e nell'intensità delle precipitazioni, che non si traducono necessariamente in cambiamenti significativi delle precipitazioni totali stagionali o annuali. Infatti, a un aumento nella frequenza e nell'intensità di precipitazioni sempre più concentrate nel

J. MARTINEZ-VILALTA, F. MOUILLOT, D. PULIDO-VELAZQUEZ, P. QUINTANA-SEGUI, D. RENARD, M. TURCO, M. TURKES, R. TRIGO, J.P. VIDAL, A. VILAGROSA, M. ZRIBI, J. POLCHER, *Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios*, in *Earth-Science Reviews*, 2020, vol. 210, n. 103348, 1-24.

⁴ S.S. GHARBIA, T. SMULLEN, L. GILL, P. JOHNSTON, F. PILLA, *Spatially distributed potential evapotranspiration modeling and climate projections*, in *Sci Total Environ*, 2018, n. 633, 571–592.

⁵ L. SAMANIEGO, S. THOBER, R. KUMAR, N. WANDERS, O. RAKOVEC, M. PAN, M. ZINK, J. SHEFFIELD, E.F. WOOD, A. MARX, *Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts*, in *Nat Clim Change*, 2018, 421–426.

⁶ T. CALOIERO, S. VELTRI, P. CALOIERO, F. FRUSTACI, *Drought Analysis in Europe and in the Mediterranean Basin using the standardized precipitation index*, in *Water*, 2018, vol. 10, n. 1043, 1-13.

⁷ K.P. SHINE, R.G. DERWENT, D.J. WUEBBLES, J.J. MORCRETTE, *Radiative Forcing of Climate*, in *Climate change: the IPCC scientific assessment*, 1990, 47-68.

⁸ A.M.C. HOGG, W.K. DEWAR, P. BERLOFF, S. KRAVTSOV, D.K. HUTCHINSON, *The Effects of Mesoscale Ocean–Atmosphere Coupling on the Large-Scale Ocean circulation*, in *J Clim*, 1990, 4066–4082.

tempo, potrebbe contrapporsi un aumento della durata dei periodi siccitosi che compensano l'incremento delle piogge intense.

Nel bacino del Mediterraneo, ad esempio, numerosi studi condotti nell'ultimo decennio hanno evidenziato una generale diminuzione delle precipitazioni medie annue, con eventi di precipitazione estrema che, viceversa, tendono a diventare sempre più frequenti e intensi, soprattutto alle scale temporali più brevi.

Oltre a determinare alterazioni fondamentali nelle forzanti climatiche, come temperatura e precipitazioni, i cambiamenti climatici influenzano profondamente anche la risposta idrologica dei sistemi a diverse scale spaziali (urbana, di bacino, continentale), con rilevanti implicazioni sull'approvvigionamento idrico, a causa delle variazioni nelle precipitazioni e delle perdite d'acqua per evapotraspirazione, oltre che modificare le dinamiche di infiltrazione dell'acqua nel suolo e, di conseguenza, la ripartizione dell'acqua tra le falde e il deflusso superficiale, influenzando sia la quantità che la qualità dell'acqua in fiumi, laghi e acquiferi⁹.

Le acque superficiali, ossia il deflusso e le portate fluviali, rappresentano probabilmente la componente del ciclo idrologico più indicativa per descrivere la disponibilità di acqua dolce. Sebbene a livello globale non emergano tendenze chiare in merito ai cambiamenti del deflusso e della portata fluviale, a livello regionale sono state osservate tendenze significative, diverse per entità e direzione. La variabilità di tali tendenze nelle diverse aree è legata sia a fattori climatici, in particolare cambiamenti nelle precipitazioni e nell'evaporazione, sia a forzanti antropiche, come derivazioni idriche e regolazione tramite dighe e bacini artificiali. Con particolare riferimento al bacino del Mediterraneo, secondo il rapporto di valutazione (*Assessment Report*) n° 6 (AR6) del Gruppo Intergovernativo sul Cambiamento Climatico (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*)¹⁰, l'aumento delle precipitazioni estreme ha determinato a livello globale un incremento associato nella frequenza e nell'intensità delle piene fluviali, con numerosi impatti sui sistemi naturali e antropici. Di contro, un'analisi di un ampio dataset condotta per il periodo 1960–2010

⁹ D. PUMO, D. CARACCILO, F. VIOLA, L.V. NOTO, *Climate change effects on the hydrological regime of small non-perennial river basins*, in *Sci Total Environ*, 2016, 76–92.

¹⁰ S.I. SENEVIRATNE, X. ZHANG, M. ADNAN, W. BADI, C. DEREZYNski, A. DI LUCA, S.M. VICENTE-SERRANO, M. WEHNER, B. ZHOU, *Weather and climate extreme events in a changing climate*, in *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2021, 1513-1766.

in Europa¹¹ ha rilevato una tendenza alla diminuzione della portata media annua delle piene per decennio, compresa tra il -5% e il -12%, con un decremento massimo di circa il -24% nelle aree europee del bacino del Mediterraneo.

Per quanto riguarda le acque sotterranee, queste rappresentano spesso, nel bacino del Mediterraneo, una risorsa idrica importante per l'agricoltura, così come per gli usi industriali e civili, soprattutto durante i periodi di siccità. Tuttavia, poiché l'infiltrazione dai corsi d'acqua costituisce il principale processo di ricarica delle falde negli ambienti aridi e semi-aridi¹², una diminuzione dei livelli delle acque sotterranee può essere spesso collegata a una riduzione del deflusso superficiale¹³, in particolare nelle aree più aride, dove la ricarica degli acquiferi avviene prevalentemente in modo episodico, a seguito di eventi di precipitazione intensa e alluvioni¹⁴.

2. *Effetti dei cambiamenti climatici sul ciclo idrologico del bacino del Mediterraneo*

Con riferimento al bacino del Mediterraneo, negli ultimi anni, molti studi si sono concentrati sull'analisi delle proiezioni future delle precipitazioni sotto diversi scenari climatici e degli effetti potenziali di tali scenari sul ciclo idrologico e sulla disponibilità della risorsa idrica in tale area. Molti di questi studi si basano sull'analisi dei quattro Scenari di Concentrazione Rappresentativi (*Representative Concentration Pathways* – RCPs) sviluppati dall'AR5 dell'IPCC¹⁵: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, and RCP 8.5, i quali descrivono diversi percorsi di concentrazione di gas serra nell'at-

¹¹ G. BLÖSCHL, J. HALL, A. VIGLIONE, R.A. PERDIGÃO, J. PARAJKA, B. MERZ, D. LUN, B. ARHEIMER, G.T. ARONICA, A. BILIBASHI, *Changing climate both increases and decreases european river floods*, in *Nature*, 2019, 108–111.

¹² C. LEDUC, A. PULIDO-BOSCH, B. REMINI, *Anthropization of groundwater resources in the Mediterranean region: processes and challenges*, in *Hydrogeol J*, 2017, 1529–1547.

¹³ A.P. SCHREINER-MCGRAW, H. AJAMI, *Delayed response of groundwater to multi-year meteorological droughts in the absence of anthropogenic management*, in *J Hydrol*, 2021, vol. 603, n. 126917, 1–10.

¹⁴ S. OPIE, R.G. TAYLOR, C.M. BRIERLEY, M. SHAMSUDDUHA, M.O. CUTHBERT, *Climate-groundwater dynamics inferred from GRACE and the role of hydraulic memory*, in *Earth Syst Dynam*, 2020, 775–791.

¹⁵ IPCC, *Climate Change 2014: Synthesis Report*. in *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2014, 1–151.

mosfera e sono usati come input per i modelli climatici al fine di studiare le possibili traiettorie dei cambiamenti climatici e dei loro effetti. Invece, sono ancora pochi gli studi che utilizzano i più recenti cinque Percorsi Socioeconomici Condivisi (*Shared Socio-economic Pathways* – SSPs) e i sette livelli di forzante radiativa (1.9, 2.6, 3.4, 4.5, 6.0, 7.0, 8.5 W/m²), introdotti con l'AR6 dell'IPCC¹⁶.

Concentrandosi sulla gestione della risorsa idrica futura, è importante studiare come potrebbero variare la precipitazione media annua (*Mean Annual Precipitation* – MAP) e le precipitazioni stagionali sotto diversi scenari. In tal senso, molti studi, usando dei modelli climatici regionali (*Regional Climate Models* – RCMs) prevedono una riduzione della MAP fino a valori di circa il -60%, in alcune aree del Mediterraneo, sotto il più pessimistico RCP 8.5. Tali riduzioni potrebbero essere accentuate soprattutto nelle aree più calde e aride delle regioni meridionali del Mediterraneo. Mentre molti studi concordano su una diminuzione, in generale, delle precipitazioni stagionali, soprattutto nel periodo primavera-estate, altri mostrano risultati contrastanti per i mesi invernali, in base anche alle aree del Mediterraneo considerate.

Poiché anche i cambiamenti negli estremi di precipitazione possono avere importanti conseguenze per la società, molti studi si sono soffermati sull'analisi degli impatti dei possibili scenari futuri di cambiamento climatico sulla distribuzione delle precipitazioni estreme. Alcuni di questi hanno mostrato un aumento generale degli estremi di precipitazione previsti per il futuro, in particolare entro la fine del XXI secolo sotto lo scenario RCP 8.5. Quasi tutte le regioni del Mediterraneo saranno probabilmente soggette a precipitazioni più intense, con un incremento fino al 30% in inverno e una diminuzione fino al -20% in estate degli estremi giornalieri di precipitazione¹⁷.

La domanda evaporativa atmosferica nel bacino del Mediterraneo, spesso analizzata in termini di evapotraspirazione potenziale (*Potential EvapoTranspiration* – PET), in futuro, probabilmente aumenterà a causa

¹⁶ H. DOUVILLE, K. RAGHAVAN, J. RENWICK, R.P. ALLAN, P.A. ARIAS, M. BARLOW, R. CEREZO-MOTA, A. CHERCHI, T.Y. GAN, J. GERGIS, D. JIANG, A. KHAN, W. POKAM MBA, D. ROSENFELD, J. TIERNEY, and O. ZOLINA, *Water Cycle Changes*, in *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, 2021, 1055–1210.

¹⁷ E. SCOCCIMARRO, S. GUALDI, A. BELLUCCI, M. ZAMPIERI, A. NAVARRA, *Heavy precipitation events over the Euro-Mediterranean region in a warmer climate: results from CMIP5 models*, in *Reg Environ Chang*, 2016, 595–602.

delle condizioni costantemente più calde. Ad esempio, entro la fine del secolo, secondo lo scenario RCP8.5, si prevede un aumento dei valori medi annuali di PET fino al 21% in Francia¹⁸ e fino al 17% nella Tunisia settentrionale¹⁹, con conseguente riduzione del deflusso annuale nel medio (2040–2070) e lungo (2070–2100) termine.

Molti studi confermano che il deflusso fluviale medio annuo e, più in generale, la disponibilità idrica nella regione mediterranea sono destinati a diminuire complessivamente in futuro. In particolare, si prevede un aumento dell'occorrenza di eventi climatici estremi, come le siccità, soprattutto nelle regioni semi-aride del bacino²⁰.

Anche i processi di ricarica delle acque sotterranee saranno probabilmente fortemente influenzati dal cambiamento climatico. Secondo l'AR6 dell'IPCC, la ricarica delle falde nelle regioni del Mediterraneo, in particolare nelle aree meridionali, è destinata a diminuire a causa della riduzione delle precipitazioni, della crescente domanda evaporativa e del sovrasfruttamento delle falde sotterranee legato a una prevista espansione dell'uso dell'irrigazione in agricoltura²¹.

3. *Il futuro della risorsa idrica nel bacino del Mediterraneo*

Le risorse idriche sono fondamentali per l'economia agricola di molti Paesi del Mediterraneo, dove l'agricoltura pluviale rappresenta oltre il 90% delle colture in Algeria, Marocco e Tunisia²², il 57% in Turchia, il 64% in

¹⁸ T. LEMAITRE-BASSET, L. OUDIN, G. THIREL, *Evapotranspiration in hydrological models under rising CO₂: a jump into the unknown*, in *Clim Change*, 2022, vol. 172, n. 36, 1-19.

¹⁹ H. DAKHLAOU, J. SEIBERT, K. HAKALA, *Sensitivity of discharge projections to potential evapotranspiration estimation in Northern Tunisia*, in *Reg Environ Chang*, 2020, vol. 20, n. 34, 1-12.

²⁰ Y. TRAMBLAY, E. HERTIG, *Modelling extreme dry spells in the Mediterranean region in connection with atmospheric circulation*, in *Atmos Res*, 2018, 40–48.

²¹ W. CRAMER, J. GUIOT, M. FADER, J. GARRABOU, J.P. GATTUSO, A. IGLESIAS, M.A. LANGE, P. LIONELLO, M.C. LLASAT, S. PAZ, J. PENUELAS, M. SNOUSSI, A. TORETI, M.N. TSIMPLIS, E. XOPLAKI, *Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean*, in *Nat Clim Change*, 2018, 972–980.

²² J. SCHILLING, E. HERTIG, Y. TRAMBLAY, J. SCHEFFRAN, *Climate change vulnerability, water resources and social implications in North Africa*, in *Reg Environ Chang*, 2020, vol. 20, n.15, 1-12.

Italia e il 56% in Portogallo²³. Secondo alcuni studi, il cambiamento climatico è destinato a causare una significativa riduzione della disponibilità di acqua dolce nel bacino del Mediterraneo²⁴, con diminuzioni comprese tra il 2% e il 15% per un riscaldamento di 2 °C²⁵, tra le più elevate al mondo, e con un notevole aumento della durata dei periodi siccitosi²⁶. Una possibile riduzione del deflusso superficiale, così come dei livelli delle falde²⁷, implicherebbe un calo dell'approvvigionamento idrico ai serbatoi naturali e artificiali, usati principalmente per l'irrigazione.

Considerando la soglia critica di disponibilità idrica pro capite di 1000 m³/anno, comunemente accettata per indicare una condizione di grave stress idrico, in alcune regioni già al di sotto di tale soglia, come il sud-est della Spagna e le coste meridionali del bacino del Mediterraneo, la disponibilità pro-capite potrebbe scendere sotto i 500 m³/anno nel prossimo futuro. Alcuni Paesi, come Grecia e Turchia, potrebbero entrare per la prima volta in condizioni critiche di disponibilità idrica entro il 2030²⁸.

Le analisi degli impatti legati alla variazione delle precipitazioni in futuro rivelano una riduzione generale della disponibilità idrica per l'intera regione mediterranea, in particolare nelle zone meridionali e orientali. La riduzione mediana sarà pari a circa il 9% (con un intervallo di confidenza tra il 4,5% e il 15,5%) con un riscaldamento di 1,5 °C, e quasi raddoppiata

²³ S.E. JACOBSE, C.R. JENSEN, F. LIU, *Improving crop production in the arid Mediterranean climate*, in *Field Crop Res*, 2012, 34–47.

²⁴ B.E. JIMÉNEZ CISNEROS, T. OKI, N.W. ARNELI, G. BENITO, J.G. COGLEY, P. DOLL, T. JIANG, S.S. MWAKALILA, *Freshwater resources*, in: *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2014, 229–269.

²⁵ W. CRAMER, J. GUIOT, M. FADER, J. GARRABOU, J.P. GATTUSO, A. IGLESIAS, M.A. LANGE, P. LIONELLO, M.C. LLASAT, S. PAZ, J. PEÑUELAS, M. SNOUSSI, A. TORETI, M.N. TSIMPLIS, E. XOPLAKI, *Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean*, in *Nat Clim Change*, 2018, 972–980.

²⁶ I.K. TSANIS, A.G. KOUTROULIS, I.N. DALIAKOPOULOS, D. JACOB, *Severe climate-induced water shortage and extremes in Crete*, in *Clim Change*, 2011, 667–677.

²⁷ L.V. NOTO, G. CIPOLLA, A. FRANCIPANE, D. PUMO, *Climate change in the mediterranean basin (part I): Induced alterations on climate forcings and hydrological processes*, in *Water Resour Manag*, 2022, 2287–2305.

²⁸ W. LUDWIG, A. BOUWMAN, E. DUMONT, F. LESPINAS, *Water and nutrient fluxes from major Mediterranean and Black Sea rivers: Past and future trends and their implications for the basin scale budgets*, in *Glob Biogeochem Cycles*, 2010, vol. 24, n. GB0A13, 1–14.

con un aumento di 2 °C (circa 17%, con un intervallo di confidenza tra l'8% e il 28%). L'allungamento dei periodi siccitosi, invece, aumenterà dal 7 all'11%²⁹.

Per quanto riguarda la domanda idrica, già di per sé elevata nel bacino del Mediterraneo, in futuro si potrebbe assistere a un ulteriore aumento³⁰, specialmente in Nord Africa³¹, compromettendo la disponibilità delle risorse idriche³². Uno studio condotto su sei bacini dell'Europa meridionale (Portogallo, Spagna, Francia, Svizzera, Italia, Grecia, Macedonia, Bulgaria e Turchia), ha evidenziato come i problemi di scarsità idrica tradizionali peggioreranno e le risorse disponibili difficilmente riusciranno a soddisfare le esigenze dei diversi settori³³.

Le portate minime (deflussi minimi di 7 giorni) potrebbero diminuire fino al 40% esclusivamente a causa del cambiamento climatico nella Penisola Iberica, in Italia e nei Balcani³⁴. Le riduzioni potrebbero raggiungere il -70% considerando anche scenari di crescente utilizzo idrico, dovuto a fattori come crescita della popolazione, PIL, produzione di elettricità, produzione agricola e cambiamenti tecnologici.

Il generale aumento della scarsità idrica dovuto ai cambiamenti climatici sarà ulteriormente aggravato dalla crescente domanda di acqua irrigua necessaria per stabilizzare la produzione agricola e garantire la sicurezza alimentare³⁵. In particolare, si prevede un incremento della domanda di

²⁹ C.F. SCHLEUSSNER, T.K. LISSNER, E.M. FISCHER, J. WOHLAND, M. PERRETTE, A. GOLLY, J. ROGELJ, K. CHILDERS, J. SCHEWE, K. FRIELER, *Differential climate impacts for policy-relevant limits to global warming: the case of 1.5 °C and 2 °C*, in *Earth Syst Dyn*, 2016, 327–351.

³⁰ D. FIORILLO, Z. KAPELAN, M. XENOCHRISTOU, F. DE PAOLA, M. GIUGNI, *Assessing the impact of climate change on future water demand using weather data*, in *Water Resour Manag*, 2021, 1449–1462.

³¹ P. DROOGERS, W.W. IMMERZEEL, W. TERINK, J. HOOGEVEEN, M.F.P. BIERKENS, L.P.H. VAN BEEK, B. DEBELE, *Water resources trends in Middle East and North Africa towards 2050*, in *Hydrol Earth Syst Sci*, 2012, 3101–3114.

³² M. MILANO, D. RUELLAND, S. FERNANDEZ, A. DEZETTER, J. FABRE, E. SERVAT, J.M. FRITSCH, S. ARDOIN-BARDIN, G. THIVET, *Current state of Mediterranean water resources and future trends under climatic and anthropogenic changes*, in *Hydrol Sci J*, 2013, 498–518.

³³ A. SORDO-WARD, A. GRANADOS, A. IGLESIAS, L. GARROTE, M.D. BEJARANO, *Adaptation effort and performance of water management strategies to face climate change impacts in six representative basins of Southern Europe*, in *Water*, 2019, vol. 11, n. 1078, 1–21.

³⁴ G. FORZIERI, L. FEYEN, R. ROJAS, M. FLÖRKE, F. WIMMER, A. BIANCHI, *Ensemble projections of future streamflow droughts in Europe*, in *Hydrol Earth Syst Sci*, 2014, 85–108.

³⁵ A. IGLESIAS, S. QUIROGA, M. MONEO, L. GARROTE, *From climate change impacts to the development of adaptation strategies: Challenges for agriculture in Europe*, in *Clim Change*, 2012, 143–168.

irrigazione nel bacino del Mediterraneo pari al 4% e al 18% per aumenti di temperatura di 2 e 5 °C, rispettivamente, entro la fine del secolo, con aumenti pari addirittura al 25% nel Mediterraneo settentrionale e al doppio in quello sud-orientale³⁶.

L'analisi delle problematiche legate alla futura scarsità idrica dovrà sicuramente tenere conto anche del ruolo degli invasi nello sviluppo della resilienza ai cambiamenti climatici. In tale ottica, alcuni studi recenti hanno utilizzato modelli climatici accoppiati a modelli di gestione dei sistemi idrici³⁷ per analizzare l'impatto degli invasi e del loro utilizzo nel contrasto alla scarsità idrica, confermando l'efficace ruolo di mitigazione che essi possono svolgere in futuro³⁸, in particolare nelle regioni semi-aride del bacino³⁹, dove gli invasi potrebbero rappresentare infrastrutture chiave per contrastare i periodi di criticità, attenuando la riduzione della disponibilità idrica indotta dal cambiamento climatico con l'aumento della capacità di stoccaggio e la gestione oculata delle risorse idriche.

4. *Gli impatti dei cambiamenti climatici sulla risorsa idrica in Sicilia*

Per quanto riguarda la Sicilia, la quale occupa una posizione centrale nel bacino del Mediterraneo, dove è influenzata dal clima arido del Nord Africa e il clima temperato e piovoso dell'Europa centrale, anche modifiche relativamente lievi della circolazione generale possono causare cambiamenti sostanziali⁴⁰.

Il regime pluviometrico e termometrico che caratterizza la Sicilia

³⁶ M. FADER, S. SHI, W. VON BLOH, A. BONDEAU, W. CRAMER, *Mediterranean irrigation under climate change: more efficient irrigation needed to compensate for increases in irrigation water requirements*, in *Hydrol Earth Syst Sci*, 2016, 953–973.

³⁷ A. FRANCIPANE, E. ARNONE, L.V. NOTO, *Combining a data-driven approach with seasonal forecast data to predict reservoir water volume in the Mediterranean area*, in *Hydrological Sciences Journal*, 2023, 764–781.

³⁸ H. ALIMOHAMMADI, A.R. MASSAH BAVANI, A. ROOZBAHANI, *Mitigating the impacts of climate change on the performance of multi-purpose reservoirs by changing the operation policy from SOP to MLDR*, in *Water Resour Manag*, 2020, 1495–1516.

³⁹ M. GORGUNER, M.L. KAVVAS, *Modeling impacts of future climate change on reservoir storages and irrigation water demands in a Mediterranean basin*, in *Sci Total Environ*, 2020, vol. 748, n. 141246, 1–20.

⁴⁰ E. ARNONE, D. PUMO, F. VIOLA, L.V. NOTO, G. LA LOGGIA, *Rainfall statistics changes in Sicily*, in *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2013, 2449–2458.

è classificato come appartenente al “clima mediterraneo” della classificazione di Koeppen, dove è identificato con la sigla Cs⁴¹, con periodi autunnali e invernali miti e piovosi e periodi estivi molto caldi, caratterizzati da lunghi periodi asciutti che spesso portano a prolungate siccità. La climatologia dell'isola è in realtà ben più complessa di quanto indicato nella classificazione di Koeppen, sia per la presenza del mare, che esercita un'azione mitigatrice sulle temperature massime e minime dell'isola, sia per l'orografia, dove la presenza di alte catene montuose, caratterizzate da una termometria completamente diversa da quella delle aree costiere e delle aree interne a bassa quota, porta anche ad accumuli di precipitazione sulle aree montane e sulle fasce costiere, dove l'effetto orografico si unisce ai fenomeni tipici dell'interfaccia terra-mare, completamente diversi da quelli delle aree interne.

In passato, diversi studi hanno cercato di scorgere i segnali di potenziali cambiamenti climatici sulla precipitazione e i loro effetti sulla disponibilità e la distribuzione della risorsa idrica nell'isola. In particolare, sono stati analizzati i dati di precipitazione annuali, stagionali e mensili sull'intero territorio, rivelando una riduzione complessiva della piovosità annua totale, con trend crescenti nei quantitativi di precipitazione di durata brevi, e trend prevalentemente negativi per le precipitazioni con durate più lunghe.

Un'analisi *at-site* dei valori di pioggia mensile provenienti da 247 stazioni gestite dall'Osservatorio delle Acque (oggi Autorità di Bacino del Distretto Idrografico della Sicilia) per il periodo 1921–2000, al fine di individuare cambiamenti significativi nei regimi pluviometrici annuali, stagionali e mensili, ha rivelato, ad esempio, un numero significativo di stazioni con trend decrescenti sia nella precipitazione media annuale (62% delle stazioni analizzate) che, in particolare, in quella invernale (circa il 60% delle stazioni analizzate)⁴². I trend positivi sono risultati essere rari e concentrati, principalmente, nei mesi estivi. Da un punto di vista spaziale, le aree maggiormente interessate dalla diminuzione della precipitazione media annuale e invernale sono risultate essere quelle delle zone occidentali e sud-occidentali dell'isola, con implicazioni sulla gestione delle risorse

⁴¹ A.N. STRAHLER, *Geografia fisica*, in G. B. Pellegrini, U. Sauro, G. Zanon. – Padova: Piccin, 1993, 1-663.

⁴² M. CANNAROZZO, L.V. NOTO, F. VIOLA, *Spatial distribution of rainfall trends in Sicily (1921–2000)*, in *Physics and Chemistry of the Earth*, 2006, 1201–1211.

idriche. La riduzione delle precipitazioni è stata più marcata nel periodo 1921-2000 rispetto ai trentenni di riferimento (1931-1960 e 1961-1990) considerati dalla *World Meteorological Organization* (WMO).

Con riferimento alle precipitazioni del periodo 1929-2009, provenienti da 365 stazioni del database regionale pubblicato dall'Osservatorio delle Acque – Agenzia Regionale per i Rifiuti e le Acque (OA-ARRA), a scala annuale, una percentuale considerevole delle stazioni, pari al 30% del numero totale, ha mostrato un trend decrescente negli eventi di pioggia, mentre nel 7% delle stazioni gli eventi di precipitazione sono risultati essere più frequenti⁴³. Durante il periodo asciutto (estivo), generalmente caratterizzato da una bassa frequenza di eventi piovosi, la percentuale di stazioni senza trend aumenta fino al 75%, mentre la restante percentuale di stazioni con trend è equamente distribuita tra quelle in cui gli eventi di pioggia tendono a diventare più rari (trend negativo) e quelle dove risultano più frequenti (trend positivo). La precipitazione totale nel periodo umido (autunno-inverno) segue il comportamento annuale, con il 72% delle stazioni che hanno mostrato trend negativi. Come conseguenza, poiché la maggior parte delle precipitazioni annuali è concentrata in questa stagione, la disponibilità idrica in Sicilia è diminuita nell'ultimo secolo a causa di una riduzione generalizzata della frequenza delle precipitazioni. Questa stagione è infatti cruciale per gli ecosistemi siciliani perché rifornisce il contenuto idrico del suolo, che rappresenta una riserva fondamentale per affrontare il successivo periodo più secco, solitamente coincidente con la stagione vegetativa. Allo stesso tempo, l'apporto idrico derivante dai mesi invernali e autunnali è determinante per i sistemi di accumulo, necessari per conservare le risorse idriche per usi futuri.

Con riferimento al periodo che va dal 2002 al 2020, l'analisi delle precipitazioni misurate dalle stazioni della rete di monitoraggio del Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano (SIAS) ha condotto all'individuazione di trend su diverse durate e per differenti quantili della distribuzione statistica delle precipitazioni, permettendo così di investigare i trend sia per le precipitazioni ordinarie che per quelle straordinarie⁴⁴. I risultati hanno mostrato una chiara dipendenza di un numero elevato di

⁴³ E. ARNONE, D. PUMO, F. VIOLA, L.V. NOTO, G. LA LOGGIA, *Rainfall statistics changes in Sicily*, in *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2013, 2449–2458.

⁴⁴ D. TREPPIEDI, G. CIPOLLA, A. FRANCIPANE, L.V. NOTO, *Detecting precipitation trend using a multiscale approach based on quantile regression over a Mediterranean area*, in *International Journal of Climatology*, 2021, 1–18.

stazioni con trend crescenti o decrescenti in funzione delle durate e dei quantili considerati. In particolare, gli eventi ordinari con durata estesa nel tempo (maggiore a 6 ore) hanno mostrato trend decrescenti su tutta l'isola, mentre le precipitazioni intense e di breve durata (inferiore all'ora) hanno mostrato trend crescenti significativi in molte stazioni della Sicilia, soprattutto per gli eventi estremi e per le durate inferiori. Quando si considerano gli eventi di precipitazione relativi alle durate più brevi (10 minuti) si è osservato che circa il 33% delle stazioni mostra un trend positivo significativo, mentre solo circa il 6% ha un trend negativo significativo. Al contrario, le precipitazioni con durate elevate (24 ore) presentano un comportamento opposto, con circa il 20% di stazioni con un trend negativo significativo. Se questi trend negativi dovessero persistere nel tempo potrebbero favorire l'innescarsi di condizioni favorevoli al verificarsi di eventi siccitosi⁴⁵, con una riduzione delle risorse idriche disponibili e impatti, ad esempio, sul settore agricolo, causando così rilevanti danni economici. Dalle analisi condotte, inoltre, risulta chiara la presenza di un trend decrescente nelle precipitazioni dei mesi invernali e primaverili, periodi dominati soprattutto dalla presenza di precipitazioni moderate su cui si basa la ricarica degli acquiferi in Sicilia, al contrario dei mesi estivi e autunnali in cui si assiste a un maggior numero di eventi estremi di breve durata, che hanno registrato un aumento significativo nel tempo⁴⁶.

Tutto ciò è indicativo del fatto che la distribuzione temporale delle precipitazioni sta cambiando negli ultimi anni, portando, in generale, a una diminuzione delle precipitazioni di elevata durata e un incremento delle precipitazioni di breve durata, con conseguenze importanti sulla risorsa idrica in Sicilia. È chiaro, infatti, che il verificarsi di precipitazioni sempre più intense e concentrate nel tempo, non favorisce né la ricarica degli acquiferi, né la formazione di deflusso che arricchisce le risorse di acqua dolce superficiali (invasi naturali e artificiali), favorendo piuttosto il verificarsi di eventi di piena e di piene lampo (*flash flood*), i quali negli ultimi decenni sono cresciuti sia in frequenza che in severità, in molte aree della Sicilia.

In particolare, negli anni che vanno dal 2010 al 31 ottobre 2023 sono

⁴⁵ A.M. LAUSIER, S. JAIN, *Overlooked trends in observed global annual precipitation reveal underestimated risks*, in *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, n. 16746, 1-7.

⁴⁶ V. PECORINO, T. DI MATTEO, M. MILAZZO, L. PASOTTI, A. PLUCHINO, A. RAPISARDA, *Empirical analysis of hourly rainfall data in Sicily from 2002 to 2023*, in *Eur. Phys. J. B*, 2024, vol. 97, n. 154, 1-10.

stati registrati dall'Osservatorio Città Clima ben 684 allagamenti da piogge intense in tutta l'Italia, di cui la Sicilia risulta essere la regione più colpita in assoluto, con 86 casi (il 12,5% dei casi verificatisi in tutta Italia). Ad andare in sofferenza sono state soprattutto le grandi città, tra cui Agrigento, con 15 casi, e Palermo, con 12 casi⁴⁷.

Con riferimento al futuro della Sicilia, per il 2080-2100, l'AR6 dell'I-PCC prevede una diminuzione dei quantitativi delle precipitazioni medie annue, variabile tra un minimo del 10-15% per l'SSP2 – 4.5 e il 20-25% per l'SSP5 – 8.5. Secondo il report, la regione diventerà più arida, a causa dell'effetto combinato della diminuzione delle precipitazioni e dell'aumento dell'evapotraspirazione, con il numero di giorni con risorse idriche insufficienti a soddisfare il fabbisogno dell'isola destinato ad aumentare. Nello scenario molto probabile di un aumento di +1,5°C, la scarsità idrica interesserà il 18% della popolazione, mentre con un aumento di +2°C la percentuale potrebbe salire addirittura al 54%. Allo stesso tempo, i modelli prevedono un aumento dell'intensità degli eventi di precipitazione estrema che favoriranno l'innescarsi di processi di piena e di piena lampo.

5. Considerazioni finali

Il cambiamento climatico rappresenta una sfida importante per la nostra società, poiché ci obbliga ad adattare le nostre azioni al fine di attuare una gestione efficiente delle risorse idriche future, le quali saranno probabilmente più limitate, e di mitigare i rischi associati a una probabile intensificazione futura del ciclo idrologico. Molti lavori recenti condotti sulle regioni che si affacciano sul Mar Mediterraneo dimostrano come il bacino del Mediterraneo possa essere oggi considerato un *hot spot* climatico in quanto caratterizzato da cambiamenti notevoli in molte delle principali componenti climatiche e idrologiche⁴⁸.

I trend rilevati negli ultimi anni in variabili come la temperatura e le precipitazioni e le proiezioni future per il bacino del Mediterraneo, pur caratterizzate da inevitabili incertezze⁴⁹, mostrano chiari segnali di cam-

⁴⁷ <https://cittaclima.it/rapporto-citta-clima-2023-speciale-alluvioni/>.

⁴⁸ G. LAZOGLOU, A. PAPADOPOULOS-ZACHOS, P. GEORGIADIS, G. ZITTIS, K. VELIKOU, E.M. MANIOS, C. ANAGNOSTOPOULOU, *Identification of climate change hotspots in the Mediterranean*, in *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, n. 29817, 1-11.

⁴⁹ L.V. NOTO, G. CIPOLLA, D. PUMO, A. FRANCIANE, *Climate Change in the Mediterranean*

biamento climatico e delineano uno scenario futuro sempre più caldo e arido. Questo avviene anche negli scenari più ottimistici di emissione di gas serra, con modifiche rilevanti anche nella stagionalità e in alcune caratteristiche, come intensità e frequenza, degli eventi estremi legati al regime delle precipitazioni. Come emerge da numerosi studi, la riduzione delle precipitazioni totali interesserà tutte le stagioni, mentre gli eventi di pioggia intensa tenderanno a intensificarsi soprattutto alla fine dell'estate e in autunno, aumentando così anche il rischio di alluvioni.

Nella regione mediterranea, molti studi concordano nel prevedere, su base annua, un incremento della domanda evaporativa atmosferica in risposta all'aumento delle temperature, mentre l'evapotraspirazione reale tenderà a diminuire a causa della ridotta disponibilità idrica nel suolo, che limiterà il processo stesso.

La riduzione prevista delle precipitazioni su base annua inciderà sulle risorse idriche del bacino del Mediterraneo, determinando una diminuzione della disponibilità d'acqua sia da corpi idrici superficiali naturali e artificiali, sia da falde acquifere. In aggiunta alla prevista carenza di disponibilità di risorse idriche, diversi studi prevedono un marcato aumento della domanda, dell'uso e dei consumi idrici nel bacino del Mediterraneo, a causa della crescita della popolazione e dello sviluppo economico, indicando per il futuro un'accentuazione dello stress idrico⁵⁰.

Anche per quanto riguarda la Sicilia, diversi studi hanno evidenziato segnali inequivocabili di cambiamento nel regime pluviometrico della Sicilia e, conseguentemente, nella disponibilità della risorsa idrica nell'isola. In particolare, l'analisi dei dati storici ha messo in evidenza una tendenza generale alla diminuzione delle precipitazioni medie annue, soprattutto nei mesi invernali e primaverili, con un aumento delle precipitazioni intense e di breve durata, in diverse aree. La diminuzione delle precipitazioni di lunga durata ha comportato una diminuzione nella disponibilità di acqua per la ricarica degli acquiferi e la ricostituzione delle riserve idriche sotterranee e superficiali. Anche per il futuro, le proiezioni dei principali modelli prevedono una riduzione delle precipitazioni tra il 10% e il 25%, con un aumento dell'aridità e una crescente scarsità idrica per una parte

Basin (Part II): A Review of Challenges and Uncertainties in Climate Change Modeling and Impact Analyses, in *Water Resour Manag*, 2022, 2307-2323.

⁵⁰ L. L.V. NOTO, G. CIPOLLA, A. FRANCIPANE, D. PUMO, *Climate Change in the Mediterranean Basin (Part I): Induced Alterations on Climate Forcings and Hydrological Processes*, in *Water Resour Manag*, 2022, 2287-2305.

significativa della popolazione, specialmente per scenari di riscaldamento superiori a 1,5 °C.

Per affrontare le nuove sfide che il cambiamento climatico pone alle regioni mediterranee e alla Sicilia, in particolare, sarà dunque fondamentale sviluppare strategie appropriate e coordinate per migliorare la nostra comprensione del clima e dei suoi cambiamenti, a partire dal potenziamento dei sistemi di monitoraggio, che dovranno essere in grado di integrare in modo efficiente le osservazioni satellitari, i dati provenienti dagli strumenti installati a terra e i modelli previsionali, per monitorare e prevedere i cambiamenti climatici, allo sviluppo di sistemi di supporto alle decisioni che permettano di individuare le strategie migliori per la gestione e la distribuzione della risorsa idrica tra le varie componenti del sistema di approvvigionamento.

Abstract

I cambiamenti climatici in atto stanno profondamente modificando i sistemi naturali del pianeta Terra, con il surriscaldamento globale che gioca un ruolo chiave nell'alterazione del ciclo idrologico. Una delle conseguenze più rilevanti di questi cambiamenti riguarda le precipitazioni e la loro distribuzione sia nello spazio che nel tempo, con effetti significativi sulla disponibilità e distribuzione delle risorse idriche.

In alcune regioni del globo, come quella mediterranea, tali cambiamenti stanno diventando sempre più evidenti. I dati mostrano trend decrescenti nei valori medi di precipitazione e un aumento delle temperature. Questi mutamenti contribuiscono a un incremento nella frequenza e nella severità di eventi estremi, come siccità, precipitazioni intense, ondate di calore, ecc., che influenzano la gestione e la disponibilità della risorsa idrica.

In questo contesto, con riferimento alle precipitazioni, il presente lavoro analizza anche i *trend* osservati in passato in Sicilia e fa un accenno alle possibili proiezioni future sulla base degli ultimi modelli disponibili in letteratura.

L'obiettivo è fornire un quadro di come i cambiamenti climatici stiano influenzando la disponibilità delle risorse idriche nel Mediterraneo per stimolare nel lettore una riflessione su una gestione efficace e sostenibile della risorsa per affrontare le sfide legate all'incertezza climatica futura.

Water resources in the Mediterranean and Sicily: Historical trends and future projections

Climate change is profoundly reshaping the Earth's natural systems, with global warming playing a central role in altering the hydrological cycle. One of the most significant consequences is the shift in precipitation patterns, which directly affects the availability and distribution of water resources.

In regions like the mediterranean, these changes are becoming increasingly evident. Historical climate data show a clear trend of decreasing average precipitation and rising temperatures. These shifts are contributing to more frequent and severe droughts, as well as the intensification

of extreme weather events such as floods and heatwaves, phenomena that significantly threaten the sustainability of water resources.

In this context, with reference to precipitation, the present work also analyzes the trends observed in the past in Sicily and provides a brief overview of possible future projections based on the latest models available in the literature.

The aim is to provide an overview of how climate change is affecting water resource availability in the Mediterranean, to encourage the reader to reflect on effective and sustainable water management strategies to face the challenges posed by future climate uncertainty.