



Data del documento: 30 Gennaio 2026

Future climate change impacts on water uses and multisector dynamics at district scale

Info: Deliverable 5.2



Autorità di Bacino
Distrettuale del Fiume Po



Titolo	Future climate change impacts on water uses and multisector dynamics at district
Deliverable	5.2
WP	5
Lead Beneficiary	CMCC
Autori	Antonio Trabucco (CMCC), Muhammad Faizan Aslam (CMCC), Andrea Rivosecchi (CMCC), Sara Masia (CMCC), Stefania Tamea (POLITO), Amirarsalan Shahmohammadi (POLITO)
Partner coinvolti	CMCC, POLITO

Periodo	February 2023 – January 2026
Data di consegna	31 January 2026
Bozza di consegna	27 January 2026
Data di validazione	30 January 2026

Tipologia	Deliverable
Livello di disseminazione	PU-Public
Versione	1
Parole Chiave	Climate Change, Irrigation Requirements, Water Uses, land use change, crop distribution, tourism

HISTORY OF CHANGES		
Version	Publication date	Change
1	31/01/2026	Final version
2		

Co-funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the Union or CINEA. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

Sommario

1	Technical Summary	5
2	Sintesi tecnica	6
3	Il Distretto del Po nel contesto dello stress idrico indotto dal clima	7
4	Impatto dei cambiamenti climatici su consumi irrigui.....	11
4.1	Nexus Acqua-Cibo.....	11
4.2	Proiezione della domanda idrica delle colture sotto il cambiamento climatico	14
4.3	Quadro di simulazione per il fabbisogno irriguo.....	14
4.4	Input data	17
4.5	Proiezione della domanda idrica delle colture sotto il cambiamento climatico: Risultati	18
5	Proiezioni delle superfici delle colture agricole	29
5.1	Introduzione	29
5.2	Dinamiche.....	30
6	Impatto dei cambiamenti climatici su turismo.....	36
6.1	Introduzione	36
6.2	Dinamiche.....	37
7	Conclusioni	41
8	Bibliografia e Sitografia	42

1 Technical Summary

The deliverable 5.2 evaluates and assess future scenarios, quantifying the relevant future climate forcing for hydrological processes and water uses in agriculture, land use trends, agriculture and crop distribution, socio-economic development (tourism) and trends of relevant sectors competing for water resources. The main water needs for various water competing sectors are assessed for different time horizons and dynamically declined to take into account the space-time variability of hydroclimatic forcing. The deliverable highlights climate-driven changes in crop water demand across the Po River District (Northern Italy), integrating high-resolution climate projections, and socioeconomic drivers (tourism and land use change and crop distribution). Mean regional ETo rises from $\sim 1,020 \text{ mm yr}^{-1}$ historically to $\sim 1,050\text{--}1,120 \text{ mm yr}^{-1}$ under RCP2.6 and up to $\sim 1,150\text{--}1,200 \text{ mm yr}^{-1}$ under RCP8.5, with interannual spread growing under high-emission scenarios. Potential irrigation requirements increase for all crops. Under no CO_2 fertilization, RCP2.6 yields $+6\text{--}15\%$ increases; RCP8.5 yields $+15\text{--}25\%$ (largest for rice, forage, maize, wheat). CO_2 fertilization reduces demand by $\sim 50\text{--}120 \text{ mm yr}^{-1}$ and attenuates relative increases by $\sim 5\text{--}10$ percentage points but does not offset warming-driven demand.

Highest absolute demands and largest volumetric increases occur in Emilia-Romagna and Lombardy; Piedmont shows lower baselines but higher relative sensitivity (often $>+20\%$ for summer crops). Intensification concentrates where baseline demand is already high. The main vulnerability arises from seasonal mismatch—peak summer irrigation demand vs reduced summer supply—rather than long-term mean availability. Historical droughts (e.g., 2022) demonstrate system exposure. Seasonal tourist influx (modeled via regression using GDP, HICP, and TCI) amplifies summer water demand; tourists estimated to consume $\sim 3\times$ resident per capita consumption, increasing peak competition.

Climate change, especially under high emissions, will substantially amplify irrigation demand in the Po District, intensifying regional water stress and exacerbating Water–Food tradeoffs. CO_2 fertilization provides partial mitigation but insufficient to avert increased pressure. Policy responses should prioritize integrated, spatially explicit water management, irrigation efficiency, storage and

reuse infrastructure, crop diversification, and adaptive planning informed by ensemble projections.

Expected critical condition based on climate projections, such as pronounced drought periods, and co-occurent enhanced water needs from competing sectors are functional for risk assessment (task 5.2.4), under which optimal management and operational practice, to mitigate water use conflicts among sectors within a Nexus framework are tested (task 5.4.1) to overcome critical risks of water supply failures and optimize availability for essential services with higher priorities.

2 Sintesi tecnica

Il deliverable analizza scenari futuri, includendo le principali forzanti climatiche per i processi idroclimatici e gli usi idrici in agricoltura, le tendenze dell'uso del suolo, la distribuzione delle colture, lo sviluppo socio-economico e l'evoluzione dei settori in competizione per le risorse idriche. I fabbisogni idrici dei vari settori concorrenti sono valutati per diversi orizzonti temporali e declinati dinamicamente per tenere conto della variabilità spazio-temporale delle forzanti idro-climatiche. Il deliverable evidenzia cambiamenti indotti dal clima nella domanda idrica colturale nel Distretto del Po, integrando proiezioni climatiche ad alta risoluzione e fattori socio-economici (turismo, cambiamento d'uso del suolo e distribuzione delle colture). L'ETo regionale media aumenta da $\sim 1.020 \text{ mm yr}^{-1}$ per il periodo storico a $\sim 1.050\text{--}1.120 \text{ mm yr}^{-1}$ per lo scenario RCP2.6 e fino a $\sim 1.150\text{--}1.200 \text{ mm yr}^{-1}$ per RCP8.5, con una maggiore variabilità interannuale negli scenari ad alte emissioni. I fabbisogni irrigui potenziali aumentano per tutte le colture: senza fertilizzazione da CO_2 , RCP2.6 produce incrementi del +6–15% mentre RCP8.5 del +15–25% (massimi per riso, foraggi, mais e frumento). La fertilizzazione da CO_2 riduce la domanda di circa $50\text{--}120 \text{ mm yr}^{-1}$ e attenua gli aumenti relativi di $\sim 5\text{--}10$ punti percentuali, ma non compensa l'aumento indotto dal riscaldamento.

I massimi fabbisogni assoluti e i maggiori aumenti volumetrici si concentrano in Emilia-Romagna e Lombardia; il Piemonte mostra basi più basse ma maggiore sensibilità relativa (spesso $>+20\%$ per le colture estive). L'intensificazione si concentra dove la domanda di base è già elevata. La vulnerabilità principale deriva dallo sfasamento stagionale — picco della domanda irrigua estiva vs ridotta offerta estiva — più che dalla disponibilità media a lungo termine. Episodi di siccità storici (es. 2022) evidenziano l'esposizione del sistema. L'afflusso turistico

stagionale amplifica la domanda estiva; i turisti consumano in stima ~3× il consumo pro capite residente, aumentando la competizione nei picchi, anche se la distribuzione dei flussi turistici tende a redistribuirsi su mesi primaverili-autunnali.

Il cambiamento climatico, soprattutto in scenari ad alte emissioni, amplierà sostanzialmente la domanda di irrigazione nel Distretto del Po, intensificando lo stress idrico regionale e aggravando trade-offs tra settori in competizione. La fertilizzazione dovuta da livelli più elevati di CO₂ su processi fisiologici della vegetazione offre una mitigazione parziale ma insufficiente a evitare l'aumento della pressione. Le risposte politiche dovrebbero privilegiare una gestione integrata e spazialmente esplicita delle acque, l'efficienza irrigua, infrastrutture di accumulo e riuso, diversificazione colturale e pianificazione adattativa basata su proiezioni ensemble.

Le condizioni critiche previste dalle proiezioni climatiche, quali periodi di siccità pronunciata e un contemporaneo incremento dei fabbisogni da settori concorrenti, sono funzionali alla valutazione del rischio (task 5.2.4), nell'ambito della quale verranno testate pratiche gestionali e operative ottimali per mitigare i conflitti d'uso tra settori in un quadro Nexus (task 5.4.1), al fine di superare i rischi critici di mancata fornitura idrica e ottimizzare la disponibilità per i servizi essenziali con priorità più alte.

3 Il Distretto del Po nel contesto dello stress idrico indotto dal clima

Il Distretto del Fiume Po rappresenta il sistema idrologico di maggiore rilevanza socio-economica in Italia. Il Po nasce vicino al Monte Monviso (3.841 m) e scorre per circa 652 km da ovest a est prima di sfociare nel Mare Adriatico attraverso un delta che copre circa 380 km². Lungo il suo corso il fiume integra apporti idrologici dai sistemi alpini e appenninici ed è alimentato da 141 affluenti, determinando un regime di portata altamente complesso e spazialmente eterogeneo. L'area totale del bacino del Po è di circa 70.000 km², mentre il Distretto del Po, che rappresenta l'unità gestionale centrale e il soggetto di questa valutazione, include le parti più urbanizzate, industrializzate e coltivate intensivamente dell'Italia settentrionale. Il distretto comprende le regioni Piemonte, Lombardia, Emilia-Romagna e Veneto, che insieme ospitano la maggior parte delle terre irrigate, delle attività industriali e

della popolazione italiana. Altre porzioni del bacino più ampio, incluse aree di Liguria, Valle d'Aosta, Trentino-Alto Adige, Toscana, Marche, nonché aree transfrontaliere in Francia e Svizzera, sono escluse dall'analisi a scala di distretto per la loro limitata rilevanza relativa al riutilizzo delle acque agricole e alle strategie di gestione incentrate sull'irrigazione. Il distretto selezionato rappresenta quindi la porzione del bacino dove la domanda d'acqua è più elevata, la competizione per la risorsa è più intensa e le pressioni legate al clima dovrebbero avere le conseguenze socio-economiche più forti.

Dal punto di vista climatico la Pianura Padana presenta un clima sub-umido subtropicale e un clima continentale mite. Le precipitazioni annue variano approssimativamente tra 750 e 1.200 mm, con valori medi di bacino prossimi a 1.100 mm, concentrate principalmente in primavera e autunno. Le aree dell'alto bacino ricevono generalmente precipitazioni maggiori rispetto alla pianura inferiore. Le temperature medie variano sostanzialmente con l'altitudine, oscillando da circa 5 °C nelle zone alpine alte a 10–15 °C nelle aree di pianura. Le medie invernali sono attorno ai 3 °C, mentre quelle estive raggiungono circa 23 °C, con eventi di caldo estremo sempre più frequenti. Basse velocità del vento e alta umidità atmosferica aumentano ulteriormente la domanda evaporativa, in particolare durante l'estate, quando i fabbisogni irrigui raggiungono il picco. Dal punto di vista idrologico il bacino del Po è caratterizzato da forte stagionalità e marcati contrasti spaziali. Gli affluenti alpini sono prevalentemente alimentati da neve e ghiacciai, con massimi di portata in tarda primavera e inizio estate, mentre gli affluenti appenninici sono controllati dalle precipitazioni e tipicamente presentano magre estive. Storicamente questo duplice regime garantiva una fornitura idrica relativamente affidabile.

Tuttavia, i cambiamenti climatici nelle precipitazioni, l'aumento delle temperature dell'aria, il calo della copertura nevosa e lo scioglimento precoce della neve stanno progressivamente alterando la tempistica dei deflussi e riducendo la disponibilità idrica durante la stagione irrigua estiva, indebolendo così la resilienza idrologica apparente del sistema. Il bacino del Po riceve un deflusso annuo medio di circa 77–78 miliardi di m³ d'acqua, proveniente principalmente dalle precipitazioni. Di questo volume, circa 47 miliardi di m³ (circa due terzi) confluiscono nel Mare Adriatico, mentre i restanti 30 miliardi di m³ vengono persi per evapotraspirazione, infiltrazione e prelievi agricoli diretti.

Il bacino è sostenuto da una fitta rete di canali artificiali, particolarmente in Lombardia, Veneto ed Emilia-Romagna, che svolge un ruolo cruciale nella redistribuzione delle acque sulla pianura, nell'approvvigionamento per usi irrigui e industriali e nel ritardare i deflussi durante gli eventi di piena. Inoltre, grandi laghi prealpini (Garda, Como, Iseo, Maggiore) e bacini artificiali, molti originariamente costruiti per la produzione idroelettrica, forniscono una significativa capacità di stoccaggio e di buffer. Le risorse di acque sotterranee sono anch'esse rilevanti: l'acquifero padano è stimato contenere oltre 5 miliardi di m³ d'acqua, rendendolo uno dei più grandi sistemi acquiferi in Europa. Tuttavia, sia le risorse superficiali sia quelle sotterranee sono sempre più sotto stress a causa dell'aumento della domanda e della variabilità climatica. L'esposizione socio-economica del Distretto del Po alla scarsità d'acqua è eccezionalmente elevata. Oltre 23 milioni di persone, più di un terzo della popolazione italiana, vivono all'interno del bacino, con densità di popolazione che raggiungono circa 355 abitanti km⁻², quasi il doppio della media nazionale. Il distretto ospita dieci città con popolazione superiore a 100.000 abitanti, incluse aree metropolitane importanti come Milano e Torino. Dal punto di vista economico la Pianura Padana genera tra il 34% e il 40% del prodotto interno lordo nazionale, collocandosi alla pari con alcune delle maggiori economie nazionali europee. Questa concentrazione economica è sostenuta da una densa struttura urbana e industriale sviluppatasi storicamente lungo il fiume e i suoi affluenti, strettamente intrecciata con le reti idriche agricole.

L'agricoltura costituisce una pietra angolare dell'economia del Distretto del Po e rappresenta il settore a maggior consumo idrico. Il distretto contribuisce per circa il 35% alla produzione nazionale di colture e supporta circa il 55% della produzione zootecnica italiana, concentrata in un numero limitato di province. La superficie agricola utilizzata (SAU) nel Distretto del Po è di circa 2,77 milioni di ettari, di cui circa 1,15 milioni di ettari sono irrigati. Questa sola superficie irrigata rappresenta quasi il 50% della superficie irrigata totale italiana e circa il 64% dei volumi nazionali di irrigazione. I fabbisogni irrigui medi nel distretto superano i 6.000 m³ ha⁻¹, determinando un volume totale di irrigazione di circa 7,1 miliardi di m³ all'anno. L'uso idropotabile ammonta a circa 2,5 miliardi di m³, mentre i consumi industriali raggiungono circa 1,5 miliardi di m³. I prelievi da acque sotterranee contribuiscono per circa 6 miliardi di m³ all'anno, con i restanti 14,5 miliardi di m³ forniti da corpi idrici superficiali. L'acqua per l'irrigazione viene distribuita attraverso una

combinazione di derivazioni superficiali, bacini di accumulo e una vasta rete di canali, con metodi di irrigazione superficiale e a sommersione ancora predominanti (circa 68%), seguiti da sistemi a pioggia (circa 27%) e da una quota relativamente limitata di microirrigazione (circa 4%). Questa struttura irrigua riflette lo sviluppo storico e contribuisce sia all'elevata produttività sia alla forte vulnerabilità alle carenze idriche.

La geomorfologia della Pianura Padana accentua ulteriormente la sua dipendenza dall'irrigazione. La pianura può essere grossolanamente divisa in alta pianura, caratterizzata da suoli grossolani e permeabili con limitata idoneità agricola, e bassa pianura, dominata da depositi più fini di argilla e limo ad alta fertilità ma con minore permeabilità. Alla transizione tra queste due zone le acque sotterranee risalgono in superficie nelle cosiddette risorgive, che storicamente hanno permesso un'intensa irrigazione e lo sviluppo agricolo. Sebbene questa configurazione abbia sostenuto alte rese e una produzione diversificata – inclusi cereali (frumento, mais, riso), colture foraggere, orticoltura, frutticoltura e allevamento intensivo – crea anche una dipendenza strutturale dall'approvvigionamento idrico controllato.

Il cambiamento climatico è destinato a esacerbare le pressioni esistenti sul Distretto del Po intensificando la domanda evaporativa, modificando i regimi pluviometrici e aumentando la frequenza di eventi caldi e siccitosi combinati. Episodi di siccità recenti, culminati nella grave siccità del 2022 – la più severa siccità idrologica registrata nel bacino in oltre due secoli – hanno dimostrato la vulnerabilità del sistema. Durante tali eventi le portate fluviali sono scese a livelli storicamente bassi, i prelievi per irrigazione sono stati fortemente limitati, gli ecosistemi del delta del Po hanno subito stress acuti e sono state necessarie misure di emergenza prolungate. Questi eventi evidenziano che la scarsità d'acqua nel Distretto del Po non è determinata principalmente dalla disponibilità media di lungo periodo, ma dallo sfasamento temporale tra il picco della domanda irrigua estiva e la ridotta offerta idrica.

Dato il ruolo dominante dell'agricoltura nel consumo d'acqua e nella produzione alimentare, il nexus Acqua-Cibo emerge come una dimensione critica del rischio climatico nel Distretto del Po. L'aumento delle temperature, lo spostamento della stagionalità dei deflussi e la crescente competizione tra settori probabilmente amplificheranno la domanda irrigua proprio quando la disponibilità d'acqua sarà

più limitata. Sebbene progressi tecnologici e strategie di gestione possano mitigare parzialmente questi impatti, l'ampiezza della dipendenza agricola dall'irrigazione implica che anche cambiamenti climatici moderati possono propagarsi rapidamente attraverso il sistema alimentare, influenzando la produttività delle colture, la produzione zootecnica e la stabilità economica regionale. Quantificare come i cambiamenti climatici nella domanda atmosferica, nella disponibilità idrica e nell'uso idrico delle colture interagiscano nello spazio e nel tempo è essenziale per supportare strategie di gestione adattativa delle risorse idriche.

4 Impatto dei cambiamenti climatici su consumi irrigui

4.1 Nexus Acqua-Cibo

Il cambiamento climatico sta già influenzando i sistemi agricoli in tutto il Mediterraneo alterando la fenologia delle colture e accorciando i cicli vegetativi (MedECC, 2020). Questi cambiamenti sono strettamente collegati all'aumento del fabbisogno irriguo, poiché temperature più elevate e regimi pluviometrici modificati aumentano la domanda idrica delle colture (Masia et al., 2021). In condizioni climatiche future, si prevede che la domanda di irrigazione nel bacino del Mediterraneo aumenterà sostanzialmente, con incrementi stimati del fabbisogno idrico di circa il 10% per la vite, il 16% per il grano e il 13% per il mais (Masia et al., 2021). Nel Mediterraneo settentrionale, il riscaldamento dovrebbe accorciare le stagioni di crescita di circa 12 giorni per il pomodoro e 15 giorni per il grano entro il 2050, accompagnato da riduzioni dell'evapotraspirazione delle colture di circa il 5% e il 6%, rispettivamente (Saadi et al., 2015). Su scala regionale, il cambiamento climatico sta già limitando la idoneità e la produttività delle colture. In Catalogna, circa il 15% degli oliveti e mandorleti in asciutto è previsto diventare non idoneo senza irrigazione (Montsant et al., 2021), mentre spostamenti fenologici di pascoli, melo, vite e mais dovrebbero ridurre le rese (Funes et al., 2021). Pattern simili sono osservati altrove nel Mediterraneo: i requisiti netti di irrigazione per le colture foraggere sono previsti aumentare del 38,4–67,1% in Portogallo sia sotto lo scenario di emissioni moderate (RCP 4.5) sia sotto quello elevato (RCP 8.5) (Soares et al., 2020), e la domanda di irrigazione per la coltivazione dell'olivo dovrebbe

aumentare di circa il 18,5% in alcune aree del Marocco, dell'Algeria e del sud della Spagna (Tanasijevic et al., 2014).

La maggior parte della produzione alimentare nel Distretto del Fiume Po dipende dall'agricoltura irrigua, facendo della disponibilità d'acqua il principale vincolo sulla produttività agricola e sulla stabilità del sistema. Il distretto ospita alcuni dei sistemi colturali più intensivi d'Europa e l'irrigazione domina l'uso agricolo dell'acqua, rappresentando circa l'80% dei prelievi consumptivi totali durante la stagione vegetativa. Tale dipendenza riflette la prevalenza di colture ad elevato consumo idrico, in particolare riso, mais, grano e foraggi, che congiuntamente sostengono sia la produzione vegetale sia i sistemi alimentari zootecnici. Tra queste colture, il riso costituisce la singola componente più rilevante del fabbisogno idrico agricolo. Circa 214.000 ha di terreno agricolo sono coltivati a riso nel Distretto del Po, principalmente concentrati in Lombardia e Piemonte. I fabbisogni irrigui annui per il solo riso ammontano a circa 3,6 miliardi di m³, di cui circa 1,8 miliardi di m³ sono applicati in Piemonte e 1,7 miliardi di m³ in Lombardia. Questa pronunciata concentrazione spaziale della domanda d'acqua crea pressioni localizzate sulle risorse idriche e aumenta la sensibilità dei sistemi di produzione alimentare alla variabilità idrologica.

Pur richiedendo volumi di irrigazione per unità di superficie inferiori rispetto al riso, colture estese come mais e grano generano una domanda cumulativa sostanziale, soprattutto in condizioni di elevata domanda evaporativa atmosferica. In questo contesto, il nexus Acqua-Cibo nel Distretto del Po è vincolato non tanto dalla disponibilità media a lungo termine quanto dallo sfasamento stagionale tra il picco della domanda irrigua e la ridotta offerta idrica estiva. Periodi di bassa portata fluviale durante la stagione vegetativa limitano fortemente i prelievi per irrigazione ed espongono le produzioni agricole a stress idrico in fasi fenologiche critiche. Episodi storici di siccità hanno mostrato che anche riduzioni di portata relativamente brevi possono generare impatti sproporzionati sulla produzione agricola se coincidono con fasi sensibili di crescita, sottolineando la natura non lineare della relazione tra stress idrologico e produzione alimentare.

La dipendenza strutturale dall'irrigazione, combinata con elevati fabbisogni idrici colturali e una domanda spazialmente concentrata, amplifica la vulnerabilità del sistema alimentare alla variabilità e al cambiamento climatico. L'aumento delle temperature è destinato ad accrescere ulteriormente la domanda evaporativa e i

fabbisogni irrigui, mentre gli spostamenti nella stagionalità dei deflussi potrebbero ridurre la disponibilità idrica nei mesi estivi. In tali condizioni la competizione tra usi dell'acqua si intensifica e la produzione agricola diventa sempre più esposta a vincoli di offerta, con implicazioni dirette per la sicurezza alimentare, i redditi agricoli e la stabilità economica regionale. In questo quadro, il nexus Acqua-Cibo fornisce una lente critica per valutare gli impatti del cambiamento climatico nel Distretto del Po. Comprendere come le variazioni climatiche nella domanda atmosferica e nei regimi idrologici si traducano in fabbisogni irrigui specifici per coltura è essenziale per individuare vulnerabilità e supportare strategie di gestione adattativa delle risorse idriche in grado di sostenere la produzione agricola sotto crescente stress idrico.

Coerentemente con le dinamiche di bacino descritte in precedenza, il nexus Acqua-Cibo nel Distretto del Po è determinato non tanto dalla disponibilità media a lungo termine, quanto dallo sfasamento temporale tra il picco della domanda irrigua e la ridotta offerta idrica estiva. Durante gravi episodi di siccità come il 2003, il 2006 e il 2007, la portata del Po è scesa a valori intorno a $\sim 270 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, rispetto a una media di lungo periodo di circa $1.400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, limitando severamente i prelievi per irrigazione ed evidenziando la vulnerabilità dei sistemi di produzione agricola. Questi eventi hanno dimostrato che anche siccità idrologiche relativamente brevi possono generare stress idrico critico quando coincidono con fasi sensibili delle colture.

L'obiettivo principale di questa ricerca è valutare il Water-Food (WF) Nexus analizzando l'impatto del cambiamento climatico sul fabbisogno idrico delle colture dovuto allo stress idrico nel Distretto del Po. Questo studio applicherà il modello SIMETAW_GIS (Masia et al., 2021) per quantificare il fabbisogno idrico colturale sotto due scenari di emissione (RCP 2.6 e RCP 8.5); il modello è stato precedentemente valutato e applicato per analisi dei fabbisogni irrigui a scala regionale in ambiente mediterraneo (Aslam et al., 2025). Questa valutazione comprensiva fornirà una migliore comprensione dei settori acqua e alimentare, favorendo lo sviluppo di strategie agricole sostenibili e politiche adattative per il Distretto del Po.

4.2 Proiezione della domanda idrica delle colture sotto il cambiamento climatico

La crescente pressione sulla domanda idrica agricola ha rafforzato la necessità di sviluppare e perfezionare strumenti di modellizzazione in grado di valutare gli impatti e la vulnerabilità dei sistemi agricoli nelle condizioni climatiche attuali e future (Nam, 2018). Negli ultimi decenni sono stati sviluppati numerosi modelli di crescita delle colture e di bilancio idrico per simulare le variazioni di resa e i fabbisogni irrigui a scala locale e regionale, tra cui APSIM (McCown et al., 1996), AquaCrop (Steduto et al., 2009), CROPGRO-Soybean (Batchelor et al., 2002), DAISY (Palosuo et al., 2011), EPIC (Williams et al., 1989), FASSET (Olesen et al., 2004), SIMETAW (Snyder et al., 2012; Mancosu et al., 2016), STICS (Brisson et al., 1998), SWAP (Huang et al., 2015), WOFOST (van Diepen et al., 1989), CERES-Wheat (Ritchie & Otter, 1985), CropSyst (Stöckle et al., 2003a) e DSSAT (Jones et al., 2003a). Questi modelli sono stati ampiamente applicati per quantificare l'evapotraspirazione e i fabbisogni idrici delle colture, fornendo preziose indicazioni sulla crescente dipendenza dell'agricoltura dalle risorse idriche e supportando la valutazione di strategie di adattamento e mitigazione. Tuttavia permangono limiti importanti, soprattutto a scala regionale. Molti studi esistenti si concentrano su un numero limitato di colture o si basano su un ventaglio ristretto di scenari climatici e orizzonti temporali, il che riduce la rappresentazione dell'incertezza e della variabilità climatica. In regioni eterogenee come il Distretto del Po, tale approccio rischia di trascurare le differenze spaziali nella distribuzione delle colture, nelle pratiche di gestione e nella domanda irriguo. Di conseguenza, cresce la necessità di valutazioni integrate e spazialmente esplicite in grado di simulare molteplici colture nello spazio e nel tempo, permettendo confronti robusti dell'efficienza d'uso dell'acqua e supportando una pianificazione agricola informata sotto il cambiamento climatico.

4.3 Quadro di simulazione per il fabbisogno irriguo

SIMETAW# (Simulation of Evapotranspiration of Applied Water) è un modello giornaliero di bilancio coltura-suolo-acqua sviluppato per calcolare la evapotraspirazione di riferimento standardizzata, la evapotraspirazione potenziale della coltura ben irrigata e la evapotraspirazione reale o osservata (ET_o , ET_c , ET_a), l'evapotraspirazione dell'acqua applicata (ET_{aw}) e un calendario di irrigazione per

un sito specifico (Mancosu et al., 2016). SIMETAW# (Masia et al., 2021) utilizza dati climatici e del suolo come input. Il modello gira su piattaforma R per consentire stime del consumo idrico delle colture e della domanda di irrigazione sotto differenti condizioni climatiche, con una piattaforma GIS che fornisce dati ambientali spazialmente espliciti su vaste regioni e integra opzioni di adattamento/gestione come i metodi di irrigazione e diversi calendari colturali.

L'evapotraspirazione reale (ETa) è calcolata come: $ETc \times Ks$, dove $Ks = ETa/ETc$ è un coefficiente di stress idrico del suolo che varia da 0,00 (quando non c'è evapotraspirazione) fino a 1,00 (quando non c'è riduzione dell'evapotraspirazione dovuta allo stress idrico); ETc è la evapotraspirazione della coltura ben irrigata, ossia senza stress idrico significativo, calcolata come prodotto della evapotraspirazione di riferimento (ETo) e di un coefficiente colturale specifico (Kc) che tiene conto delle differenze tra ETo, riferita alla superficie di riferimento standardizzata, ed ETc, riferita alla coltura ben irrigata. La ETo giornaliera (Eq. 1) è calcolata utilizzando l'equazione standardizzata di Penman-Monteith per la evapotraspirazione di riferimento (Allen et al., 1998; Allen et al., 2005; Allen et al., 2006).

Eq. 1

$$ETo = \frac{0.408\Delta (R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T+273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

Dove ETo rappresenta la evapotraspirazione di riferimento giornaliera (mm day^{-1}), Δ è la pendenza della curva della pressione di vapore saturo ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), R_n è la radiazione netta sulla superficie della coltura ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), T è la temperatura aria media giornaliera a 2 m di altezza ($^\circ\text{C}$), G è il flusso di calore del suolo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), u_2 è la velocità del vento a 2 m di altezza (m s^{-1}), e_s è la pressione di vapore di saturazione (kPa), e_a è la pressione di vapore effettiva (kPa), $e_s - e_a$ è il deficit di pressione di vapore (kPa) e γ è la costante psicrometrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$). Ulteriori dettagli sul calcolo delle variabili necessarie per stimare ETo con il metodo di Penman-Monteith sono riportati in FAO-56 (Allen et al., 2006). Tenendo conto dell'effetto della concentrazione di CO_2 atmosferica prevista, il modello aggiusta la resistenza della chioma (r_c) come mostrato nell'Equazione 2, sviluppata da Snyder et al. (2011) e Mancosu et al. (2016). Le simulazioni sono state eseguite assumendo sia livelli di CO_2 costanti (372 ppm) sia concentrazioni atmosferiche di CO_2 elevate per ciascuno scenario considerato.

Eq. 2
$$r_c = \frac{1000}{1.44(14.18 - 0.0112CO_2)} \text{ (s m}^{-1}\text{)}$$

L'evapotraspirazione dell'acqua applicata (ET_{aw} , Equazione 4) è calcolata come:

Eq. 3
$$ET_{aw} = \sum_{i=1}^n NA_i = CET_c - CE_{spg} - CE_r - \Delta SW$$

Dove $\sum_{i=1}^n NA_i$ è la somma delle applicazioni nette d'acqua apportate al quarto inferiore della coltura, CET_c è l'evapotraspirazione cumulativa della coltura ben irrigata, CE_{spg} è il contributo cumulativo delle falde libere alla CET_c , CE_r è il contributo effettivo delle precipitazioni alla CET_c , e ΔSW è la variazione del contenuto d'acqua del suolo dall'inizio alla fine della stagione entro la profondità effettiva dell'apparato radicale.

L'applicazione lorda di irrigazione (o acqua applicata) per ciascuna irrigazione è calcolata come:

Eq. 5
$$GA_i = NA_i / DU$$

Dove DU indica l'uniformità di distribuzione del quarto inferiore del sistema irriguo. Quando la profondità media d'acqua applicata all'area del quarto inferiore del campo è pari al deficit idrico del suolo nella zona esplorata dalle radici prima dell'irrigazione, DU può essere approssimata dall'efficienza di applicazione, ossia la frazione di acqua applicata che viene immagazzinata nel suolo e contribuisce all'evapotraspirazione delle colture. Di conseguenza, l'applicazione lorda stagionale (GA) può essere stimata a

$$GA = \sum_{i=1}^n NA_i / \overline{DU} = ET_{aw} / \overline{DU} .$$

Per la maggior parte delle colture, una gestione irrigua efficace mira a mantenere un'elevata uniformità di distribuzione e ad applicare profondità d'irrigazione che reintegrino la zona radicale del quarto inferiore a intervalli sufficientemente frequenti, minimizzando così lo stress idrico e massimizzando l'efficienza d'uso dell'acqua.

4.4 Input data

Le variabili climatiche giornaliere sono state ricavate dall'iniziativa EURO-CORDEX a una risoluzione orizzontale di circa 11 km e sono state consultate tramite il Copernicus Climate Data Store (<https://climate.copernicus.eu/>). Le traiettorie previste della concentrazione atmosferica di CO₂ sono state ottenute dall'Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project. Per rappresentare plausibili traiettorie climatiche future e le incertezze associate, mantenendo una risoluzione spaziale adeguata a catturare la marcata eterogeneità topografica e climatica del Distretto del Po, è stato assemblato e armonizzato un ensemble completo di proiezioni climatiche. Sono state impiegate simulazioni climatiche del Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) per caratterizzare sia i periodi storici (1976–2005) sia i periodi futuri (2036–2065), consentendo la valutazione degli impatti del cambiamento climatico sotto due Representative Concentration Pathways (RCP 2.6 e RCP 8.5), che riflettono strategie di mitigazione e traiettorie di emissione alternative (IPCC, 2014).

Sono stati estratti valori giornalieri di umidità relativa vicino alla superficie (2 m), temperatura dell'aria massima e minima, precipitazione, radiazione solare di superficie e velocità del vento da cinque simulazioni di Global Climate Models (GCM) dinamicamente downscalate mediante Regional Climate Models (RCM). Le combinazioni di modelli selezionate includono: ncc-noresm1-m-gerics-rem02015, mpi-m-mpi-esm-lr-smhi-rca4, cnrm-cerfacs-cnrm-cm5-knmi-racmo22e, cnrm-cerfacs-cnrm-cm5-cnrm-aladin63 e ncc-noresm1-m-smhi-rca4. La scelta di queste proiezioni è stata guidata principalmente dalla disponibilità di dataset giornalieri coerenti per entrambi gli scenari RCP 2.6 e RCP 8.5.

L'informazione sui suoli è stata integrata per rappresentare le proprietà idrauliche del suolo nel quadro del bilancio idrico del suolo e per calcolare le diverse componenti di evapotraspirazione, inclusa l'evapotraspirazione colturale in condizioni standard (ET_c), l'evapotraspirazione effettiva (ET_a) e l'evapotraspirazione sotto stress idrico (ET_{aw}). La capacità di ritenzione idrica del suolo distribuita spazialmente è stata ottenuta da Hengl e Gupta (2019b), mentre la profondità del suolo di riferimento è stata ricavata dal database della Food and Agriculture Organization (FAO, 2012). Questi dataset sono stati riallocati e aggregati per corrispondere alla risoluzione spaziale di 0,11° adottata nell'analisi, utilizzando strumenti di geoprocessing basati su GDAL in QGIS. Inoltre, i dati di elevazione della

Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) sono stati scaricati dalla piattaforma United States Geological Survey Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) e utilizzati per stimare la pressione atmosferica necessaria al calcolo della evapotraspirazione di riferimento (ET_0) mediante la metodologia standardizzata FAO-56.

Le tipologie colturali incluse nell'analisi sono cereali (mais, frumento, riso), leguminose (soia), orticole, oleaginose (girasole), colture industriali (barbabietola da zucchero), alberi da frutto perenni (pesco), vigneti e colture foraggere. I parametri specifici per coltura, inclusi i coefficienti colturali iniziale, a metà stagione e di fine stagione (K_c) nonché la profondità efficace dell'apparato radicale, sono stati ricavati dalle linee guida FAO-56 (Allen et al., 2006) per tutte le colture selezionate. Le colture sono state valutate in condizioni irrigue impiegando i sistemi di irrigazione più comuni adottati nel Distretto del Po, ossia irrigazione a goccia (D), a pioggia/spruzzo (S) e per gravità (G), con il metodo di irrigazione assegnato in base alle pratiche agricole prevalenti per ciascuna coltura. Per la maggior parte delle colture, le simulazioni hanno assunto condizioni di irrigazione completa al fine di isolare e quantificare anomalie standard specifiche per coltura espresse come variazioni percentuali attribuibili al cambiamento climatico. Tuttavia, per colture in cui l'irrigazione a deficit è comunemente praticata, come vite da vino e olivo, sono state considerate esplicitamente condizioni di stress idrico per riflettere pratiche di gestione realistiche.

4.5 Proiezione della domanda idrica delle colture sotto il cambiamento climatico: Risultati

Questa sezione riassume i risultati dell'evapotraspirazione di riferimento (ET_0) e dei fabbisogni irrigui nelle condizioni di cambiamento climatico considerando sia concentrazioni atmosferiche di CO_2 costanti sia elevate. I risultati sono analizzati per il periodo storico (1976–2005) e per il periodo di metà secolo (2036–2065) negli scenari RCP 2.6 e RCP 8.5, basandosi su medie ensemble trentennali derivate da cinque proiezioni climatiche. Le simulazioni condotte con CO_2 costante e con CO_2 elevata permettono di distinguere i contributi relativi del forcing climatico e degli effetti fisiologici indotti dalla CO_2 sulla domanda idrica delle colture. Per evitare effetti di confondimento legati agli attuali modelli di uso del suolo, i risultati sono presentati in termini di fabbisogno potenziale di irrigazione delle colture, senza

ponderazione per l'area effettivamente coltivata, consentendo così confronti coerenti tra colture e regioni e tenendo conto di possibili futuri spostamenti nella distribuzione agricola.

Evapotraspirazione di riferimento

La Figura 1 mostra una chiara intensificazione dell'evapotraspirazione di riferimento (ET_0) nel Distretto del Po dal periodo storico (1976–2005) a metà secolo (2036–2065), con rilevanti differenze dipendenti dallo scenario. Storicamente, l' ET_0 annuo oscilla principalmente tra circa 950 e 1.100 mm anno⁻¹, con una media pluriennale prossima a ~1.020 mm anno⁻¹, indicando una domanda evaporativa atmosferica relativamente stabile. In condizioni climatiche future, l' ET_0 aumenta in entrambi gli scenari, ma con ampiezze molto diverse. Sotto RCP 2.6, l' ET_0 tipicamente varia tra 1.050 e 1.120 mm anno⁻¹, corrispondenti a un aumento di circa 3–8% rispetto al periodo storico. Al contrario, RCP 8.5 produce una risposta molto più marcata, con ET_0 oltre i 1.150 mm anno⁻¹ e picchi prossimi ai 1.200 mm anno⁻¹, rappresentando un incremento fino al 15–18%. L'inclusione di CO_2 atmosferica elevata riduce leggermente l' ET_0 rispetto alle simulazioni a CO_2 costante, ma la differenza resta modesta (nell'ordine di 20–40 mm anno⁻¹) e non compensa l'aumento dominato dal riscaldamento, soprattutto sotto RCP 8.5. Inoltre, l'ampliamento della variabilità interannuale nelle proiezioni future, in particolare con alte emissioni, indica una maggiore variabilità e incertezza climatica. Dal punto di vista della gestione idrica, questi aumenti di ET_0 si traducono direttamente in maggiore evapotraspirazione colturale e fabbisogno irriguo; per una coltura estiva tipica con un coefficiente stagionale prossimo all'unità, l'aumento previsto di ET_0 sotto RCP 8.5 implica da solo un ulteriore 120–180 mm per stagione di crescita, aumentando sensibilmente la pressione sulle risorse idriche già stressate nel Distretto del Po.

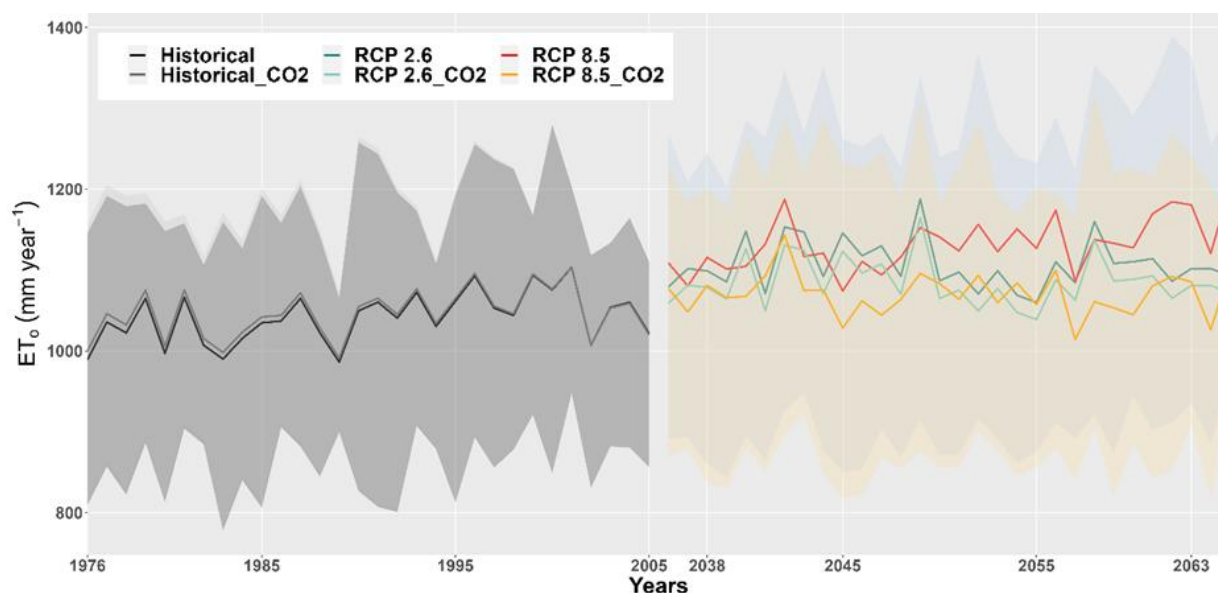


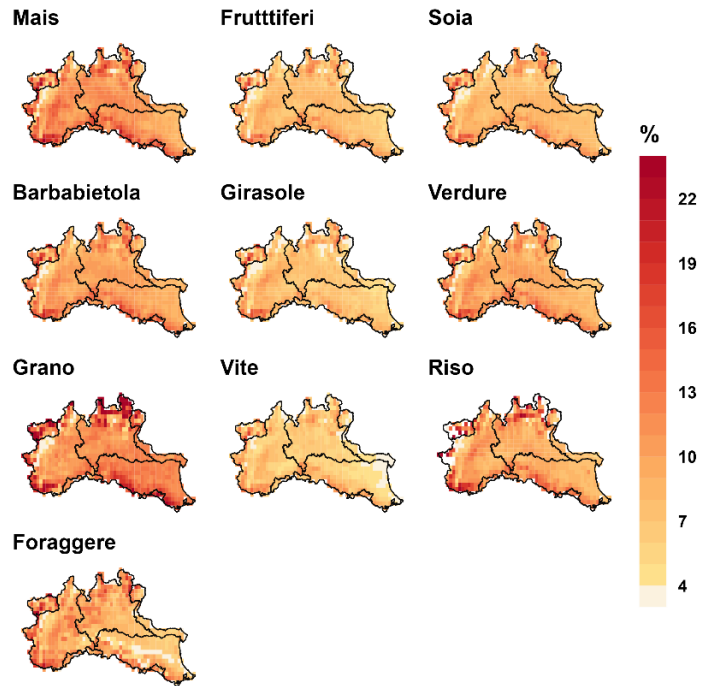
Figura 1. Evoluzione temporale dell'evapotraspirazione di riferimento del Distretto del Po (ET_0) mediata sulla regione per i periodi storico (1976–2005) e futuro (2036–2065) negli scenari RCP2.6 e RCP8.5, considerando la fertilizzazione da CO_2 costante e elevata.

Fabbisogni irrigui

Le Figure 2–3 quantificano una sostanziale intensificazione del fabbisogno irriguo delle colture nel Distretto del Po dalle condizioni storiche (1990; media 1976–2005) alla metà del secolo (2050; media 2036–2065), con risposte fortemente dipendenti da coltura, scenario e CO_2 . In condizioni climatiche storiche senza fertilizzazione da CO_2 , la domanda di irrigazione mostra già marcati contrasti tra colture, variando approssimativamente tra 200–350 mm anno⁻¹ per cereali invernali e vigneti, 450–650 mm anno⁻¹ per mais, girasole e barbabietola da zucchero, e superando 700–850 mm anno⁻¹ per riso e colture foraggere nelle aree più intensive in termini idrici. Includendo la fertilizzazione da CO_2 nelle condizioni storiche, i fabbisogni irrigui si riducono sistematicamente, tipicamente di 50–120 mm anno⁻¹ a seconda della coltura, riflettendo una minore conducibilità stomatica e una maggiore efficienza d'uso dell'acqua; tuttavia i modelli spaziali e il ranking delle colture restano in gran parte invariati. In condizioni climatiche future, la domanda di irrigazione aumenta per tutte le colture e in tutta la regione, guidata dall'aumento della domanda evaporativa atmosferica. Senza fertilizzazione da CO_2 , gli incrementi proiettati sotto RCP 2.6 sono generalmente compresi tra +6% e +15%, mentre RCP 8.5 produce

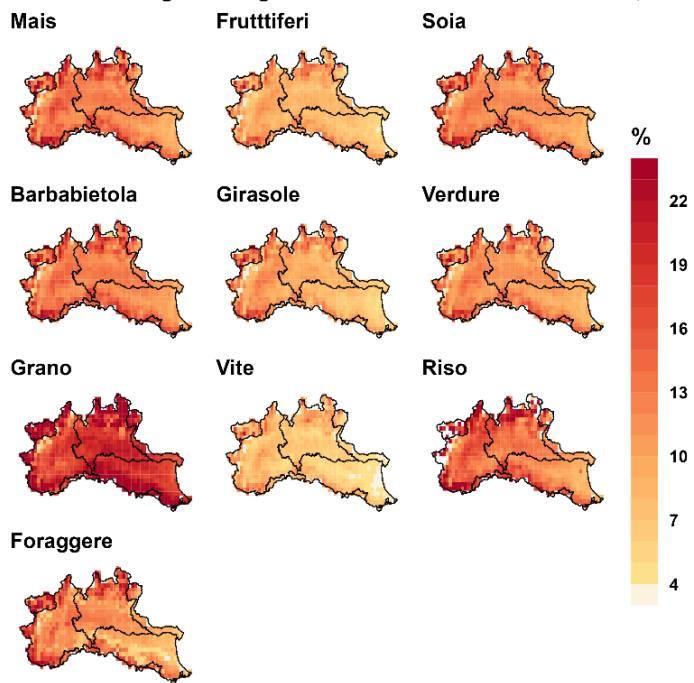
risposte molto più marcate, con aumenti frequenti del +15–25%, soprattutto per riso, colture foraggere, mais e frumento. Quando si considera la fertilizzazione da CO₂, gli aumenti relativi della domanda irriguo sono costantemente attenuati di circa 5–10 punti percentuali, con variazioni previste sotto RCP 2.6 e RCP 8.5 tipicamente comprese tra +15% e -3%. Tuttavia, gli effetti della CO₂ non compensano l'aumento dominante guidato dal clima. Spazialmente, gli aumenti sono più forti nelle aree che già presentano elevati fabbisogni irrigui di base, indicando un'intensificazione piuttosto che una ridistribuzione dello stress idrico. I risultati mostrano che, sebbene la fertilizzazione da CO₂ moderi parzialmente i fabbisogni irrigui futuri, il cambiamento climatico—soprattutto in scenari ad alte emissioni—porta a una robusta e sostanziale amplificazione della domanda idrica agricola nel Distretto del Po. I fabbisogni irrigui riportati rappresentano la domanda potenziale delle colture, poiché i calcoli sono effettuati indipendentemente per ciascun tipo colturale e non tengono conto della distribuzione reale dell'uso del suolo o delle frazioni di superficie coltivata nel Distretto del Po.

% Variazione del fabbisogno di irrigazione senza fertilizzazione con CO₂, RCP2.6 - 2050



(b)

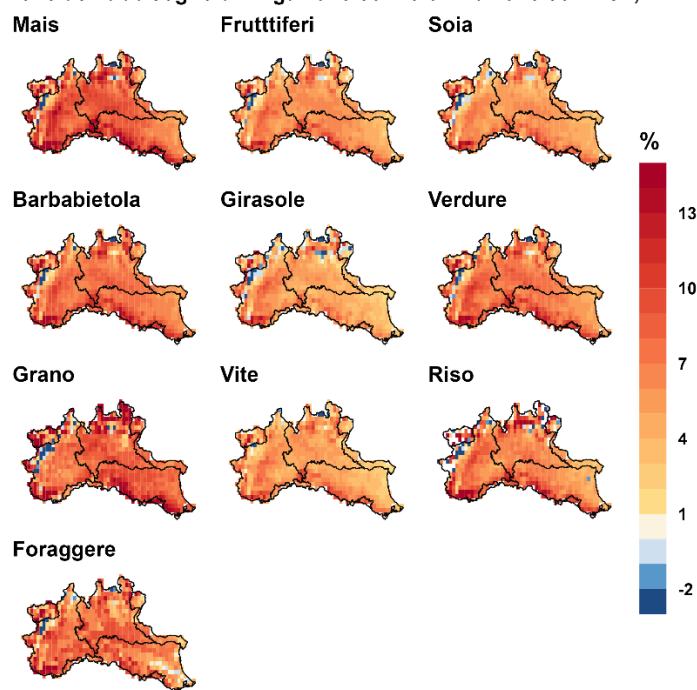
% Variazione del fabbisogno di irrigazione senza fertilizzazione con CO₂, RCP8.5 - 2050



(c)

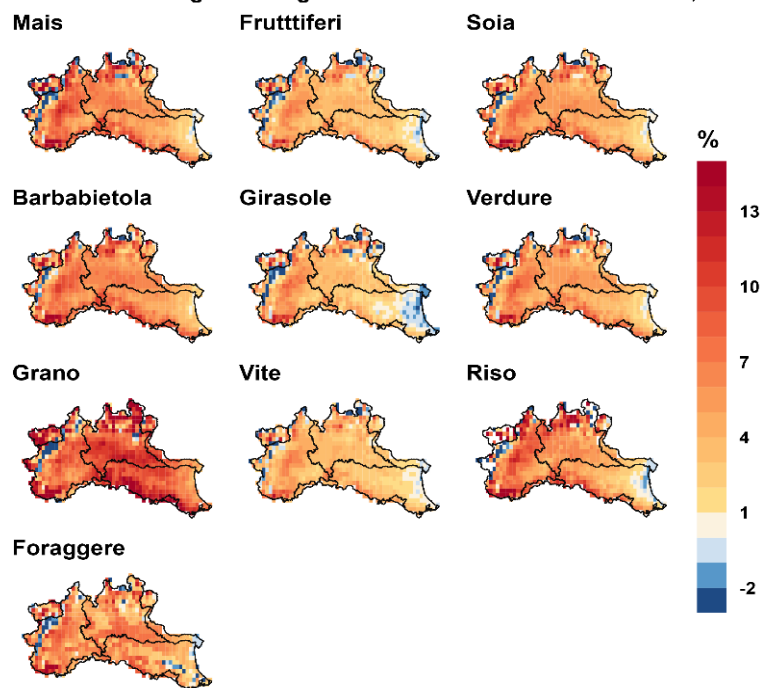
Figura 2. Distribuzione spaziale di a) valori assoluti storici (1976–2005) e variazioni percentuali relative dei fabbisogni irrigui per cereali (mais, grano, riso), leguminose (soia), orticole, oleaginose (girasole), colture industriali (barbabietola), fruttiferi, vite e colture foraggere nel Distretto del Po per il periodo futuro (2036–2065) sotto b) RCP2.6 e c) RCP8.5, assumendo livello di CO₂ costante.

% Variazione del fabbisogno di irrigazione con fertilizzazione con CO₂, RCP2.6 - 2050



(b)

% Variazione del fabbisogno di irrigazione con fertilizzazione con CO₂, RCP8.5 - 2050



(c)

Figura 3. Distribuzione spaziale di a) valori assoluti storici (1976–2005) e variazioni percentuali relative dei fabbisogni irrigui per cereali (mais, grano, riso), leguminose (soia), orticole, oleaginose (girasole), colture industriali (barbabietola), fruttiferi, vite e colture foraggere nel Distretto del Po per il periodo futuro (2036–2065) sotto b) RCP2.6 e c) RCP8.5 considerando l’impatto della fertilizzazione da CO₂.

Variabilità regionale dei fabbisogni irrigui simulati

L’analisi regionale, considerando le aree agricole idonee, mostra un’intensificazione della domanda idrica per l’irrigazione delle colture nel Distretto del Po, guidata da gradienti climatici e da esigenze idriche specifiche delle colture. In condizioni storiche, l’Emilia-Romagna presenta il fabbisogno irriguo assoluto più elevato, riflettendo temperature più calde e stagioni di crescita più lunghe, con fabbisogni mediani superiori a 500–600 mm anno⁻¹ per la maggior parte delle colture estive e frequentemente oltre 800–900 mm anno⁻¹ per riso e colture foraggere. La Lombardia mostra fabbisogni leggermente inferiori ma comunque consistenti, tipicamente tra 450–600 mm anno⁻¹ per le colture estive e 700–850

mm anno⁻¹ per riso e sistemi foraggeri, mentre il Piemonte registra i fabbisogni di base più bassi, generalmente sotto i 550 mm anno⁻¹ per le colture estive e 650–800 mm anno⁻¹ per le colture più intensive in termini idrici, riflettendo condizioni climatiche più fresche e una maggiore influenza morfologica.

Nonostante queste differenze di base, le proiezioni climatiche future indicano una risposta regionale fortemente sincrona all'aumento della domanda evaporativa atmosferica. In assenza di fertilizzazione da CO₂, gli incrementi relativi della domanda irriguo sono proiettati tra +6–15% sotto RCP 2.6 e +15–25% sotto RCP 8.5 in tutte le regioni, con i maggiori aumenti assoluti in Emilia-Romagna e Lombardia per via dei loro più elevati fabbisogni di base, mentre il Piemonte mostra una sensibilità relativa più alta, con aumenti percentuali che spesso si avvicinano o superano il +20% per colture estive come mais, soia, riso e foraggiere.

Quando si considera la fertilizzazione da CO₂, la domanda irriguo si riduce sistematicamente in tutte le regioni di circa 50–120 mm anno⁻¹, riflettendo una maggiore efficienza d'uso dell'acqua; tuttavia, questo effetto principalmente mitiga anziché annulla i cambiamenti indotti dal clima, riducendo gli incrementi relativi di 5–10 punti percentuali e mantenendo la gerarchia spaziale complessiva della domanda idrica. Di conseguenza, anche in condizioni di CO₂ elevata i fabbisogni irrigui assoluti continuano ad aumentare, con necessità idriche aggiuntive di 60–140 mm anno⁻¹ per le colture estive sotto RCP 8.5. Spazialmente, le regioni con elevato fabbisogno di base sperimentano i maggiori aumenti volumetrici, mentre le regioni con fabbisogno di base inferiore mostrano forti risposte in termini percentuali.

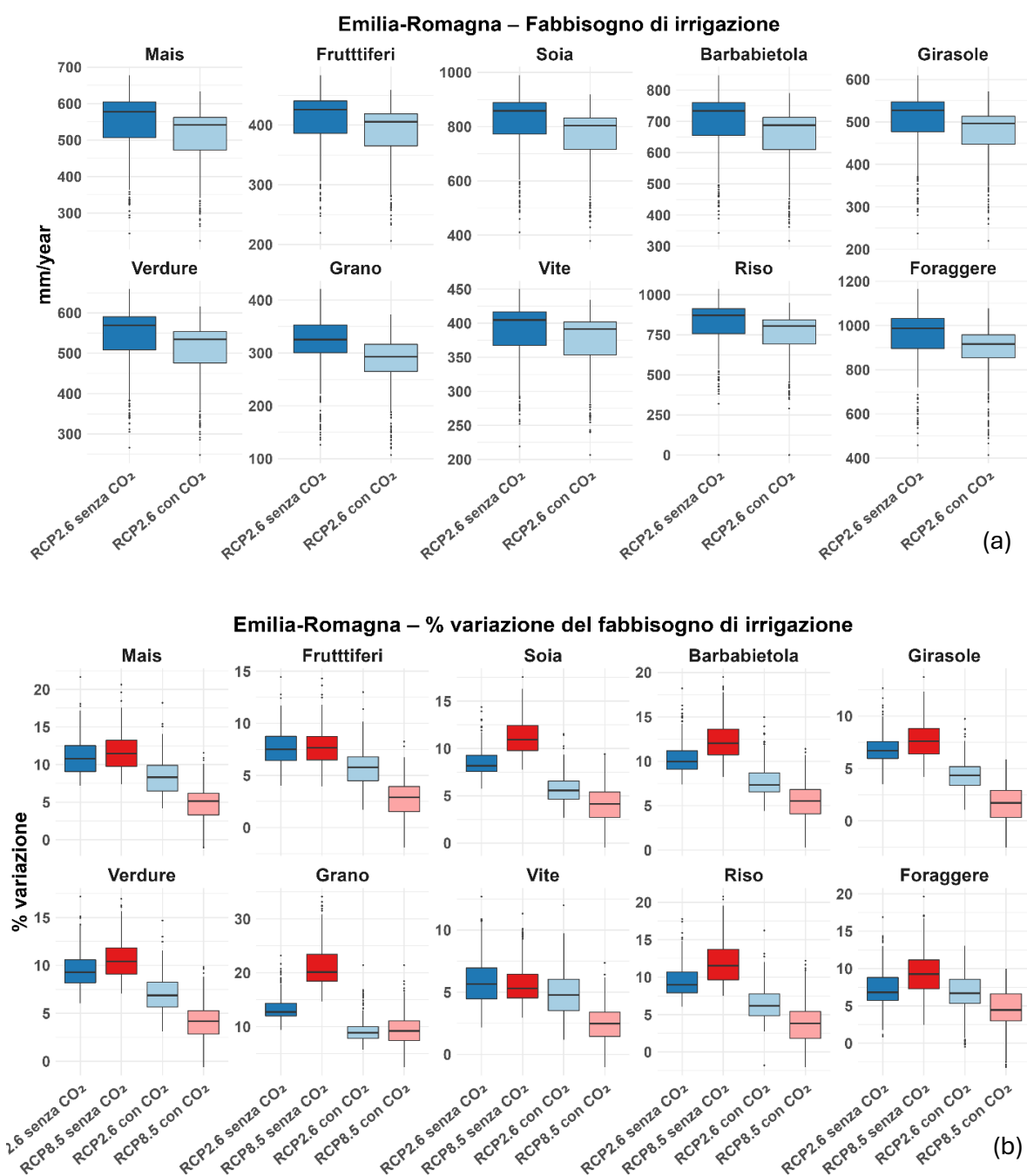


Figura 4. mostra i fabbisogni irrigui per cereali (mais, grano, riso), leguminose (soia), orticole, oleaginose (girasole), colture industriali (barbabietola da zucchero), alberi da frutto, vigneti e colture foraggere nel Distretto del Po. I pannelli (a-c-e) mostrano i valori assoluti storici (1976–2005), mentre i pannelli (d-e-f) mostrano le variazioni percentuali relative per il periodo futuro 2036–2065 sotto RCP2.6 e RCP8.5 con CO_2 costante ed elevata per Emilia-Romagna (a-b), Lombardia (b-c) e Piemonte (d-e), rispettivamente.

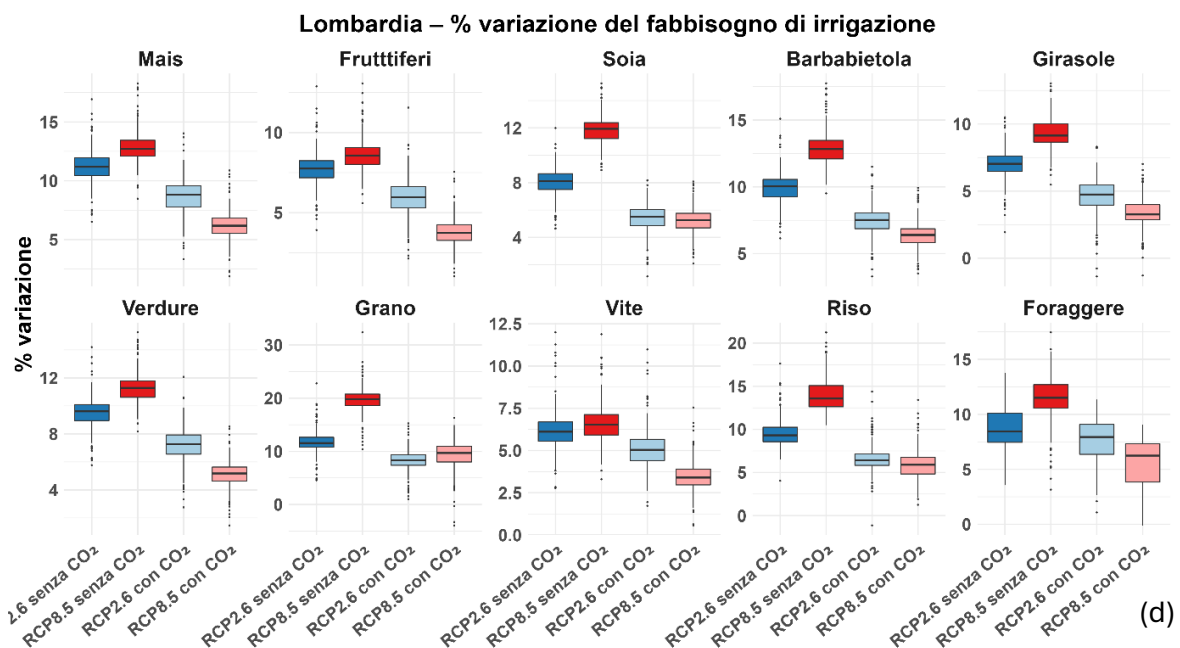
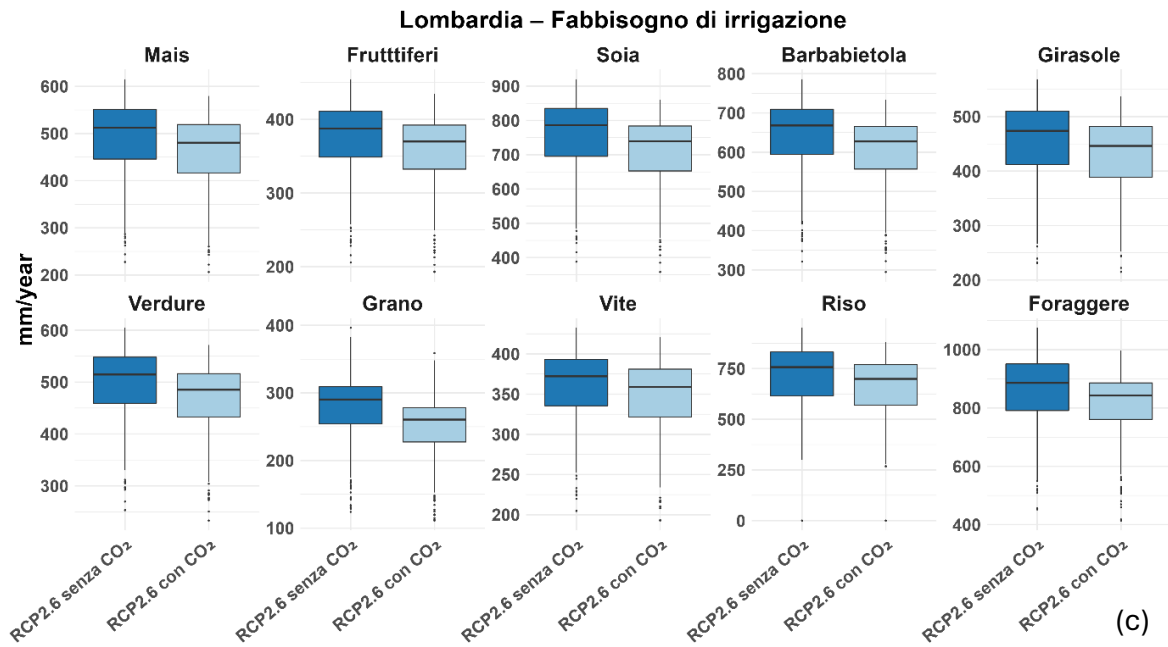


Figura 4. mostra i fabbisogni irrigui per cereali (mais, grano, riso), leguminose (soia), orticole, oleaginose (girasole), colture industriali (barbabietola da zucchero), alberi da frutto, vigneti e colture foraggere nel Distretto del Po. I pannelli (a-c-e) mostrano i valori assoluti storici (1976–2005), mentre i pannelli (d-e-f) mostrano le variazioni percentuali relative per il periodo futuro 2036–2065 sotto RCP2.6 e RCP8.5 con CO₂ costante ed elevata per Emilia-Romagna (a-b), Lombardia (b-c) e Piemonte (d-e), rispettivamente.

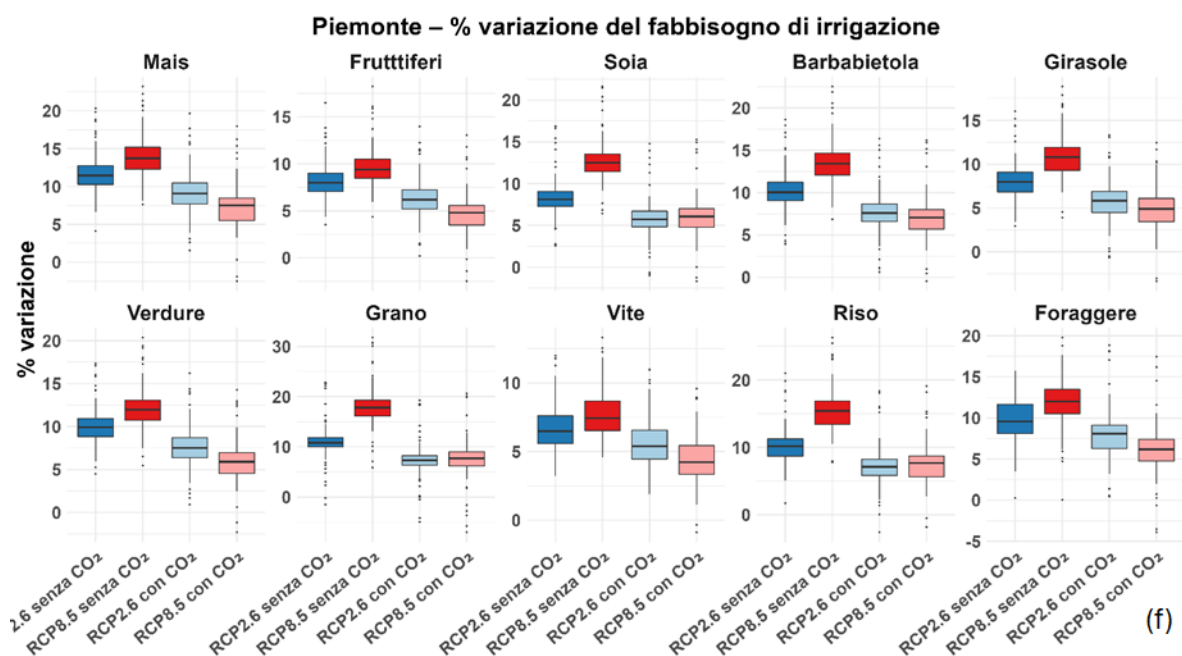
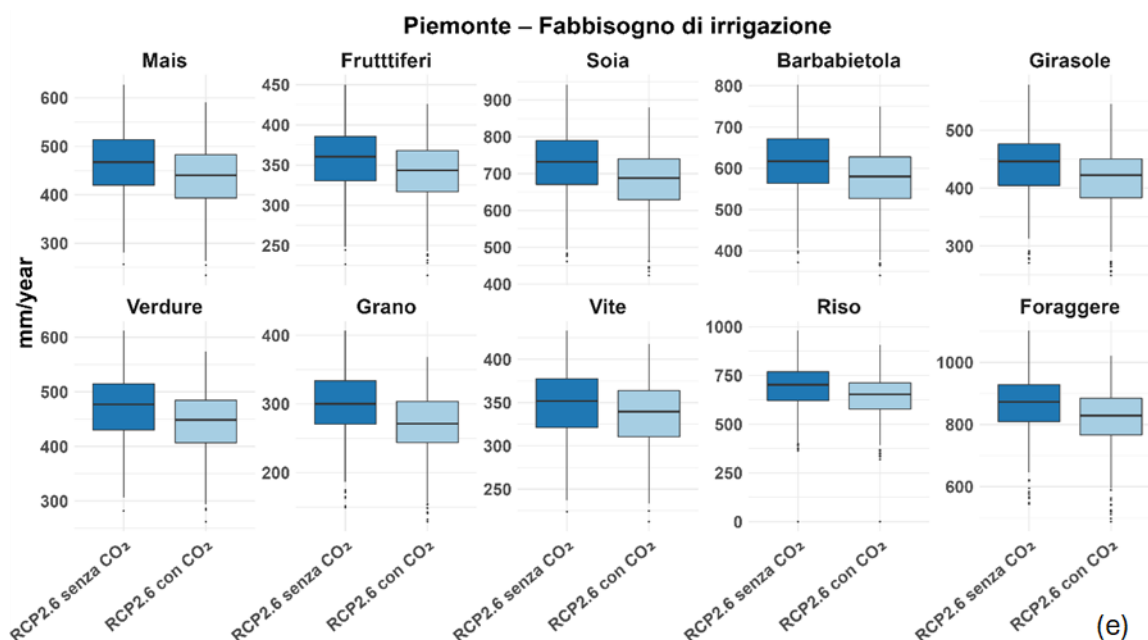


Figura 4. mostra i fabbisogni irrigui per cereali (mais, grano, riso), leguminose (soia), orticole, oleaginose (girasole), colture industriali (barbabietola da zucchero), alberi da frutto, vigneti e colture foraggere nel Distretto del Po. I pannelli (a–c–e) mostrano i valori assoluti storici (1976–2005), mentre i pannelli (d–e–f) mostrano le variazioni percentuali relative per il periodo futuro 2036–2065 sotto RCP2.6 e RCP8.5 con CO₂ costante ed elevata per Emilia-Romagna (a–b), Lombardia (b–c) e Piemonte (d–e), rispettivamente.

5 Proiezioni delle superfici delle colture agricole

5.1 Introduzione

Il bacino del Po è il cuore agricolo dell'Italia: alta produttività, forte concentrazione di coltivazioni irrigue e un'ampia varietà di sistemi colturali che spaziano dai cereali e foraggi al riso, alle colture industriali, frutticole e viticole. Le proiezioni future della distribuzione colturale in quest'area devono tenere conto delle pressioni combinate del cambiamento climatico, della disponibilità idrica, delle dinamiche socio-economiche e delle politiche agricole. Qui si sintetizzano i principali scenari attesi per le prossime decadi, le relative implicazioni per la gestione delle risorse e le possibili strategie di adattamento. Le proiezioni del clima indicano un aumento della temperatura media, un'accresciuta domanda evaporativa (ET_0) e una modificazione della stagionalità delle precipitazioni: inverno più piovoso in alcune aree, riduzioni primaverili-estive e precipitazioni più concentrate in eventi intensi. La fusione precoce delle nevicate alpine ridurrà la disponibilità di acqua durante l'estate, periodo in cui la domanda irrigua è massima. Questi cambiamenti accentueranno la competizione tra usi (agricoltura, industria, approvvigionamento urbano, ambiente) e porranno limiti sempre più stringenti alla diffusione di colture ad alto consumo idrico, in particolare nelle aree già caratterizzate da elevata intensità irrigua.

Con l'aumento delle temperature, alcune colture tipiche delle basse pianure potrebbero spostarsi verso altitudini più elevate o verso microaree con condizioni pedo-climatiche favorevoli. Questo fenomeno potrebbe comportare una pressione sulla disponibilità di terre adatte in zone di collina e pre-alpine, nonché conflitti d'uso tra agricoltura e conservazione ambientale. L'uso di serre, tunnel e sistemi di micro-irrigazione potrebbe aumentare sensibilmente dove giustificato economicamente. Tali sistemi permettono di ridurre le perdite per evaporazione, migliorare l'efficienza di distribuzione e permettere coltivazioni fuori stagione che compensino cali produttivi in campo aperto. Le scelte dei produttori saranno fortemente influenzate da prezzi delle commodity, sussidi e misure agro-ambientali europee e nazionali, nonché da incentivi per l'efficienza idrica. Investimenti in infrastrutture (serbatoi, canali rivisti, sistemi di accumulo) e in tecnologie irrigue (goccio, sensoristica, gestione basata su dati climatici) possono mitigare alcune pressioni e consentire il mantenimento di colture irrigue in aree chiave. Tuttavia, la sostenibilità economica di tali transizioni dipenderà dalla capacità di finanziare l'adeguamento e dall'accesso alla conoscenza tecnica. La

ristrutturazione colturale comporterà impatti sulla biodiversità, sul paesaggio e sulla sicurezza alimentare locale. La riduzione del riso può alterare habitat umidi e specie associate; la diffusione di colture intensive in serra può aumentare il consumo energetico. Socialmente, i mutamenti potrebbero influire sui redditi agricoli e sulle comunità rurali: è quindi essenziale accompagnare le transizioni con politiche di formazione, incentivi alla diversificazione e strumenti di gestione del rischio.

5.2 Dinamiche

Questa sezione ha lo scopo di consolidare dati di stima e dinamiche delle superfici future delle coltivazioni agrarie nel bacino del Po, utilizzando un dataset di proiezioni generate mediante G-RDEM (Goebel et al, 2025), un modello di equilibrio generale computabile ricorsivo-dinamico globale, progettato per catturare i cambiamenti strutturali di lungo periodo sia dal lato dell'offerta sia della domanda (Britz and Roson 2019). G-RDEM simula dinamiche economiche e di uso del suolo direttamente a livello NUTS2 (regionale), eliminando la necessità di accoppiamenti multi-modello e di downscaling post-modello impiegati nelle quantificazioni di cambi di uso del suolo basate su SSP esistenti con informazioni a livello nazionale. Il framework di modellizzazione è open-source, riproducibile e trasparente, e consente ai ricercatori di estendere o integrare le proiezioni. Descrivendo le transizioni di uso del suolo attraverso scenari socio-economici, il dataset supporta ricerche che richiedono proiezioni LULC dettagliate come input, per esempio in studi di impatto climatico o di conservazione della biodiversità. Le proiezioni sono particolarmente utili per ricercatori e decisori che lavorano su valutazioni economicamente fondate dei cambiamenti a lungo termine dei sistemi territoriali in Europa. Questo dataset fornisce proiezioni di uso del suolo e copertura del suolo dal 2020 al 2050, coprendo un intervallo di incertezza coerente con i cinque scenari SSP (Shared Socio-Economic Pathways). Per l'Europa, i risultati sono riportati sia a livello nazionale sia al livello subnazionale delle regioni amministrative NUTS2. Il dataset distingue otto tipi di copertura del suolo (es. terre coltivate, pascoli, macchia) e 65 corrispondenti categorie di uso del suolo (es. colture specifiche) ed è disponibile a intervalli biennali e quinquennali. Nello specifico vengono presentati i risultati per Piemonte, Lombardia ed Emilia-Romagna per le principali colture di rilievo standardizzati rispetto all'anno 2020 (Tabella 1-4)

Il riso, concentrato in Lombardia e Piemonte, rappresenta la coltura con il maggiore consumo idrico pro capite. In scenari di scarsità estiva e con misure di gestione delle risorse più restrittive, è probabile una contrazione delle superfici irrigate

destinate al riso, con conversioni verso colture meno idroesigenti o verso pratiche colturali a più alto valore aggiunto ma minore impronta idrica. Anche le colture foraggere ad alta irrigazione potrebbero subire riduzioni, soprattutto nelle aree dove l'approvvigionamento idrico diventa critico. Mais e frumento, pur avendo fabbisogni irrigui significativi, potrebbero mantenere o estendere la loro presenza grazie a pratiche irrigue più efficienti e a varietà adattate al caldo. Colture estensive a minore richiesta idrica (es. alcune oleaginose adattate, colture proteiche) potrebbero aumentare la loro quota relativa nel mosaico colturale, soprattutto se supportate da politiche di mercato e incentivi. Per rispondere alla crescente scarsità idrica e alla pressione economica, si prevede una transizione verso colture a maggiore valore aggiunto per unità di acqua applicata (orticole di nicchia, frutti in serra con impianti efficienti, viticoltura di qualità). La viticoltura, specie nelle aree collinari, può espandersi in termini qualitativi più che quantitativi, adottando portinnesti, gestione del suolo e pratiche di difesa mirata per contenere il consumo idrico.

Piemonte								
	Scenario	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Totale	SSP1	100.0	98.2	91.0	89.7	88.9	87.5	86.1
	SSP2	100.0	99.1	97.0	94.9	92.5	89.8	86.6
	SSP3	100.0	99.3	97.0	95.4	93.7	92.0	90.4
	SSP4	100.0	98.2	91.1	90.0	89.2	88.1	87.0
	SSP5	100.0	98.9	95.4	93.5	91.4	89.2	87.1
Mais	SSP1	100.0	94.6	92.4	92.1	90.9	89.3	87.6
	SSP2	100.0	95.2	92.3	91.8	91.9	92.4	92.3
	SSP3	100.0	95.1	86.7	84.4	83.9	83.4	82.8
	SSP4	100.0	94.4	90.7	89.6	87.7	85.6	83.7
	SSP5	100.0	94.0	83.4	78.5	75.9	75.2	75.0
Vite	SSP1	100.0	99.1	95.9	95.0	94.2	93.4	92.3
	SSP2	100.0	98.7	95.3	92.1	89.4	87.4	85.5
	SSP3	100.0	98.5	94.4	90.0	86.1	82.8	79.9
	SSP4	100.0	99.1	94.9	93.6	92.6	91.7	90.6
	SSP5	100.0	98.3	93.9	89.8	86.2	83.7	82.1
Grano	SSP1	100.0	97.8	86.0	82.9	80.5	77.3	74.3
	SSP2	100.0	99.2	97.4	94.4	90.2	84.5	78.1
	SSP3	100.0	100.2	101.1	101.1	101.1	101.4	102.0
	SSP4	100.0	96.5	84.2	81.2	78.9	76.1	73.7
	SSP5	100.0	99.9	100.8	100.6	97.4	93.4	91.2
Barbabetola	SSP1	100.0	100.5	92.2	88.2	85.1	81.2	77.2
	SSP2	100.0	100.8	97.5	91.2	84.6	77.7	70.9
	SSP3	100.0	102.4	103.4	102.6	100.1	96.1	91.1
	SSP4	100.0	101.9	96.9	94.8	92.7	89.2	85.3
	SSP5	100.0	101.4	98.2	93.2	86.9	78.9	71.3
Sola	SSP1	100.0	98.6	79.2	72.6	68.8	64.6	60.3
	SSP2	100.0	101.0	97.2	88.2	78.8	69.3	60.5
	SSP3	100.0	103.5	111.2	113.2	111.2	108.1	102.6
	SSP4	100.0	101.1	87.7	84.0	81.4	77.6	73.2
	SSP5	100.0	102.9	101.1	93.0	82.3	70.5	60.2
Riso	SSP1	100.0	99.1	89.0	86.1	83.6	80.4	77.1
	SSP2	100.0	100.2	96.7	93.1	88.6	83.5	77.4
	SSP3	100.0	100.4	96.0	93.2	90.7	88.5	86.6
	SSP4	100.0	100.3	92.0	90.2	88.0	84.9	81.8
	SSP5	100.0	99.7	93.2	91.8	89.1	86.6	83.4

Tabella 1. Trends della superficie agricola per singole colture di rilievo e totale (Piemonte). Le superfici sono state standardizzate (valore 100) all'anno di riferimento (2020).

Lombardia								
	Scenario	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Totale	SSP1	100.0	98.4	88.1	85.6	83.6	81.0	78.3
	SSP2	100.0	100.0	99.0	96.8	93.5	89.0	83.7
	SSP3	100.0	100.3	100.5	100.5	99.6	98.2	96.5
	SSP4	100.0	98.7	89.8	88.3	87.0	84.8	82.4
	SSP5	100.0	100.0	98.4	97.3	95.7	93.3	90.8
Mais	SSP1	100.0	94.0	90.0	88.5	86.2	83.1	79.8
	SSP2	100.0	94.7	91.6	90.5	89.8	88.8	87.0
	SSP3	100.0	94.7	86.4	84.0	83.6	83.1	82.4
	SSP4	100.0	93.8	88.6	86.6	83.9	80.6	77.5
	SSP5	100.0	93.5	82.8	78.0	75.7	75.0	74.9
Vite	SSP1	100.0	98.9	94.5	93.0	91.8	90.4	88.7
	SSP2	100.0	98.8	95.8	92.6	89.6	87.0	84.5
	SSP3	100.0	98.7	95.5	92.1	89.0	86.4	84.0
	SSP4	100.0	99.1	94.2	92.7	91.6	90.2	88.8
	SSP5	100.0	98.5	94.5	90.9	87.6	85.2	83.7
Grano	SSP1	100.0	96.5	83.0	79.1	75.8	71.6	67.5
	SSP2	100.0	98.0	95.1	91.2	86.2	79.9	72.9
	SSP3	100.0	99.2	99.1	98.5	98.1	98.0	98.1
	SSP4	100.0	95.3	81.4	77.6	74.6	71.0	67.6
	SSP5	100.0	98.6	97.9	96.7	93.0	89.1	87.2
Barbabetola	SSP1	100.0	99.0	87.8	82.8	79.0	74.3	69.6
	SSP2	100.0	99.5	94.6	87.0	79.7	72.2	65.1
	SSP3	100.0	101.3	101.0	99.2	95.9	91.7	86.5
	SSP4	100.0	100.5	92.6	89.2	86.2	81.9	77.3
	SSP5	100.0	100.1	95.0	88.7	81.8	74.1	67.5
Soia	SSP1	100.0	96.8	75.7	68.4	64.0	59.1	54.3
	SSP2	100.0	99.3	94.0	84.5	75.0	65.5	56.6
	SSP3	100.0	102.0	107.3	107.9	105.1	101.6	96.1
	SSP4	100.0	99.3	83.6	78.8	75.4	71.0	66.1
	SSP5	100.0	101.1	96.9	88.4	78.1	67.4	58.1
Riso	SSP1	100.0	98.3	85.9	81.9	78.5	74.2	69.9
	SSP2	100.0	99.6	95.9	92.0	87.0	81.0	73.7
	SSP3	100.0	100.0	95.7	93.2	91.0	89.0	87.1
	SSP4	100.0	99.6	89.4	87.0	84.2	80.1	76.1
	SSP5	100.0	99.2	92.4	91.0	88.7	86.7	83.9

Tabella 2. Trends della superficie agricola per singole colture di rilievo e totale (Lombardia). Le superfici sono state standardizzate (valore 100) all'anno di riferimento (2020).

Emilia-Romagna								
	Scenario	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Totale	SSP1	100.0	99.0	92.8	92.3	92.1	91.4	90.5
	SSP2	100.0	99.7	98.3	96.5	94.1	91.3	88.1
	SSP3	100.0	99.9	98.6	97.4	95.9	94.2	92.5
	SSP4	100.0	98.9	92.3	91.8	91.7	91.2	90.5
	SSP5	100.0	99.5	97.1	95.3	93.1	90.6	88.5
Mais	SSP1	100.0	95.1	93.8	94.2	93.6	92.5	91.3
	SSP2	100.0	95.7	93.4	93.4	94.0	94.6	94.8
	SSP3	100.0	95.5	87.5	85.5	85.4	85.0	84.4
	SSP4	100.0	95.0	92.3	91.8	90.5	88.6	86.9
	SSP5	100.0	94.4	84.2	79.6	77.9	77.7	77.6
Vite	SSP1	100.0	99.6	97.4	97.1	96.9	96.6	95.9
	SSP2	100.0	99.2	96.4	93.5	91.0	89.2	87.6
	SSP3	100.0	98.9	95.5	91.7	88.4	85.5	82.9
	SSP4	100.0	99.7	96.2	95.4	94.9	94.5	93.9
	SSP5	100.0	98.7	94.8	91.1	87.7	85.3	83.9
Grano	SSP1	100.0	97.9	87.1	84.7	82.8	80.2	77.6
	SSP2	100.0	99.2	97.9	95.4	91.6	86.3	80.3
	SSP3	100.0	100.2	101.6	102.3	102.8	103.4	104.0
	SSP4	100.0	96.7	85.5	83.1	81.3	79.0	76.9
	SSP5	100.0	99.9	100.9	100.8	98.0	94.2	92.2
Barbabietola	SSP1	100.0	100.5	93.7	90.4	87.7	84.3	80.7
	SSP2	100.0	100.7	97.6	92.0	86.0	79.7	73.4
	SSP3	100.0	102.2	102.6	102.0	99.7	95.8	91.0
	SSP4	100.0	101.9	98.1	96.4	94.6	91.6	88.2
	SSP5	100.0	101.0	97.4	92.6	86.8	79.4	72.3
Soia	SSP1	100.0	98.0	79.8	73.8	70.5	66.8	62.9
	SSP2	100.0	100.3	96.4	87.8	79.1	70.2	62.0
	SSP3	100.0	102.7	109.7	111.5	109.6	106.6	101.1
	SSP4	100.0	100.5	88.1	84.7	82.5	79.3	75.5
	SSP5	100.0	102.1	99.5	91.4	81.1	69.9	60.0
Riso	SSP1	100.0	99.6	91.7	90.0	88.4	86.2	83.5
	SSP2	100.0	100.3	97.2	94.0	90.1	85.8	80.6
	SSP3	100.0	100.4	96.0	93.1	90.4	87.7	85.2
	SSP4	100.0	100.6	93.7	92.6	91.3	89.1	86.9
	SSP5	100.0	99.6	93.3	91.6	88.9	86.4	83.5

Tabella 3. Trends della superficie agricola per singole colture di rilievo e totale (Emilia-Romagna). Le superfici sono state standardizzate (valore 100) all'anno di riferimento (2020).

Bacino Del Po (Piemonte + Lombardia + Emilia-Romagna)								
	Scenario	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Totale	SSP1	100.0	98.5	90.5	89.0	88.0	86.3	84.6
	SSP2	100.0	99.7	98.2	96.2	93.5	90.0	86.0
	SSP3	100.0	99.9	99.0	98.1	96.8	95.2	93.5
	SSP4	100.0	98.7	91.0	89.9	89.2	87.9	86.4
	SSP5	100.0	99.5	97.2	95.6	93.7	91.3	89.0
Mais	SSP1	100.0	94.5	91.9	91.3	89.9	87.8	85.7
	SSP2	100.0	95.1	92.4	91.8	91.7	91.6	91.0
	SSP3	100.0	95.0	86.8	84.6	84.2	83.7	83.1
	SSP4	100.0	94.3	90.3	89.1	87.0	84.6	82.2
	SSP5	100.0	93.9	83.4	78.6	76.4	75.8	75.7
Vite	SSP1	100.0	99.3	96.3	95.6	95.0	94.3	93.2
	SSP2	100.0	98.9	95.9	92.9	90.2	88.2	86.3
	SSP3	100.0	98.7	95.1	91.2	87.8	84.8	82.1
	SSP4	100.0	99.4	95.3	94.2	93.5	92.7	91.8
	SSP5	100.0	98.5	94.4	90.6	87.2	84.8	83.3
Grano	SSP1	100.0	97.4	85.6	82.5	80.0	76.8	73.6
	SSP2	100.0	98.8	96.9	93.8	89.6	83.9	77.5
	SSP3	100.0	99.9	100.7	100.8	100.9	101.2	101.7
	SSP4	100.0	96.2	83.9	80.9	78.6	75.8	73.2
	SSP5	100.0	99.5	99.9	99.5	96.3	92.4	90.4
Barbabietola	SSP1	100.0	100.0	91.4	87.4	84.2	80.3	76.2
	SSP2	100.0	100.3	96.6	90.1	83.6	76.7	70.1
	SSP3	100.0	101.9	102.3	101.2	98.5	94.5	89.5
	SSP4	100.0	101.4	96.0	93.7	91.3	87.8	83.9
	SSP5	100.0	100.8	96.8	91.5	85.1	77.5	70.4
Soia	SSP1	100.0	97.4	77.5	70.8	66.7	62.4	57.9
	SSP2	100.0	99.9	95.2	86.1	76.9	67.5	58.9
	SSP3	100.0	102.4	108.7	109.9	107.5	104.2	98.7
	SSP4	100.0	99.9	85.7	81.4	78.6	74.6	70.1
	SSP5	100.0	101.7	98.4	90.0	79.7	68.7	59.0
Riso	SSP1	100.0	98.8	88.1	84.9	82.1	78.6	75.0
	SSP2	100.0	100.0	96.4	92.8	88.2	82.8	76.3
	SSP3	100.0	100.3	95.9	93.2	90.8	88.6	86.6
	SSP4	100.0	100.0	91.2	89.2	86.9	83.5	80.1
	SSP5	100.0	99.5	92.9	91.5	88.9	86.6	83.6

Tabella 3. Trends della superficie agricola per singole colture di rilievo e totale (Aggregate: Piemonte + Lombardia + Emilia-Romagna). Le superfici sono state standardizzate (valore 100) all'anno di riferimento (2020).

6 Impatto dei cambiamenti climatici su turismo

6.1 Introduzione

È ormai accertato che il turismo ha un impatto significativo sulle risorse idriche locali, con un effetto amplificato nei contesti in cui il turismo presenta forti fluttuazioni stagionali e si concentra nei mesi secchi dell'anno, come nel bacino del Mediterraneo (Deyà Tortella & Tirado, 2011; Mazzoni et al., 2022). A causa di questa marcata stagionalità, il turismo rappresenta la minaccia maggiore per la sicurezza idrica durante l'alta stagione estiva, quando possono sorgere conflitti di allocazione con altri settori che presentano picchi di domanda idrica sovrapposti, come l'agricoltura e la produzione di energia (Casals Miralles et al., 2023). Sebbene gli impatti maggiori si osservino di norma a scala locale e nei bacini minori, il turismo può comunque influire significativamente sulle risorse idriche di bacini fluviali più ampi quando contribuisce a un più ampio nesso di fattori di stress (Collins et al., 2009). Pertanto, qui analizziamo l'impatto del turismo sul consumo idrico per le tre principali regioni che ricoprono il territorio del bacino del Po, ossia Emilia-Romagna, Lombardia e Piemonte. L'analisi utilizza un modello di regressione per stimare i futuri arrivi turistici in ciascuna regione sulla base di dati storici. Utilizziamo lo stesso modello sviluppato da Matei et al. (2023), come mostrato nell'equazione 6:

$$\text{Eq. 6} \quad \ln(BN) = \alpha + \beta_1 \ln(TCI) + \beta_2 \ln(GDP) + \beta_3 \ln(HICP) + \varepsilon$$

In questo modello, il numero di pernottamenti turistici (BN) è correlato al Prodotto Interno Lordo regionale (PIL), all'Indice Armonizzato dei Prezzi al Consumo (HICP) e all'Indice Climatico Turistico (TCI). Quest'ultimo è utilizzato per valutare l'idoneità delle condizioni climatiche alle attività turistiche. Integra diverse variabili meteorologiche, come temperatura, umidità, ore di luce solare, velocità del vento e precipitazione (Mieczkowski, 1985).

Un'equazione utilizzata per il calcolo del TCI è descritta in Eq. 7:

$$\text{Eq. 7} \quad TCI = 8 \cdot CID + 2 \cdot CIA + 4 \cdot R + 4 \cdot S + 2 \cdot W$$

dove CID rappresenta l'indice di comfort diurno, CIA è l'indice di comfort giornaliero, R è la precipitazione misurata in mm di pioggia, S sono le ore giornaliere di luce solare e W è la velocità del vento espressa in m s^{-1} .

Come in Matei et al. (2023), il modello è validato sui dati storici per stimare i coefficienti di regressione (β), l'intercetta (α) e i residui (ε) necessari per l'estrapolazione delle condizioni future. Seguendo la metodologia di classificazione del turismo illustrata in Matei et al. (2023), le tre regioni hanno una categorizzazione turistica "mista", ossia beneficiano di un insieme di flussi turistici urbani, rurali e naturali (costieri + montani).

I dati storici usati per la validazione coprono il periodo 2000–2019 e includono: il PIL mensile regionale (EUROSTAT, 2026), l'HICP mensile nazionale assumendo che non vari tra le regioni considerate (EUROSTAT, 2026) e il TCI regionale (Garcia-Leon et al., 2023) come variabili indipendenti; il numero mensile di pernottamenti turistici (EUROSTAT, 2026) come variabile dipendente. Una volta stimati i coefficienti del modello, i futuri pernottamenti sono calcolati usando le proiezioni del TCI per gli scenari di riscaldamento globale RCP4.5 e RCP8.5 (Garcia-Leon et al., 2023) per i periodi 2030–2050 e 2060–2080. In questo modo è possibile stimare la variazione della presenza turistica in base alle condizioni climatiche future.

L'impatto del turismo sulle risorse idriche è quindi stimato moltiplicando il numero di pernottamenti per il consumo idrico giornaliero medio dei turisti. Si stima che i turisti consumino da 2 a 5 volte più acqua rispetto alla popolazione residente, con valori variabili a livello regionale (Collins et al., 2009). In questo lavoro si è assunto un fattore di 3, applicato al consumo medio d'acqua per persona nelle singole regioni misurato da ISTAT, ottenendo 1176 l/persona/giorno in Lombardia, 1189 in Piemonte e 897 in Emilia-Romagna.

6.2 Dinamiche

Dall'analisi risulta che i consumi idrici turistici annuali rimarranno pressoché invariati nelle tre regioni, con un lieve aumento registrato solamente in Emilia-Romagna. In tutte le regioni si prevede un cambiamento nella stagionalità dei consumi, con una riduzione nei mesi estivi centrali ed un aumento a Settembre ed Ottobre. In Piemonte e Lombardia questi due trend mensili opposti si controbilanciano facendo sì che i consumi annuali restino praticamente invariati. Questo avviene in entrambi i periodi futuri considerati, con differenze minime anche tra i due scenari di cambiamento climatico considerati (RCP4.5 e RCP8.5).

In Emilia-Romagna invece si registra un cambiamento più marcato della stagionalità dei consumi. Nel periodo 2030-2050, si prevede un generale aumento dei consumi annuali dovuto ad una crescita significativa nei mesi autunnali. Nel periodo 2060-2080 invece è previsto un calo dei consumi annuali rispetto al periodo precedente, soprattutto nello scenario RCP8.5. Questa diminuzione è data principalmente dalla riduzione dei consumi nei mesi estivi, che rappresentano storicamente il periodo di maggiore affluenza per la regione. Questa diminuzione è dovuta all'abbassamento dell'indice di comfort climatico turistico (TCI) nello scenario ad alte emissioni (RCP8.5) a causa delle temperature elevate. In generale, l'analisi suggerisce che i flussi turistici futuri non comporteranno un aumento dello stress idrico delle tre regioni studiate, con i flussi annuali e mensili che rimarranno vicini ai valori attuali o in calo.

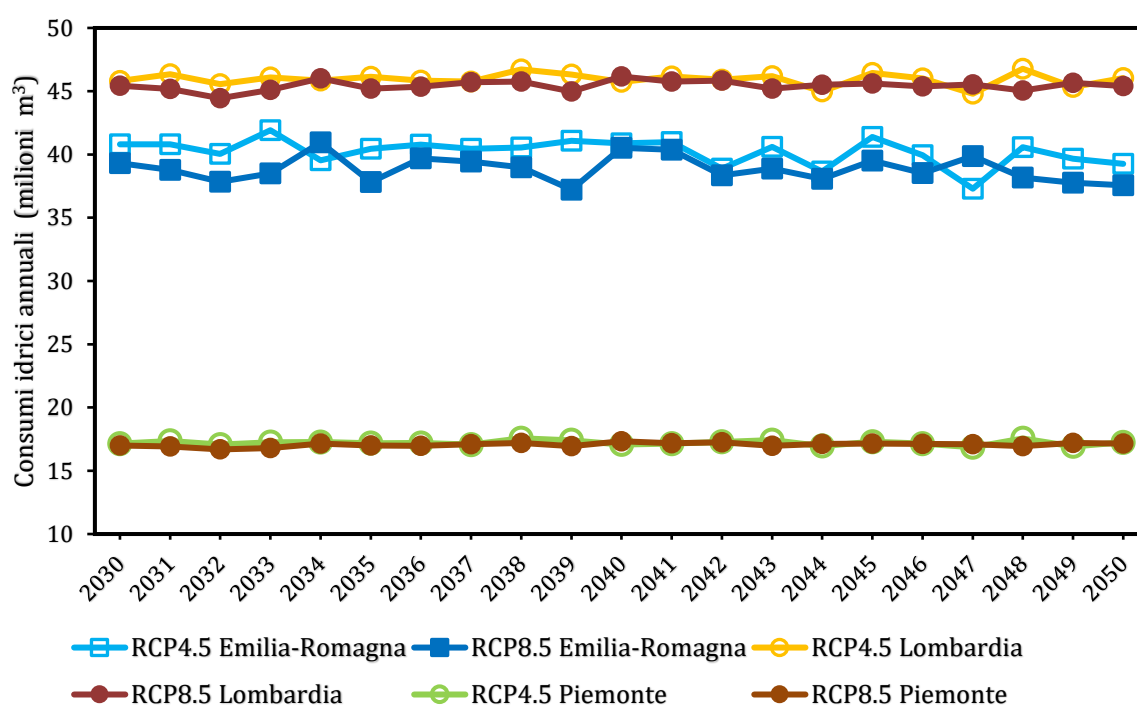


Figura 5. Consumi idrici turistici annuali nelle tre regioni per i due scenari di cambiamento climatico considerati (RCP4.5 e RCP8.5) per il periodo 2030-2050.

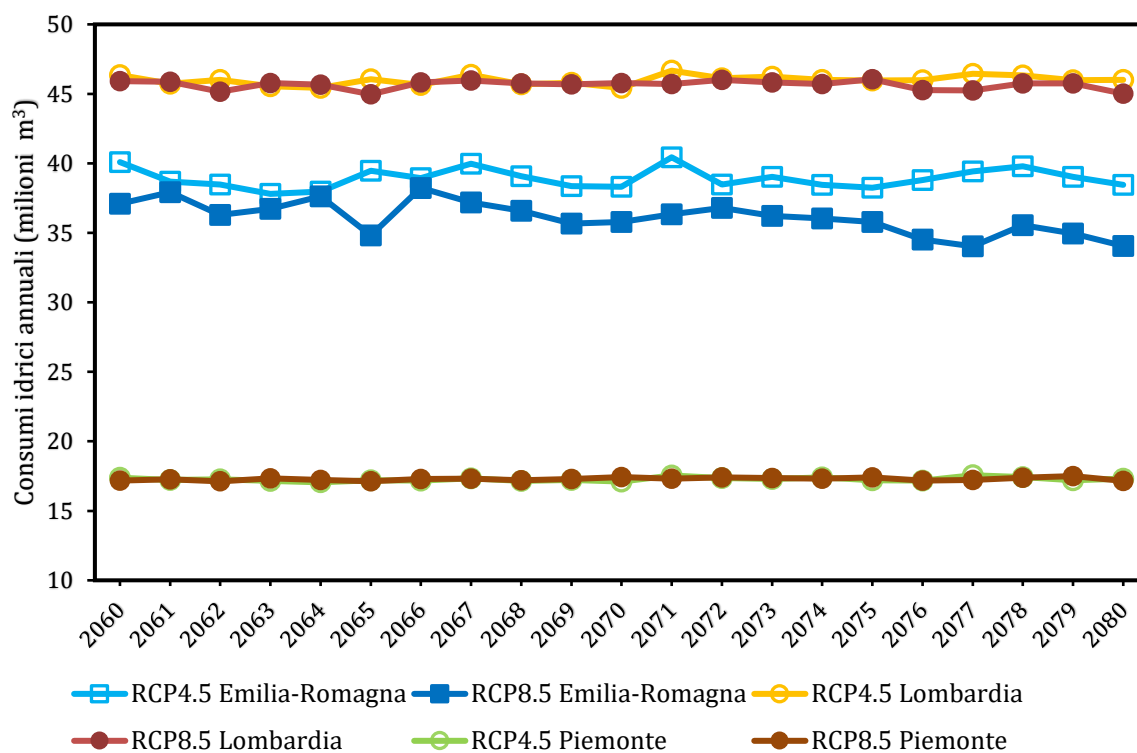


Figura 6. Consumi idrici turistici annuali nelle tre regioni per i due scenari di cambiamento climatico considerati (RCP4.5 e RCP8.5) per il periodo 2060-2080.

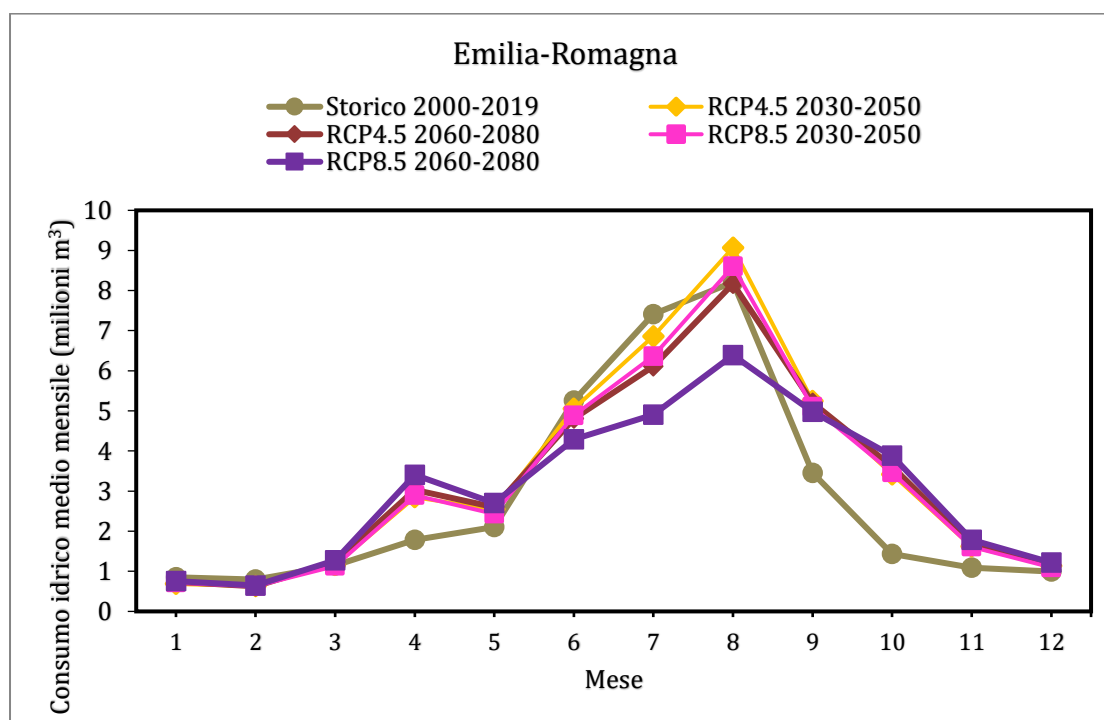


Figura 7. Consumi idrici mensili medi dovuti al turismo in Emilia-Romagna nei periodi 2030-2050 e 2060-2080 per i due scenari di cambiamento climatico considerati (RCP4.5 e RCP8.5).

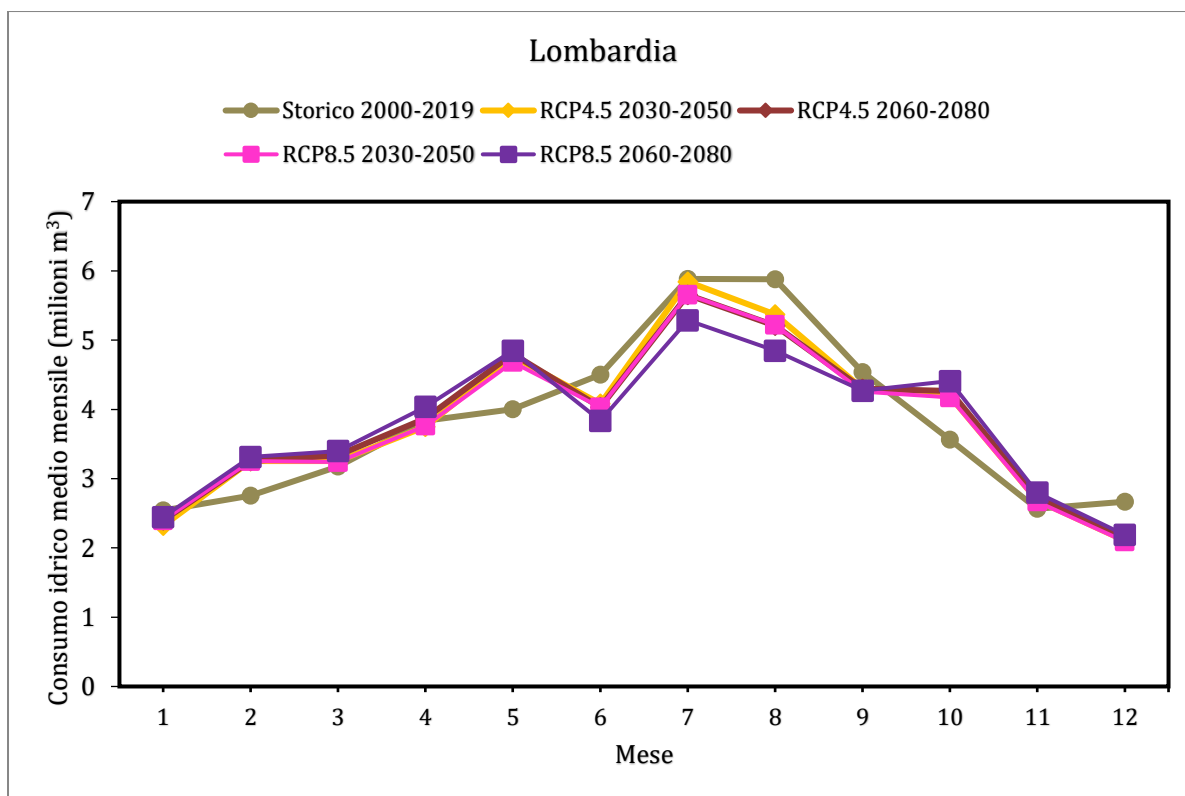


Figura 8. Consumi idrici mensili medi dovuti al turismo in Lombardia nei periodi 2030-2050 e 2060-2080 per i due scenari di cambiamento climatico considerati (RCP4.5 e RCP8.5).

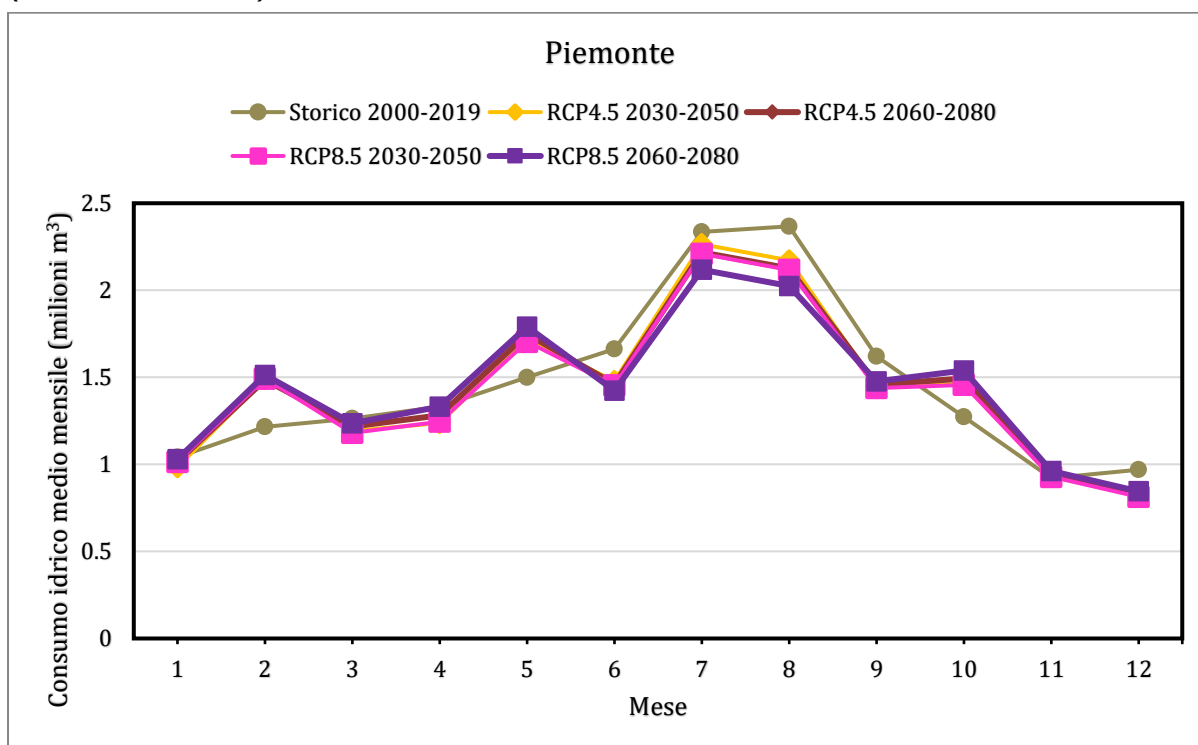


Figura 9. Consumi idrici mensili medi dovuti al turismo in Piemonte nei periodi 2030-2050 e 2060-2080 per i due scenari di cambiamento climatico considerati (RCP4.5 e RCP8.5).

7 Conclusioni

Il deliverable 5.2 mette in luce come il cambiamento climatico stia modificando in modo significativo il bilancio idrico e le esigenze irrigue nel Distretto del Po, con impatti che tenderanno ad aggravarsi verso metà secolo soprattutto in scenari ad alte emissioni. L'aumento della domanda evaporativa atmosferica insieme allo spostamento stagionale dei deflussi genera uno sfasamento critico tra picco della domanda irrigua estiva e offerta d'acqua disponibile, rendendo il sistema estremamente vulnerabile a eventi di siccità anche di breve durata. Questa pressione si concentra nelle aree già più intensive (Emilia-Romagna e Lombardia), mentre regioni con esposizione climatica più mitigata mostrano una sensibilità percentuale elevata, aumentando il rischio di conflitti d'uso.

La fertilizzazione da CO₂ attenua parzialmente i fabbisogni colturali, ma non è sufficiente a contrastare l'effetto dominante del riscaldamento. Inoltre, fattori socio-economici stagionali, come il turismo, possono amplificare ulteriormente i

picchi estivi di domanda, complicando la governance della risorsa idrica in un contesto di competizione crescente tra agricoltura, uso urbano, industria ed ecosistemi. La delocalizzazione di flussi turistici su mesi primaverili-autunnali può attenuare questi picchi stagionali ed andrebbe favorita nella governance.

Le proiezioni delle distribuzioni agricole prevedono una riduzione, che potrebbe allentare crisi idriche al prezzo di una riduzione della produzione agricola, con conseguenze che possono limitare sia la produttività finanziaria del settore agricolo nel complesso che la sicurezza alimentare.

Di fronte a questi risultati, è necessario spostare l'attenzione dalla sola disponibilità media di lungo periodo a una gestione dinamica e spazialmente esplicita dell'acqua, capace di contrastare lo sfasamento stagionale e di ridurre i rischi sistemici. Condizioni critiche previste dalle proiezioni climatiche – ad esempio prolungate siccità e contestuale aumento della domanda idrica da settori in competizione – costituiscono la base per la valutazione del rischio (task 5.2.4), entro la quale vengono sperimentate e validate pratiche gestionali e operative ottimali per mitigare i conflitti d'uso in un quadro Nexus (task 5.4.1), superare i rischi di rottura delle forniture idriche e massimizzare la disponibilità per i servizi essenziali prioritari

In ultima analisi, la resilienza del Distretto del Po dipenderà dalla capacità di combinare interventi tecnologici, infrastrutturali, agronomici e istituzionali che riducano la vulnerabilità stagionale e garantiscano la sicurezza idrica per usi prioritari, preservando al contempo la produttività agricola e la stabilità socio-economica del territorio.

8 Bibliografia e Sitografia

Aguilera, E., Díaz-Gaona, C., García-Laureano, R., Reyes-Palomo, C., Guzmán, G.I., Ortolani, L., Sánchez-Rodríguez, M., Rodríguez-Estévez, V., (2020) Agroecology for adaptation to climate change and resource depletion in the Mediterranean region. A review. *Agric Syst* 181, 102809. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2020.102809>

- Baris-Tuzemen O, Lyhagen J (2024) Revisiting the role of climate change on crop production: evidence from Mediterranean countries. *Environ Dev Sustain* 1–14. <https://doi.org/10.1007/S10668-024-04991-X/FIGURES/1>
- Batchelor, W.D., Basso, B., Paz, J.O., (2002) Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. *European Journal of Agronomy* 18, 141–158. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00101-6](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00101-6)
- Britz, W., & Roson, R. (2019) G-RDEM: A GTAP-Based Recursive Dynamic CGE Model for Long-Term Baseline Generation and Analysis. *Journal of Global Economic Analysis*, 4(1), 50-96. <https://doi.org/10.21642/JGEA.040103AF>
- Copernicus Climate Change Service (2023) European State of the Climate 2022, Full report: climate.copernicus.eu/ESOTC/2022. Copernicus Climate Change Service (C3S), 2023: European State of the Climate 2022, Summary: <https://doi.org/10.24381/gvaf-h066>
- Cornes, R., van der Schrier, G., van den Besselaar, E.J.M., Jones, P., (2018) An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Datasets, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 123. <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>
- Earth Explorer. URL <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Eurostat. https://circabc.europa.eu/webdav/CircaBC/ESTAT/regportraits/Information/itg2_geo.htm
- EUROSTAT (2026) HICP - monthly data (index). Disponibile:[https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/prc_hicp_midx/default/table?lang=en&category=prc.prc_hicp_t\(europa.eu\)](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/prc_hicp_midx/default/table?lang=en&category=prc.prc_hicp_t(europa.eu)). Visitato: 23/01/2026.
- EUROSTAT (2026) Nights spent at tourist accommodation establishments - monthly data. Disponibile:[https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/prc_hicp_midx/default/table?lang=en&category=prc.prc_hicp_t\(europa.eu\)](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/prc_hicp_midx/default/table?lang=en&category=prc.prc_hicp_t(europa.eu)). Visitato: 23/01/2026.
- Fader, M., Shi, S., Von Bloh, W., Bondeau, A., & Cramer, W. (2016) Mediterranean irrigation under climate change: more efficient irrigation needed to compensate for increases in irrigation water requirements. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 20, 953–973. <https://doi.org/10.5194/hess-20-953-2016>
- FAO Map. <https://data.apps.fao.org/map/catalog/srv/eng/catalog.search#/metadata/63ee4619-6a99-45e7-8078-eb1fd29ecf38>
- Funes, I., Savé, R., de Herralde, F., Biel, C., Pla, E., Pascual, D., Zabalza, J., Cantos, G., Borràs, G., Vayreda, J. and Aranda, X. (2021) Modeling impacts of climate change on the water needs and growing cycle of crops in three Mediterranean basins. *Agricultural Water Management*, 249, p.106797. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106797>
- Galindo, A., Collado-González, J., Griñán, I., Corell, M., Centeno, A., Martín-Palomo, M.J., Girón, I.F., Rodríguez, P., Cruz, Z.N., Memmi, H., Carbonell-Barrachina, A.A., Hernández, F., Torrecillas, A., Moriana, A., López-Pérez, D. (2018) Deficit irrigation and emerging fruit crops as a strategy to save water in Mediterranean semiarid agrosystems. *Agric Water Manag* 202, 311–324. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2017.08.015>

- Garcia Leon, D., Dosio, A., Matei, N., Batista E Silva, F., Ribeiro Barranco, R. and Ciscar Martinez, J.C. (2023) Tourism Climate Index (TCI): Historical (1981-2020) and projected (2020-2100) values, European Commission, JRC133503.
- Goebel T, Britz W. (2025) NUTS2 level dataset on land use and land cover projections for Europe under the shared socio-economic pathways through 2050. Data Brief. 17;63:112268. doi: 10.1016/j.dib.2025.112268.
- Hengl, T., Gupta, S., (2019a) Soil available water capacity in mm derived for 5 standard layers (0-10, 10-30, 30-60, 60-100 and 100-200 cm) at 250 m resolution. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.2629149>
- Hengl, T., Gupta, S. (2019b) Soil available water capacity in mm derived for 5 standard layers (0-10, 10-30, 30-60, 60-100 and 100-200 cm) at 250 m resolution. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.2629149> .
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2023) ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI: [10.24381/cds.adbb2d47](https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47)
- Huang, J., Ma, H., Su, W., Zhang, X., Huang, Y., Fan, J., Wu, W. (2015) Jointly Assimilating MODIS LAI and et Products into the SWAP Model for Winter Wheat Yield Estimation. IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens 8, 4060–4071. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2403135>
- IEmed, (2021) <https://www.iemed.org/wp-content/uploads/2021/01/The-Economic-Impacts-of-Climate-Change-in-the-Mediterranean.pdf>
- Inter Sectoral Impact Model Intercomparison Project. <https://www.isimip.org/gettingstarted/input-data-bias-adjustment/details/30/>.
- IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.
- IPCC (2022) Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844
- IPCC (2023) Summary for Policymakers. In: 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 [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- ISPRA. ISPRA, <https://www.isprambiente.gov.it/files2023/area-stampa/comunicati-stampa/comunicato-clima-risorsa-idrica.pdf>.
- ISTAT (2010) <http://dati.istat.it/Index.aspx?QueryId=12410&lang=en> (accessed 3.27.23).
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., Ritchie, J.T. (2003) The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18, 235–265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
- Jung, M., Reichstein, M., Ciais, P., Seneviratne, S.I., Sheffield, J., Goulden, M.L., Bonan, G., Cescatti, A., Chen, J., De Jeu, R., Dolman, A.J., Eugster, W., Gerten, D., Gianelle, D., Gobron, N., Heinke, J., Kimball, J., Law, B.E., Montagnani, L., Mu, Q., Mueller, B., Oleson, K., Papale, D., Richardson, A.D., Rouspard, O., Running, S., Tomelleri, E., Viovy, N., Weber, U., Williams, C., Wood, E., Zaehle, S., Zhang, K. (2010) Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature* 2010 467:7318 467, 951–954. <https://doi.org/10.1038/nature09396>
- Lagacherie, P., Álvaro-Fuentes, J., Annabi, M., Bernoux, M., Bouarfa, S., Douaoui, A., Grünberger, O., Hammani, A., Montanarella, L., Mrabet, R., Sabir, M., Raclot, D. (2018) Managing Mediterranean soil resources under global change: expected trends and mitigation strategies 18, 663–675. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1239-9>
- Lionello P, Scarascia L (2018) The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming. *Regional Environmental Change*, 18 (5), 1481-1493. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1290-1>
- Masia, S., Sušnik, J., Marras, S., Mereu, S., Spano, D. and Trabucco, A. (2018) Impact of Climate Change on Irrigated Agriculture in Sardinia region. *EPiC Series in Engineering*, 3, pp.1332-1339. <https://doi.org/10.3390/w10020209>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Pean, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekci, O., Yu, R. and Zhou, B., eds. and Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021) IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Open Access. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2391 pp. DOI 10.1017/9781009157896. McCown, R.L., Hammer, G.L., Hargreaves, J.N.G., Holzworth, D.P., Freebairn, D.M., 1996. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agric Syst* 50, 255–271. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(94\)00055-V](https://doi.org/10.1016/0308-521X(94)00055-V)

- Matei, N. A., García-León, D., Dosio, A., e Silva, F. B., Barranco, R. R., & Ciscar, J.-C. (2023) Regional impact of climate change on European tourism demand. Publications Office of the European Union Luxembourg.
- Mazzoni, F., Marsili, V., Alvisi, S., & Franchini, M. (2022) Exploring the impacts of tourism and weather on water consumption at different spatiotemporal scales: evidence from a coastal area on the Adriatic Sea (northern Italy). *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 2(2), 025005. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac611f>
- MedECC (2020) Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current Situation and Risks for the Future. First Mediterranean Assessment Report [Cramer, W., Guiot, J., Marini, K. (eds.)] Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/MAP, Marseille, France, 632pp, ISBN 978-2-9577416-0-1, doi: 10.5281/zenodo.4768833
- Mieczkowski, Z. (1985) The tourism climatic index: a method of evaluating world climates for tourism. *Canadian Geographies / Géographies Canadiennes*, 29(3), 220–233. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1541-0064.1985.tb00365.x>
- Montsant, A., Baena, O., Bernárdez, L. and Puig, J., (2021) Modelling the impacts of climate change on potential cultivation area and water deficit in five Mediterranean crops. DOI: <https://doi.org/10.5424/sjar/2021192-17112>
- Nam, W.-H.H.J.K.-S. (2018) Reevaluation of Design Frequency of Drought and Water Supply Safety for Agricultural Reservoirs under Changing Climate and Farming Methods in Paddy Field. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 60, 121–131. <https://doi.org/10.5389/KSAE.2018.60.1.121>
- Olesen, J.E., Hansen, P.K., Berntsen, J., Christensen, S. (2004) Simulation of above-ground suppression of competing species and competition tolerance in winter wheat varieties. *Field Crops Res* 89, 263–280. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2004.02.005>
- Palosuo, T., Kersebaum, K.C., Angulo, C., Hlavinka, P., Moriondo, M., Olesen, J.E., Patil, R.H., Ruget, F., Rumbaur, C., Takáč, J., Trnka, M., Bindi, M., Çaldağ, B., Ewert, F., Ferrise, R., Mirschel, W., Şaylan, L., Šiška, B., Rötter, R. (2011) Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. *European Journal of Agronomy* 35, 103–114. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2011.05.001>
- Ritchie, J.T. and Otter, S. (1985) Description and Performance of CERES-Wheat A User-Oriented Wheat Yield Model. In ARS Wheat Yield Project. ARS-38. Natl Tech Info Serv, Spring-Field, Missouri, 159-175. - References - Scientific Research Publishing [WWW Document], n.d.
- Saadi, S., Todorovic, M., Tanasijevic, L., Pereira, L.S., Pizzigalli, C. and Lionello, P., (2015) Climate change and Mediterranean agriculture: Impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield. *Agricultural water management*, 147, pp.103-115. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.008>

- Saretto, F., Roy, B., Encarnação Coelho, R., Reder, A., Fedele, G., Oakes, R., Brandimarte, L., Capela Lourenço, T. (2024) Impacts of Climate Change and Adaptation Strategies for Rainfed Barley Production in the Almería Province, Spain. *Atmosphere*, 15(5), p.606. <https://doi.org/10.3390/atmos15050606>
- Savé, R., De Herralde, F., Aranda, X., Pla, E., Pascual, D., Funes, I. and Biel, C. (2012) Potential changes in irrigation requirements and phenology of maize, apple trees and alfalfa under global change conditions in Fluvia watershed during XXIst century: Results from a modeling approximation to watershed-level water balance. *Agricultural Water Management*, 114, pp.78-87. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.07.006>
- Snyder, R.L., Geng, S., Orang, M. and Sarreshteh, S. (2012) Calculation and simulation of evapotranspiration of applied water. *Journal of Integrative Agriculture*, 11(3), pp.489-501. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(12\)60035-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(12)60035-5)
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., Fereres, E. (2009) AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agron J* 101, 426–437. <https://doi.org/10.2134/AGRONJ2008.0139S>
- Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R. (2003) CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18, 289–307. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00109-0](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00109-0)
- Tanasijevec, L., Todorovic, M., Pereira, L.S., Pizzigalli, C. and Lionello, P. (2014) Impacts of climate change on olive crop evapotranspiration and irrigation requirements in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 144, pp.54-68. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.019>
- Tramblay, Y., Koutroulis, A., Samaniego, L., Vicente-Serrano, S.M., Volaire, F., Boone, A., Le Page, M., Llasat, M.C., Albergel, C., Burak, S., Cailleret, M. (2020) Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios. *Earth-Science Reviews*, 210, p.103348.
- van Diepen, C.A., Wolf, J., van Keulen, H. Rappoldt, C. (1989) WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use & Management* 5, 16-24. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1989.tb00755.x>
- Williams, J.R., Jones, C.A., Kiniry, J.R. Spanel, D.A. (1989) The EPIC crop growth model. *Transactions of the ASAE*, 32(2), pp.497-511. <https://doi.org/10.13031/2013.31032>