

Contents

Introduzione

Executive Summary.....	3
Capitolo 1: I cambiamenti climatici in Italia	12
1.1 Lo stato del clima attuale.....	12
1.2 Gli scenari climatici di lungo periodo	13
1.3 Le previsioni di medie ed estremi climatici in Italia ed Europa dal 2030 al 2050..	20
Capitolo 2: Contesto normativo: il quadro politico europeo e italiano in materia di clima	28
2.1 Il quadro politico europeo	28
2.2 Il quadro normativo dell'UE sulla finanza sostenibile per il rischio climatico	32
2.3 Rischio climatico e contesto normativo in Italia	40
Capitolo 3: Gli impatti futuri dei cambiamenti climatici e le loro conseguenze sociali ed economiche	47
3.1 Impatti economici settoriali	47
3.1.1 Infrastrutture	47
3.1.2 Acqua e produzioni agricole.....	51
3.1.3 Turismo.....	54
3.1.4 Produttività del lavoro	58
3.1.5 Impatti macro-finanziari	59
3.2 Impatti sociali	61
3.2.1 Disuguaglianze	61
3.2.2 Salute e mortalità	63
Capitolo 4: Le conseguenze macroeconomiche e finanziarie dei cambiamenti climatici	65
4.1 Le stime della letteratura scientifica sull'impatto del cambiamento climatico sulla crescita economica mondiale ed europea	65
4.2 Metodi e scenari utilizzati per le nuove stime per l'Italia e l'Europa	69
4.3 Gli impatti futuri sulla crescita economica italiana ed europea	73

4.4 Le conseguenze per la stabilità del sistema finanziario e per le finanze pubbliche	75
Capitolo 5: Opzioni politiche e tecnologiche per la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici.....	82
5.1 Strumenti di politica climatica per la mitigazione e l'adattamento	82
5.2 Tecnologie di mitigazione e adattamento	91
5.2.1 Efficienza energetica	91
5.2.2 Energie rinnovabili	92
5.2.3 Idrogeno verde	95
5.2.4 Cattura, utilizzo e stoccaggio della CO ₂ (CCUS)	97
5.2.5 Nature-based solutions.....	98
5.2.6 Infrastrutture resilienti.....	100
5.3 Investimenti e costi di mitigazione e adattamento	101
5.3.1 Investimenti per la mitigazione.....	101
5.3.2 Investimenti per l'adattamento	102
Glossario.....	106
Scenari e modelli climatici	106
Indicatori climatici e impatti fisici	107
Economia climatica e finanza	108
Normativa e politiche europee.....	108
Tecnologie e soluzioni per la transizione	109

Riferimenti Bibliografici

Rischio Climatico in Italia: Scenari, Costi e Opzioni di Risposta

Executive Summary

Questo rapporto fornisce un'analisi sistematica e integrata del rischio climatico per l'Italia, combinando proiezioni fisiche ad alta risoluzione, modelli macroeconomici e analisi di sostenibilità del debito, all'interno del contesto regolatorio e di policy nazionale ed europeo. L'obiettivo è offrire alle imprese e istituzioni un quadro di riferimento scientifico robusto per tradurre i cambiamenti climatici in scelte strategiche e operative concrete, e per meglio navigare il quadro di policy climatica in continua evoluzione.

Contesto climatico: l'Italia esposta ad un cambiamento senza precedenti

Con gli ultimi undici **anni più caldi della storia**, ed una media globale di riscaldamento negli ultimi due anni prossima a 1.5°C, i record climatici sono diventati un dato strutturale. L'anomalia media italiana e il record della temperatura superficiale dei mari italiani confermano una traiettoria che amplifica il segnale globale e condiziona direttamente esposizioni fisiche, catene di fornitura e profili assicurativi.

L'Europa si riscalda a un ritmo circa doppio rispetto alla media globale, e **l'Italia**, per posizione mediterranea, **è tra i Paesi a maggiore velocità di cambiamento**: le proiezioni multi-modello convergono su un aumento superiore a 2 gradi C (rispetto ai livelli pre-industriali) già entro dieci anni in entrambi gli scenari analizzati in questo rapporto. Nella Pianura Padana, il cuore manifatturiero e agroalimentare del Paese, gli incrementi raggiungono già oggi i 2-2,5 °C, circa il doppio della media globale.

I dataset ad alta risoluzione e l'ensemble multi-modello continentale delineano tre tendenze che **ridisegnano il regime idroclimatico** italiano verso una crescente esposizione a rischi climatici di ondate di calore, siccità e al contempo estremi di precipitazioni (Fig. 1).

- Intensificazione delle **ondate di calore**: la severità annua cresce di quattro-cinque volte già al 2030 rispetto al livello storico, con incrementi assoluti tra 30 e 58 giorni all'anno al 2050. A metà secolo, la severità mediana aumenta di circa 20 volte, con un range interregionale compreso tra circa 10x e 80x. Le aree alpine e prealpine mostrano le variazioni percentuali più elevate del continente.
- **Aridificazione** strutturale: l'indice SPEI, che integra deficit pluviometrico e domanda evapotraspirativa, colloca Sardegna e Basilicata tra le aree più critiche d'Europa al 2050, con indici di severità che quadruplicano rispetto alla baseline. Il fenomeno però non è confinato al Mezzogiorno, dato che Piemonte ed Emilia-Romagna mostrano incrementi di 3-3,5 volte, segnalando un'aridificazione che investe anche la base produttiva padana. I periodi di siccità possono raggiungere durate medie prossime ai due mesi consecutivi nel Mezzogiorno, con

conseguenze dirette su rese agricole, costi di approvvigionamento idrico industriale e stabilità delle concessioni irrigue.

- **Doppio stress idrico:** mentre la precipitazione ordinaria diminuisce (fino ad un terzo nel Sud Italia), la precipitazione estrema su cinque giorni consecutivi aumenta, con picchi che raddoppiano in Marche e Lombardia e sfiorano il raddoppio lungo il versante adriatico settentrionale (Friuli Venezia Giulia, Veneto). Il confronto tra gli indici di siccità rivela che il deficit idrico atteso dipende per larga parte dall'aumento della domanda evaporativa atmosferica, non solo dalla riduzione delle piogge. Aridificazione e intensificazione degli estremi coesistono e definiscono un doppio rischio idrologico senza precedenti nella storia climatica italiana. La robustezza di queste proiezioni è elevata: per la siccità, 18 regioni su 20 presentano un accordo tra modelli pari o superiore al 90%; fanno eccezione Trentino-Alto Adige e Lazio, dove la direzione del cambiamento resta incerta.

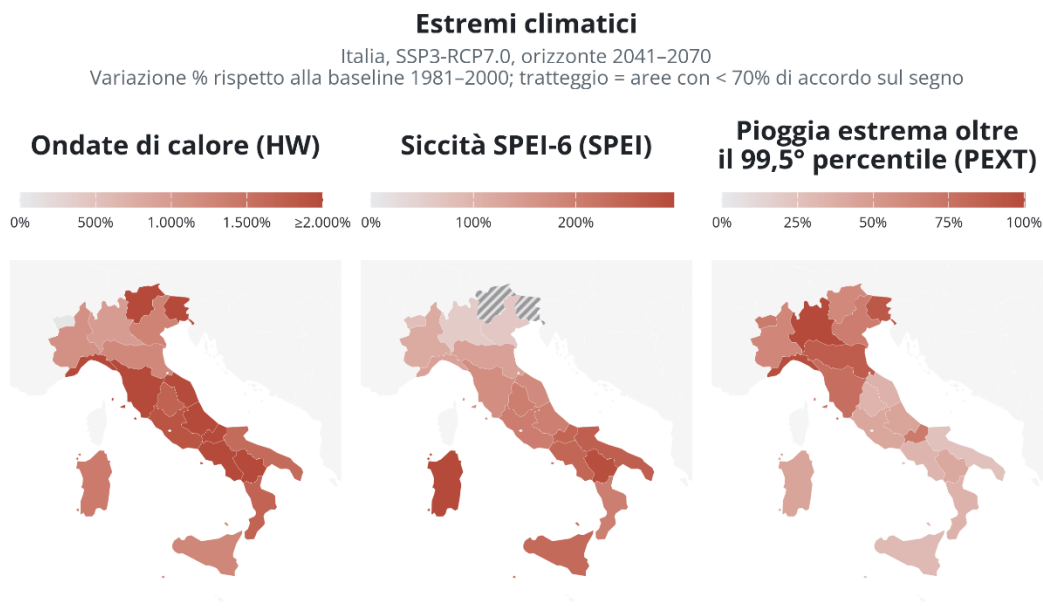


Figura 1: Variazione di tre estremi climatici rappresentativi del cambiamento climatico futuro in Italia

Le proiezioni ENEA e CMCC convergono nel collocare la parte preponderante del cambiamento nei prossimi vent'anni, cioè **all'interno dell'orizzonte di vita** utile delle infrastrutture, dei cicli di concessione e dei piani industriali **oggi in fase di approvazione**. Per decisori e investitori, la domanda rilevante non è più se il rischio climatico sia materiale, ma quale sia il costo dell'inazione rispetto a strategie di adattamento, riprezzamento degli asset esposti e ricalibrazione dei prodotti di trasferimento del rischio.

Quadro normativo e di policy: un'architettura in rapida evoluzione

L'Unione Europea ha costruito in meno di un decennio **un corpus normativo articolato** che definisce il quadro vincolante entro cui operano imprese e istituzioni italiane. I pilastri sono il Green Deal europeo (COM/2019/640), la European Climate Law (Reg. UE 2021/1119) -- che fissa la neutralità climatica al 2050 e una riduzione delle emissioni nette del 55% entro il 2030 rispetto al 1990 -- e il nuovo obiettivo intermedio al 2040 di -90% di emissioni nette (Reg. UE 2026/667, adottato l'11 marzo 2026). Il pacchetto strumentale è completato da EU ETS, Direttiva sull'Efficienza Energetica (EED 2023/1791) e Direttiva sulle Energie Rinnovabili (RED 2023/2413).

Tre dati illustrano la **rapida trasformazione del quadro regolatorio**. Il prezzo del carbonio ETS ha raggiunto un valore annuo medio di 73,43 EUR/tonnellata nel 2025, livello strutturalmente più elevato rispetto al decennio precedente (spesso sotto i 20 EUR/tonnellata), con effetti crescenti sulle decisioni di investimento. La Direttiva EED introduce l'obbligo di edifici pubblici a emissioni zero dal 2028 (esteso a tutti gli edifici dal 2030) e la ristrutturazione del 16% degli edifici non residenziali meno efficienti entro il 2030; il 75% del patrimonio edilizio europeo rimane ancora inefficiente. La RED fissa al 42,5% la quota di rinnovabili sui consumi finali UE entro il 2030.

Sul fronte della finanza sostenibile, Tassonomia UE, CSRD e SFDR costituiscono il triangolo regolatorio che orienta la riallocazione del capitale verso attività allineate agli obiettivi climatici. Le evidenze empiriche associano una maggiore qualità della disclosure ESG a una riduzione del costo del debito per le imprese, rendendo la conformità normativa un fattore di vantaggio competitivo oltre che un obbligo.

In Italia, Banca d'Italia e IVASS hanno avviato l'integrazione del rischio climatico nelle politiche prudenziali, mentre il Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC, 2023) definisce il quadro strategico nazionale. La Legge 30 dicembre 2023, n. 213 introduce l'obbligo assicurativo per le imprese contro le catastrofi naturali, prima misura strutturale volta a redistribuire un rischio che storicamente gravava quasi interamente sulle finanze pubbliche: storicamente il 95% delle perdite da disastri naturali in Italia risultava non assicurato, con un costo pubblico stimato in circa 4 miliardi di euro annui. Il rapporto identifica però criticità rilevanti nell'attuazione del PNACC a livello regionale e locale, dove la capacità amministrativa di tradurre gli indirizzi nazionali in interventi concreti rimane insufficiente.

Impatti economici settoriali: costi misurabili e crescenti

Il cambiamento climatico produce già oggi **perdite economiche misurabili** e, nei prossimi decenni, tenderà ad amplificarle attraverso canali diversi ma interconnessi:

danni fisici agli asset, interruzioni operative, perdita di produttività, scarsità idrica, minore attrattività turistica, aumento del rischio di credito e maggiori pressioni sui prezzi. Il rapporto quantifica i danni attesi in alcuni **settori chiave** dell'economia italiana:

Le infrastrutture rappresentano uno dei principali canali di trasmissione del rischio climatico all'economia italiana. Il danno non riguarda solo la distruzione fisica di strade, ferrovie, reti idriche, porti o sistemi energetici, ma anche l'interruzione dei servizi essenziali e gli effetti a cascata. Il rapporto mostra che i danni diretti annui alle infrastrutture potrebbero aumentare da circa 0,4 miliardi di euro nella baseline storica a circa 2 miliardi entro il 2030 e 5 miliardi entro il 2050. Considerando gli effetti indiretti -- interruzione dei servizi, impatti sulle catene di fornitura -- il costo totale stimato si colloca tra 11,5 e 18 miliardi l'anno al 2050. Cambia inoltre la composizione del rischio, con rischi di siccità e ondate di calore che si affiancano a quelli storicamente rilevanti dalle esondazioni fluviali.

Il **settore agricolo** è colpito anzitutto attraverso la riduzione e la maggiore instabilità della disponibilità idrica. Il riscaldamento aumenta l'evapotraspirazione, riduce la disponibilità di neve e riserve idriche naturali, accresce la competizione tra usi agricoli, civili, industriali ed energetici, e rende più difficile programmare l'irrigazione. In questo contesto, il rapporto segnala rischi rilevanti per colture strategiche e ad alto valore aggiunto, tra cui mais, riso, olivo, vite e produzioni ortofrutticole. Le stime disponibili indicano una possibile perdita del valore della produzione agricola pari a circa 12,5 miliardi di euro al 2050 in uno scenario compatibile con forte mitigazione, fino a 30 miliardi di euro in uno scenario ad alte emissioni. A questi impatti si aggiungono possibili deprezzamenti del valore fondiario, stimati fino al 16% nelle aree più esposte a fine secolo.

Il **turismo** vedrà una riallocazione strutturale tra stagioni, territori e segmenti di mercato. Anche se questa non comporterà un calo uniforme dei flussi turistici, comporterà costi elevati e distribuiti in modo diseguale. Si prevede una contrazione della domanda turistica fino all'8,9% negli scenari con forte aumento della temperatura media e perdite dirette stimate fino a 52 miliardi di euro, erosione della maggior parte delle spiagge italiane e crisi di sostenibilità del turismo montano legata alla riduzione del manto nevoso.

Produttività del lavoro. Le ondate di calore incidono direttamente sulla capacità di lavorare, soprattutto nei settori esposti all'aperto o in ambienti non climatizzati: edilizia, agricoltura, logistica, turismo, servizi pubblici e alcune attività manifatturiere. A scala europea, le proiezioni indicano perdite di produttività fino al 5% nell'Europa meridionale entro la seconda metà del secolo. Per l'Italia, dopo il terzo giorno consecutivo di ondata di calore, ogni giornata aggiuntiva con temperatura pari o superiore a 30°C si associa a una riduzione di 0,56 punti percentuali dei tassi di occupazione provinciali.

Gli impatti settoriali non restano confinati all'economia reale. Si **propagano al sistema finanziario** attraverso inflazione, rischio di credito, valore delle garanzie, solvibilità delle imprese e stabilità delle catene di fornitura. Gli scenari di stress test delle banche centrali evidenziano potenziali contrazioni del PIL fino al 4,7% anche nel breve periodo. Il rischio fisico si trasmette poi al credito: oltre un terzo dei prestiti bancari dell'area euro alle imprese non finanziarie è esposto a settori ad alto rischio di scarsità idrica, mentre una quota molto ampia delle esposizioni corporate dipende da servizi ecosistemici.

Impatti macroeconomici e fiscali: il rischio climatico come rischio sovrano

Questo **rapporto ha generato nuove stime** per gli impatti economici e finanziari del cambiamento climatico in Italia. Usando modelli macroeconomici e di stabilità del debito ed integrando le ultime stime di risposta del clima, abbiamo quantificato le conseguenze attese per l'economia italiana e per la stabilità finanziaria del paese.

Per la prima volta per l'Italia, questo rapporto evidenzia come il rischio climatico non sia solo un rischio settoriale, ma anche un rischio sovrano. I nostri modelli prevedono una progressiva **riduzione della crescita del PIL** rispetto a uno scenario senza danni climatici, compresa fra l'1,6%-6,0% a metà secolo a seconda dell'intensità degli impatti economici e dello scenario considerato (Figura 2). Nonostante le incertezze, queste stime rappresentano una perdita potenzialmente rilevante per un'economia caratterizzata da un basso tasso di crescita: **fino a circa il 15% della crescita economica annuale media 2025–2050 potrebbe essere perduta a causa dei rischi climatici nello scenario tendenziale SSP3-RCP7.0 (stima centrale con funzione di danno mediana; nello scenario di coda al 95° percentile della funzione di danno la perdita sale al 41%), mentre nello scenario socio-economico più favorevole SSP2-RCP4.5 la perdita di crescita resta contenuta al 6% (mediana) e fino al 16% al 95° percentile (cfr. Tabella 4.3)**. Le perdite, inoltre, si accumulano in modo non lineare e accelerano marcatamente nel tempo.

Questa erosione della crescita dell'economia reale si **propaga alle finanze pubbliche**. Questo è un tema particolarmente critico visto che il nostro paese parte da un livello iniziale di debito pubblico di quasi una volta e mezzo il PIL, con il record storico di oltre 3000 miliardi di euro. La nostra suite modellistica macro-finanziaria ha evidenziato come gli effetti di propagazione dei rischi climatici all'economia finanziaria avvengano attraverso **tre canali simultanei**.

Il primo è il **debito**. I rischi climatici di fatto annullerebbero gli sforzi di parziale risanamento dei conti pubblici simulato entro metà secolo in uno scenario a clima costante: invece di riportare il rapporto debito/PIL al 100% a metà secolo, la riduzione

della crescita dell'economia reale fa risalire il debito, riportandolo a quasi il livello attuale nel caso con danni climatici elevati.

A parte le mediane, le nostre analisi forniscono **un ensemble di scenari** che servono a **identificare** possibili crisi che emergono dagli **stati avversi** in cui crescita, saldo primario e costo del finanziamento si combinano in modo sfavorevole. Il dato più riassuntivo riguarda la probabilità che il debito superi il 200% del PIL, entrando in una zona di forte criticità fiscale. Già senza danni climatici, questa probabilità si attesta al 21-24%, riconfermando la fragilità di partenza significativa. Con danni climatici elevati, il rischio di criticità fiscale raddoppia (39-44%), e la traiettoria accelera visibilmente dopo il 2030 (Figura 2).

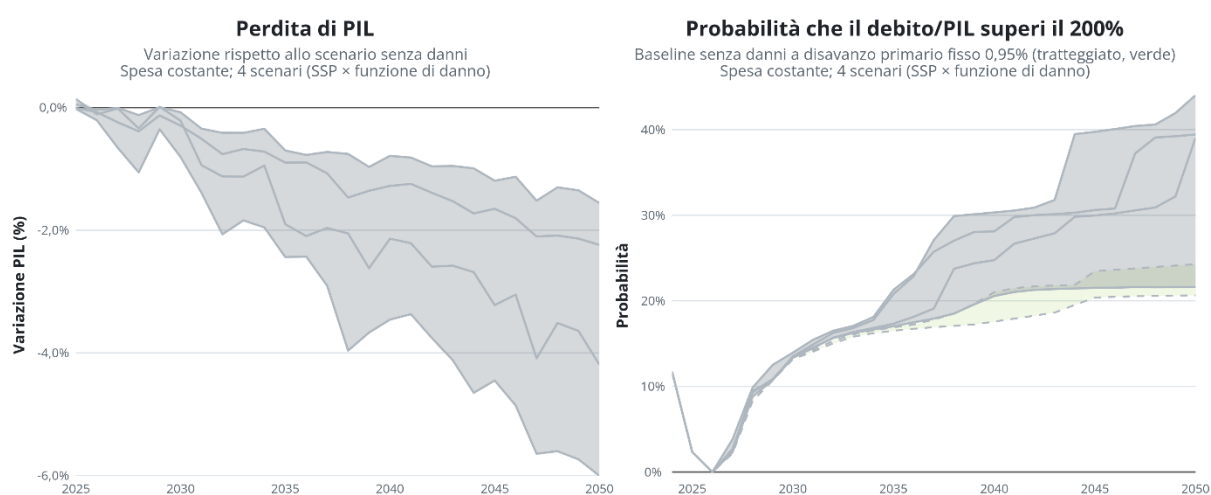


Figura 2: Impatti macro-economici (sinistra: perdita di PIL) e di sostenibilità del debito (destra, probabilità di avere alto indebitamento) per tutti gli scenari analizzati nel rapporto

Il secondo canale di trasmissione fra economia reale e finanziaria è il **costo di rifinanziamento**. Il premio sovrano si allarga per l'effetto dello **spread climatico**, che negli scenari a danni elevati si attesta in media sui 42-46 punti base, e che può ulteriormente salire in casi avversi (Fig. 3). Negli scenari peggiori, l'onere per interessi arriva al 6,7%-7,7% del PIL nel 75° percentile, un livello che assorbirebbe una quota particolarmente alta di risorse pubbliche proprio nei momenti di maggiore vulnerabilità climatica. Inoltre, il canale dello spread climatico si somma a quelli discussi: il maggior debito alimenta uno spread più ampio, lo spread più ampio si traduce in un servizio del debito più elevato, soprattutto nelle code, e questo a sua volta retroagisce sulla traiettoria di debito/PIL.

Premio sovrano e spread climatico al 2050

^unto vuoto = senza danni; punto pieno = danni climatici. Whiskers: p25-p75. Etichetta: spread mediano [p25; p75].

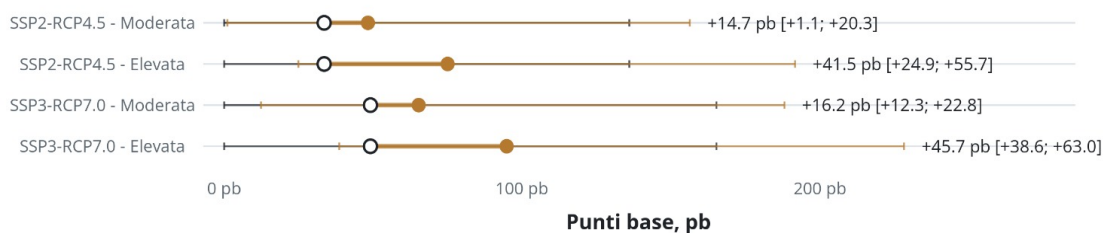


Figura 3: Spread climatico per diversi scenari emissivi e di impatti economici del clima.

Infine, il terzo meccanismo è la compressione dello spazio fiscale, che mette in luce un trade-off di fondo tra due regole fiscali alternative. Sotto una regola di saldo primario fisso, lo Stato difende la traiettoria del debito scaricando l'aggiustamento sulla spesa: la spesa pubblica discrezionale dovrebbe contrarsi fino al 16-19% a metà secolo, con profonde ripercussioni sociali e sulla stessa crescita economica (ripercussioni che, per semplicità, non consideriamo formalmente). Sotto una regola di spesa costante, invece, il livello della spesa primaria è preservato ma lo shock si trasferisce su debito, interessi e premio sovrano, portando la probabilità di superare la soglia del 200% del rapporto debito/PIL al 39-44% nelle combinazioni più severe. Le due regole non sono previsioni di politica fiscale, ma archetipi che delimitano lo spazio entro cui si colloca l'aggiustamento effettivo.

Riassumendo l'analisi di queste tre dimensioni di sostenibilità finanziaria, i nostri scenari suggeriscono come **il rischio climatico agisca come un moltiplicatore su una vulnerabilità preesistente**. Gli impatti economici del clima portano ad un rischio di deterioramento complessivo del quadro fiscale, evidenziando come **la sostenibilità del debito sovrano italiano non sia separabile dal rischio climatico**. Qualunque regola fiscale che ne ignori l'effetto sottostima sistematicamente il costo dell'aggiustamento e la probabilità che questo debba avvenire nelle condizioni macroeconomiche più sfavorevoli. Il disegno della regola fiscale ridistribuisce il costo tra spesa, debito e interessi, ma nessuna regola lo elimina.

Opzioni di risposta: mitigazione e adattamento come investimenti

Le politiche di mitigazione – in primis EU ETS, energie rinnovabili ed efficienza energetica – hanno già prodotto riduzioni significative delle emissioni (-30% in Italia tra il 1990 e il 2024), ma i progressi restano disomogenei tra settori, con il trasporto ed il settore residenziale ancora lontani dagli obiettivi. Le tecnologie chiave della transizione (efficienza energetica, rinnovabili, elettrificazione) possono coprire circa il 75% delle riduzioni necessarie entro il 2030; il restante 25% dipende da tecnologie emergenti come idrogeno verde e CCUS. L'investimento incrementale in mitigazione necessario in Italia è

stimato in circa **174,4 miliardi di euro nel periodo 2024-2030** (PNIEC aggiornato al 2024).

Per l'adattamento, il **costo annuale** stimato dalla Commissione Europea nel 2026 è **per l'Italia di 10,08 miliardi di euro**, corrispondente allo 0,4% del PIL nazionale. Dunque, il fabbisogno è nell'ordine di **decine di miliardi nel breve-medio periodo e plausibilmente superiore ai 100 miliardi su orizzonti più lunghi**, ma circa il 95% dei danni da eventi estremi rimane oggi non assicurato. Le *nature-based solutions* e le infrastrutture resilienti rappresentano strumenti complementari: le prime più flessibili e meno costose, le seconde più immediate e prevedibili nella protezione offerta. Da sottolineare che un euro investito in prevenzione può generare tra 4 e 7 euro di danni evitati, con evidenti benefici anche per le finanze pubbliche.

Messaggi chiave del rapporto

Questo rapporto riassume lo stato della conoscenza scientifica sugli impatti economici del cambiamento climatico in Italia, oltre ad aver prodotto nuove evidenze scenaristiche dei rischi climatici futuri. I messaggi chiave possono essere riassunti in cinque punti:

1. *Il cambiamento climatico in Italia è già qui e accelera entro l'orizzonte strategico delle imprese.* Nei prossimi venti anni il cambiamento del regime idro-climatico italiano -già in atto- si intensificherà, con aumento di ondate di calore, aridificazione, e al contempo aumento di eventi di precipitazioni estremi.
2. Il rischio climatico genera rilevanti perdite economiche, misurabili e diseguali tra settori e territori. Gli impatti fisici si traducono in perdite per l'economia reale, con una perdita della crescita economica annuale media 2025-2050 di circa il 15% nello scenario tendenziale SSP3-RCP7.0 (stima centrale con funzione di danno mediana; fino al 41% al 95° percentile della funzione di danno nello scenario di coda; cfr. Tabella 4.3), e impatti su una varietà di settori economici in un territorio strutturalmente fragile.
3. *Il rischio climatico è un rischio sovrano per l'Italia, in quanto moltiplicatore di vulnerabilità preesistenti.* Con un debito corrente di oltre 3000 miliardi di euro, l'Italia è particolarmente sensibile a riduzioni di una crescita economica già anemica. I rischi climatici macroeconomici si propagano alle finanze pubbliche, agendo da moltiplicatore su una vulnerabilità preesistente.
4. *Le tre dimensioni di trasmissione del clima al bilancio pubblico - debito, spread climatico e compressione dello spazio fiscale - interagiscono in modo non lineare e si amplificano reciprocamente.* Lo spread climatico aumenta il servizio del debito, potenzialmente innestando effetti retroattivi sulla crescita. Il policy maker si trova davanti a un trade-off di fondo, ossia da un lato salvaguardare la

traiettorie del debito richiederebbe un taglio alla spesa pubblica discrezionale fino a circa un quinto, con notevoli ripercussioni sociali e politiche, mentre dall'altro preservare il livello della spesa lascerebbe invece deteriorare il rapporto debito/PIL, gli interessi e lo spread sovrano, portando la probabilità di sfioramento della soglia del 200% al 39-44% nelle combinazioni più severe.

5. *Il deficit di adattamento e il policy gap sono le principali leve su cui agire.* Mitigazione ed adattamento ai cambiamenti climatici non sono costi ma investimenti per assicurare crescita e stabilità economiche.

Rischio Climatico in Italia: Scenari, Costi e Opzioni di Risposta

Capitolo 1: I cambiamenti climatici in Italia

1.1 Lo stato del clima attuale

Il riscaldamento globale ha raggiunto valori senza precedenti. Il 2024 è stato l'anno più caldo mai registrato a livello globale e gli ultimi anni sono stati caratterizzati dalle temperature medie più elevate dall'inizio delle osservazioni sistematiche (WMO, 2025). La stima ottenuta dal dataset di rianalisi ERA5, reso disponibile dal Copernicus Climate Change Service (ECMWF, 2024), colloca inoltre il 2025 tra gli anni più caldi dell'intera serie storica. In parallelo, la frequenza e l'intensità degli eventi estremi risultano in aumento in diverse aree del pianeta, con impatti significativi sulla salute umana, sulla sicurezza alimentare, sulla disponibilità di risorse idriche e sugli ecosistemi (IPCC, 2021).

L'Europa si riscalda più rapidamente della media globale. A partire dagli anni Ottanta, il continente ha registrato un tasso di aumento della temperatura circa doppio rispetto alla media terrestre, diventando l'area continentale con il riscaldamento più rapido. Ondate di calore prolungate hanno colpito ripetutamente l'Europa, con impatti sanitari molto rilevanti e un numero elevato di decessi; allo stesso tempo, piogge torrenziali e inondazioni hanno prodotto danni economici e sociali crescenti. Per l'Europa meridionale e per il Mediterraneo, la letteratura più recente segnala inoltre una prospettiva di diminuzione delle precipitazioni medie e di aggravamento dei periodi di siccità (Robine et al., 2008; Ballester et al., 2023; IPCC, 2023).

Le aree urbane sono particolarmente vulnerabili agli effetti del cambiamento climatico per via dell'elevata concentrazione di popolazione, infrastrutture e attività economiche. In Europa oltre il 74% della popolazione vive già oggi in aree urbane e la quota è destinata a crescere ulteriormente entro metà secolo. Ondate di calore, alluvioni, siccità, tempeste di vento e innalzamento del livello del mare, nel caso delle città costiere, producono quindi effetti amplificati proprio nei nodi economici e insediativi più rilevanti.

Anche gli oceani e i mari si stanno riscaldando rapidamente. La temperatura record osservata nel 2023 rappresenta, secondo la letteratura più recente, un evento estremamente improbabile nel clima passato e sostanzialmente impossibile in assenza del riscaldamento globale antropogenico (Terhaar et al., 2025).

1.2 Gli scenari climatici di lungo periodo

L'Europa è il continente le cui temperature stanno aumentando più velocemente (European Environment Agency, 2024). Ciò implica un peggioramento della gravità e della frequenza degli eventi meteorologici avversi. Un'estate eccezionalmente calda come quella del 2010, che solo pochi decenni fa sarebbe stata considerata statisticamente rarissima, tenderà a diventare molto più frequente nei prossimi decenni. Allo stesso tempo aumenta la probabilità di eventi siccitosi persistenti e cresce la probabilità di estremi concomitanti, cioè di più shock climatici che si manifestano nello stesso periodo o nella stessa stagione (Suarez-Gutierrez, Müller and Marotzke, 2023). In particolare, i modelli climatici convergono nell'indicare che le ondate di calore aumenteranno sia in durata sia in intensità da oggi a fine secolo (Molina, Sánchez and Gutiérrez, 2020).

Le precipitazioni presentano un quadro più complesso, in cui la scala spaziale e temporale conta molto. In generale, la letteratura evidenzia una tendenza alla riduzione delle precipitazioni in Europa meridionale (Cheval, Dumitrescu and Birsan, 2017). In Italia, studi recenti indicano un calo soprattutto sulle Alpi e su parti della costa tirrenica meridionale, mentre altri lavori mostrano un aumento dei giorni consecutivi senza pioggia e, nello stesso tempo, una crescita delle precipitazioni estreme in alcune aree del Centro-Nord e lungo la fascia tirrenica (Baronetti et al., 2022; Faggian, 2021; Pavan et al., 2019; Raffa et al., 2023). Questo significa che il segnale climatico italiano non è semplicemente "meno pioggia", ma un diverso regime pluviometrico, con meno precipitazioni ordinarie e una maggiore concentrazione in episodi intensi.

L'ultima edizione del Rapporto SNPA segnala che anche in Italia il 2024 è stato l'anno più caldo dell'intera serie storica dal 1961. La Figura 1.1 mostra la serie delle anomalie della temperatura media in Italia rispetto al periodo 1991-2020, confrontata con quella della temperatura media globale sulla terraferma. Entrambe mostrano un marcato trend crescente negli ultimi decenni. In Italia il 2024 ha registrato un'anomalia della temperatura media pari a +1,33 °C, superiore a quella globale sulla terraferma (+1,04 °C, rispetto alla media 1990-2020). Dal 2000 in poi, le anomalie italiane rispetto alla base climatologica 1991-2020 sono state quasi sempre positive; il 2024 è stato inoltre l'undicesimo anno consecutivo con un'anomalia positiva. A scala globale, sulla sola terraferma, dal 2005 tutti gli anni sono risultati più caldi della media con la sola eccezione del 2008 (SNPA, 2025).

Nel caso italiano, il 2024 si colloca al primo posto anche per anomalia della temperatura minima (+1,40 °C) e al secondo per anomalia della temperatura massima (+1,26 °C), dopo il record del 2022. Gli indici rappresentativi degli estremi termici mostrano un quadro pienamente coerente con l'aumento delle medie: aumentano gli estremi di caldo, mentre diminuiscono quelli di freddo. Uno studio sulle ondate di

calore nel trentennio 1991-2020 evidenzia infatti un incremento apprezzabile nei decenni più recenti in termini di frequenza, intensità e durata (Settanta et al., 2024).

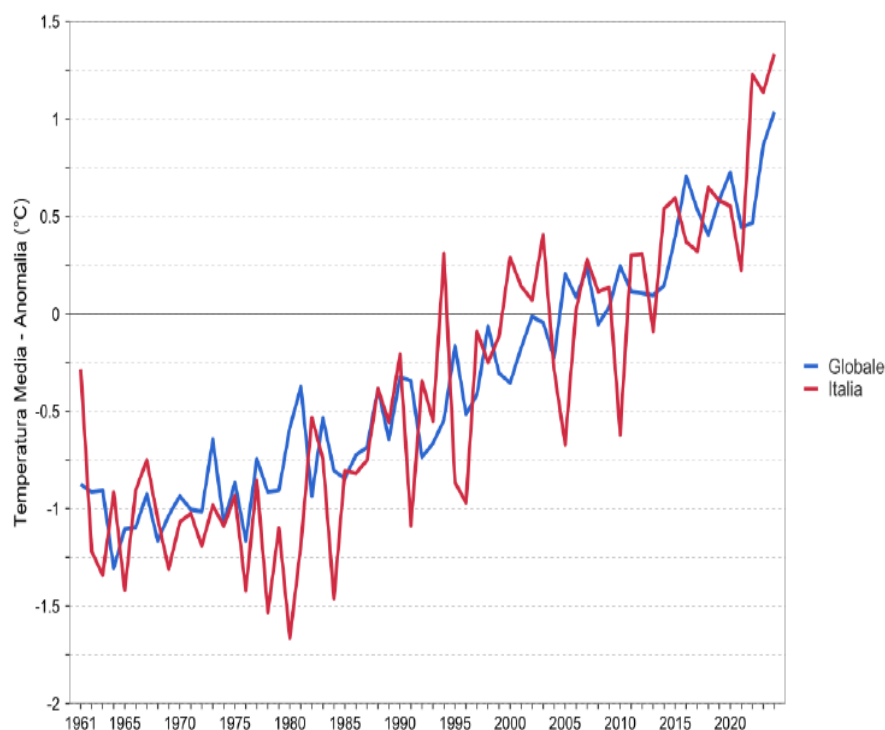


Figura 1.1 - Serie delle anomalie di temperatura media globale sulla terraferma e in Italia, rispetto al valore climatologico 1991-2020. Fonte dati: NCDC-National Climatic Data Center del NOAA e SCIA-ISPRA. Elaborazione: ISPRA (SNPA, 2025).

Anche la temperatura superficiale dei mari italiani mostra un forte aumento. Nel 2024 si colloca al primo posto della serie dal 1982, con un'anomalia di +1,24 °C rispetto alla media climatologica 1991-2020, quasi 0,3 °C superiore al precedente record del 2022. Dal 2007 in poi le anomalie sono state sempre positive, con la sola eccezione del 2010. Escludendo il 2003, gli ultimi quattordici anni hanno registrato le anomalie positive più elevate dell'intera serie.

Le precipitazioni cumulate annuali in Italia nel 2024 sono risultate complessivamente superiori alla media climatologica di circa l'8%, ma con una forte disomogeneità territoriale. Le precipitazioni sono state abbondanti al Nord e scarse su ampie aree del Centro, del Sud e delle isole, determinando un peggioramento progressivo della severità idrica nelle regioni centro-meridionali. La Sicilia, ad esempio, è passata da condizioni di severità idrica media a condizioni di severità idrica alta già entro febbraio, mantenendole per gran parte dell'anno.

Questa situazione è destinata ad aggravarsi nei prossimi decenni. Per valutare l'entità del cambiamento atteso, la comunità scientifica utilizza scenari climatici, da non intendersi come previsioni, ma come proiezioni condizionali che rispondono alla domanda “se le emissioni seguissero questa traiettoria, come risponderebbe il clima?” (si veda il Glossario per le definizioni di SSP, RCP e delle loro combinazioni). Le analisi oggi disponibili per l'Italia, dalle proiezioni del CMCC a quelle di ENEA e ISPRA, convergono nella stessa direzione: in tutti gli scenari, anche in quelli con forte riduzione delle emissioni, l'Italia e l'intero bacino del Mediterraneo saranno interessati da un aumento generalizzato delle temperature e da una riduzione media delle precipitazioni entro la fine del secolo. Inoltre, il cambiamento climatico in Italia si manifesterà sempre più attraverso eventi estremi, con temporali intensi e alluvioni improvvise soprattutto in autunno e sulle Alpi, e con ondate di calore e lunghi periodi di siccità soprattutto in estate e nel Mezzogiorno (Raffa et al., 2023; Struglia et al., 2025; ISPRA, 2026).

Gli studi più recenti si basano su proiezioni climatiche regionali ad alta o altissima risoluzione, fino a 5 chilometri, che consentono di osservare con grande dettaglio gli impatti locali attesi da qui al 2100 e di superare i limiti dei modelli globali a bassa risoluzione. Proiezioni così dettagliate sono utili non solo per descrivere il futuro clima italiano, ma anche per progettare strategie di adattamento più mirate.

Uno degli esempi più rilevanti è lo studio ENEA (Struglia et al., 2025), che considera tre scenari socioeconomici e climatici, dallo scenario più virtuoso SSP1-2.6 a quello intermedio SSP2-4.5, fino allo scenario ad alto impatto SSP5-8.5.

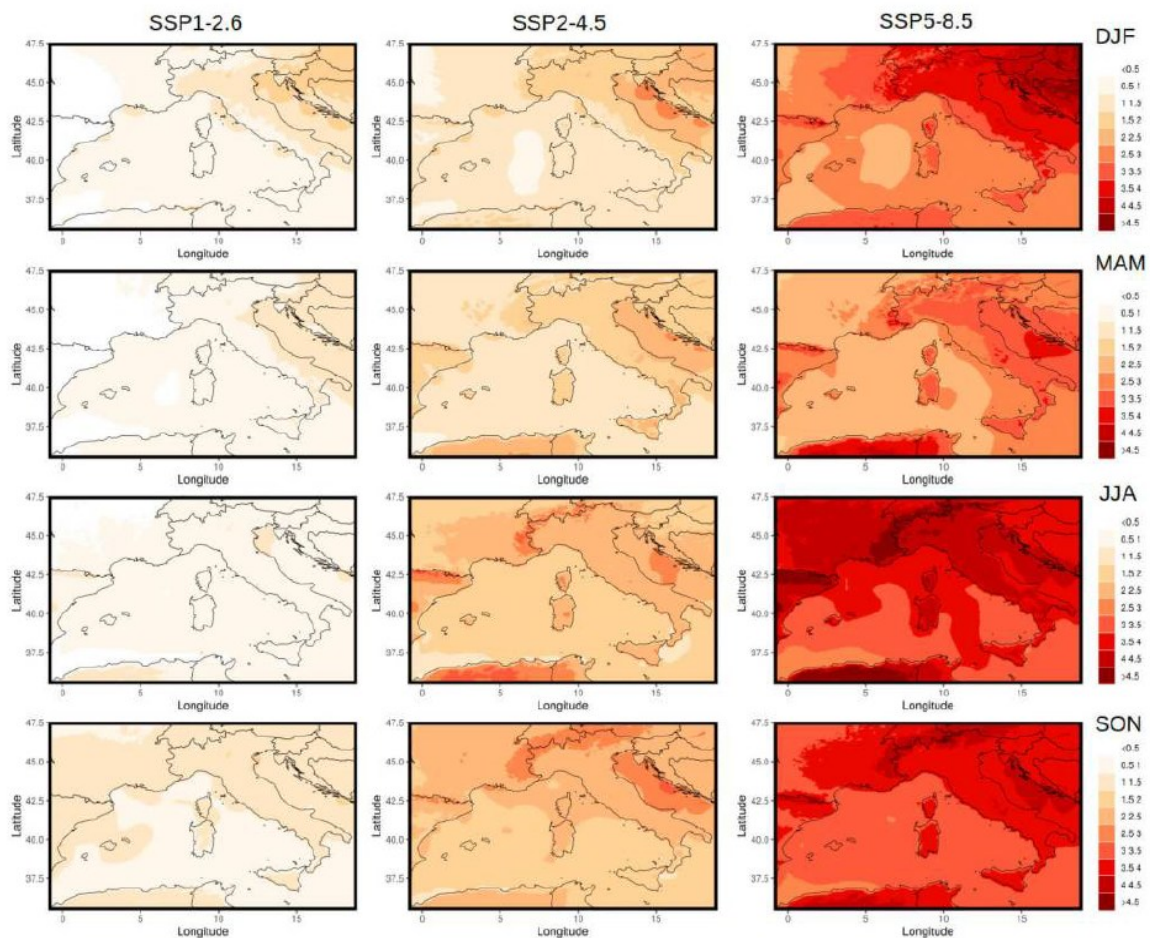


Figura 1.2 - Variazione della temperatura media superficiale per il periodo 2071-2100 rispetto al trentennio di riferimento 1985-2014. Le variazioni sono espresse in °C; la temperatura media superficiale è presentata per le diverse stagioni (righe) e per i diversi scenari (colonne) alla risoluzione di 5 km.

I risultati mostrano che le temperature aumenteranno in tutte le stagioni e in tutte le aree del Paese. Nelle zone montuose, in particolare, l'aumento delle temperature estive potrebbe raggiungere fino a +4,5 °C nello scenario più severo, mentre in autunno si potrebbero osservare incrementi prossimi a +3,5 °C.

Sul fronte delle precipitazioni, il clima italiano tenderà a diventare complessivamente più secco, soprattutto in estate. Tuttavia, questa tendenza generale nasconde un paradosso sempre più evidente: diminuiscono le piogge medie, ma aumentano frequenza e intensità degli eventi estremi. Nei due scenari più critici (SSP2-4.5 e SSP5-8.5), le simulazioni ENEA mostrano un incremento significativo delle precipitazioni intense soprattutto nel Nord Italia e nelle aree alpine e subalpine. Alla fine del secolo, in inverno, l'intensità delle piogge potrebbe aumentare sulle Alpi occidentali e diminuire sulle Alpi orientali e nel Mezzogiorno; in autunno, nello scenario più severo, si registra un aumento significativo delle piogge estreme su gran parte del territorio nazionale, con particolare evidenza nel Nord Italia.

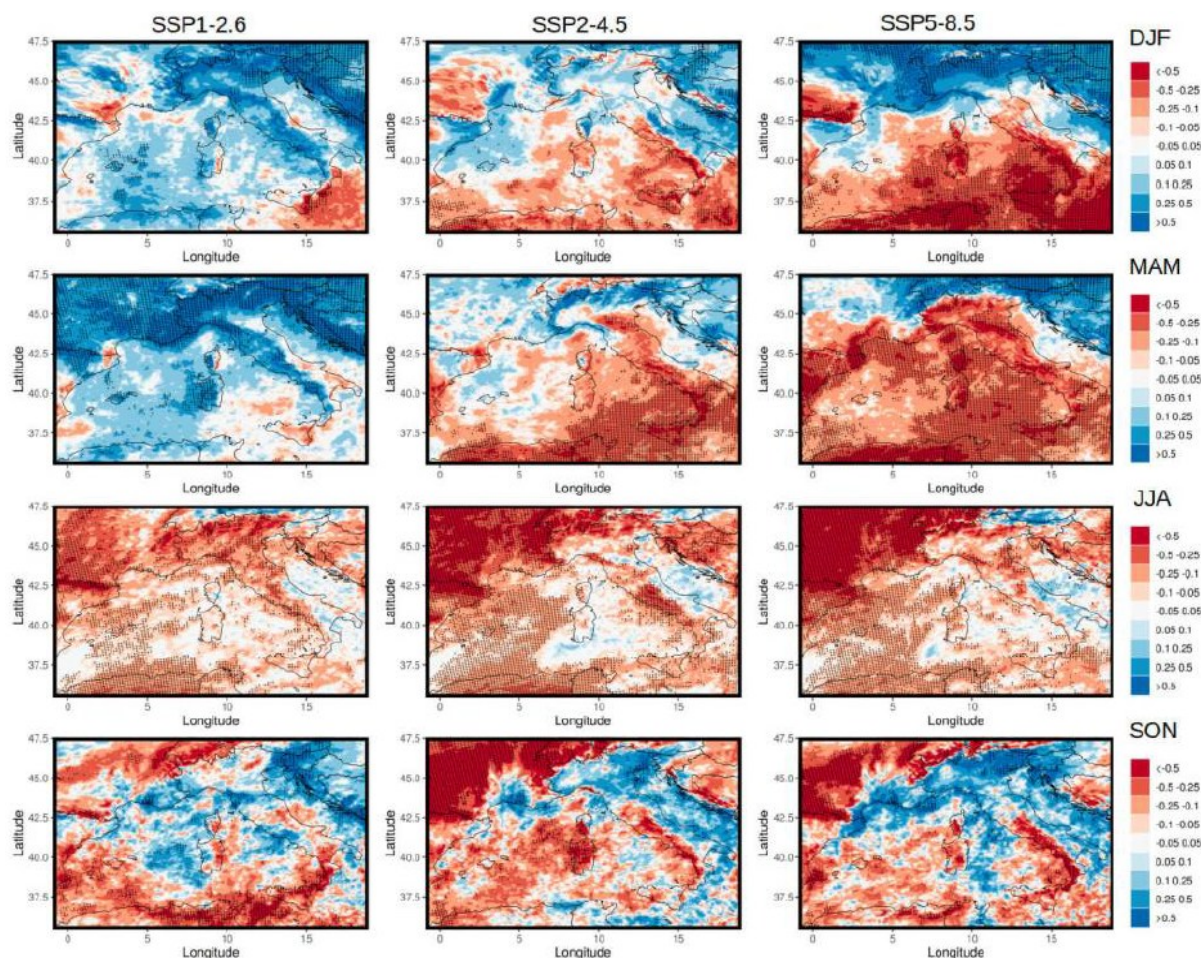


Figura 1.3 - Variazione della precipitazione media per il periodo 2071-2100 rispetto al trentennio di riferimento 1985-2014. Le variazioni sono espresse in mm/giorno; i punti indicano le variazioni statisticamente significative. La precipitazione media è presentata per le diverse stagioni (righe) e per i diversi scenari (colonne) alla risoluzione di 5 km.

Risultati simili emergono dallo studio del CMCC (Raffa et al., 2023), che presenta un dataset di proiezioni climatiche ad alta risoluzione per l'Italia con dati orari dal 1989 al 2050. Lo studio considera due scenari già ampiamente utilizzati nella letteratura sugli impatti climatici: SSP2-4.5, adottato come scenario di riferimento intermedio nello studio CMCC, e SSP5-8.5, usato come scenario di massimo rischio. L'alta risoluzione del dataset consente di simulare in modo più accurato precipitazioni intense, ondate di calore e differenze locali tra montagne, coste e aree urbane.

I risultati mostrano che tra il 2030 e il 2050 si verificherà un aumento generalizzato della temperatura in tutta Italia anche nello scenario SSP2-4.5. La pianura padana emerge come una delle aree con il maggiore incremento atteso, con aumenti superiori a 2-2,5 °C rispetto alla fine del secolo scorso, un valore circa doppio rispetto alla media globale.

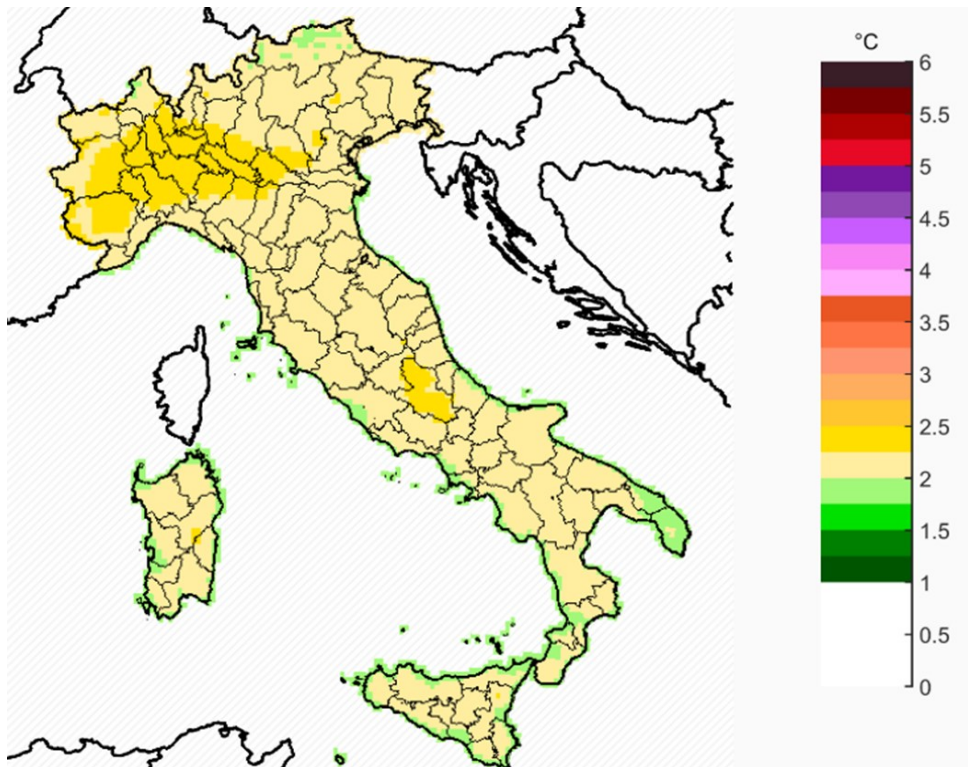


Figura 1.4 - Temperatura media giornaliera nel periodo 2041-2070 nello scenario SSP2-4.5: incremento rispetto al periodo 1981-2010. Fonte: Dataclime cards, downscaling statistico delle proiezioni climatiche CMIP6 per l'Italia.

Per quanto riguarda le precipitazioni, nello scenario SSP2-4.5 è prevista una diminuzione percentuale fra il 10% e il 20% delle precipitazioni totali nel Sud, mentre al Nord la variazione è più contenuta e alterna aree con segno positivo e negativo. Nello scenario SSP5-8.5, le proiezioni per il Sud evidenziano picchi negativi fino al 35%, mentre al Centro-Nord è previsto un aumento lungo alcune fasce tirreniche e adriatiche a fronte di riduzioni su aree montuose e sul Nord-Ovest.

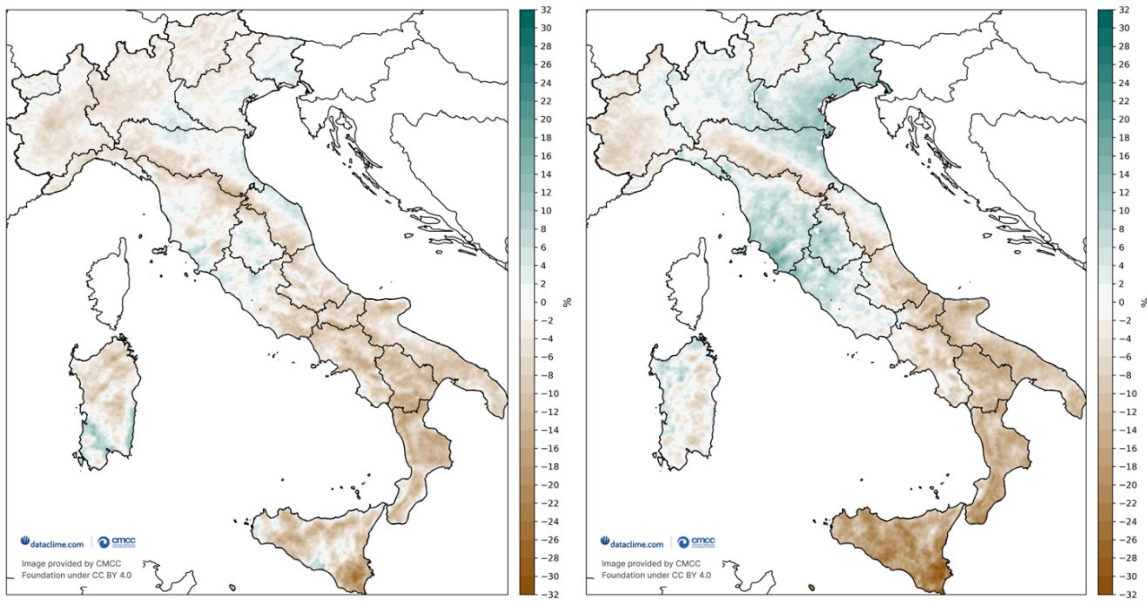


Figura 1.5 - Precipitazioni cumulate annuali negli scenari SSP2-4.5 e SSP5-8.5: variazioni nel periodo 2041-2070 rispetto al periodo 1981-2010.

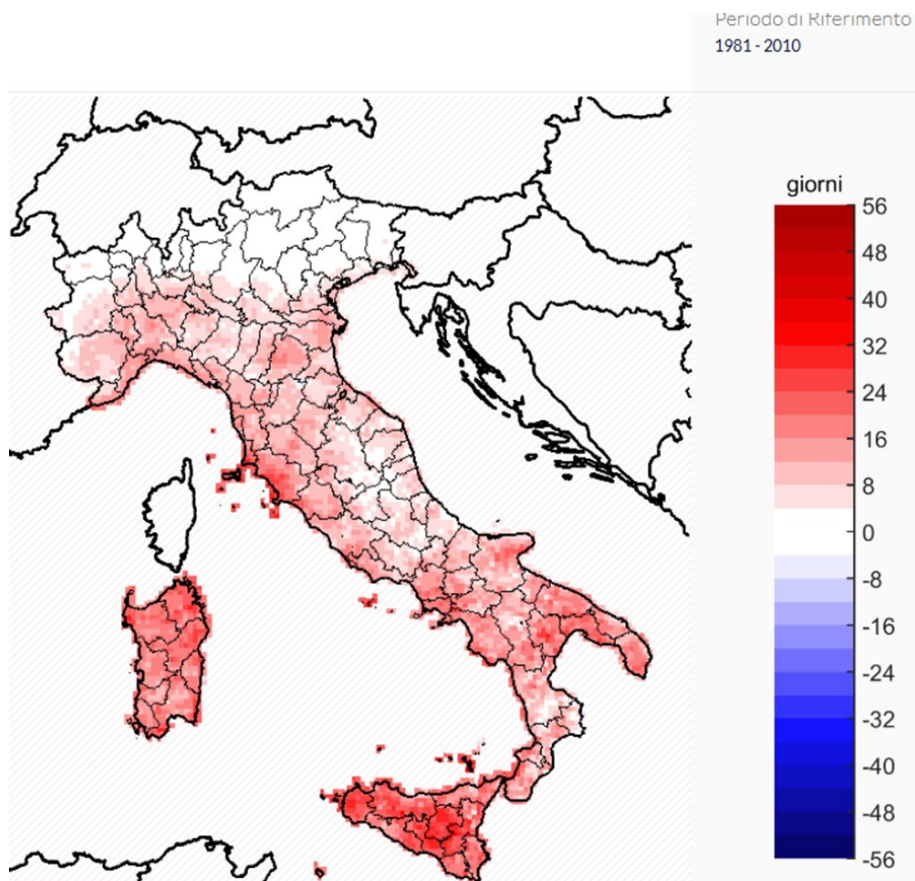


Figura 1.6 - Giorni consecutivi senza pioggia nel periodo 2041-2070 nello scenario SSP2-4.5: incremento rispetto al periodo 1981-2010. Fonte: Dataclime cards, downscaling statistico delle proiezioni climatiche CMIP6 per l'Italia.

Ancora più preoccupanti sono le proiezioni relative ai giorni consecutivi senza pioggia. I periodi di siccità caratterizzeranno soprattutto il Sud d'Italia e, anche nello scenario intermedio SSP2-4.5, potranno raggiungere durate medie prossime ai due mesi. Periodi di siccità così lunghi avranno impatti rilevanti soprattutto in agricoltura, con contrazione delle rese e modifiche permanenti dell'assetto produttivo.

1.3 Le previsioni di medie ed estremi climatici in Italia ed Europa dal 2030 al 2050

Per rappresentare in modo sintetico ma efficace le variazioni climatiche e gli eventi estremi attesi in Europa e in Italia nei prossimi decenni, utilizziamo le proiezioni climatiche multi-modello derivate dall'ensemble ISIMIP (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project, un consorzio internazionale che coordina simulazioni climatiche standardizzate), che copre l'intero continente europeo con granularità amministrativa NUTS2, corrispondente alle regioni in Italia. Per ogni regione vengono riportate le variazioni percentuali mediane rispetto al baseline storico 1981-2000, calcolate su due orizzonti temporali, 2030 inteso come media del ventennio 2021-2040 e 2050 inteso come media del trentennio 2041-2070, e per due scenari di riferimento: SSP2-RCP4.5, scenario socio-economico a crescita più elevata e con emissioni moderate, e SSP3-RCP7.0, scenario tendenziale del rapporto, caratterizzato da rivalità regionale e minore cooperazione internazionale. Le aree in cui meno del 70% dei modelli concorda sul segno della variazione sono tratteggiate, a segnalare una maggiore dispersione previsionale.

Il quadro complessivo è quello di un continente le cui condizioni climatiche cambiano profondamente già entro l'orizzonte di pianificazione strategica di imprese e istituzioni. Due fenomeni dominano il segnale: l'intensificazione termica estiva e l'aridificazione strutturale dell'Europa meridionale, accompagnate da un ridisegno del regime pluviometrico.

Ondate di calore (HW)

Variazione percentuale rispetto alla baseline 1981-2000

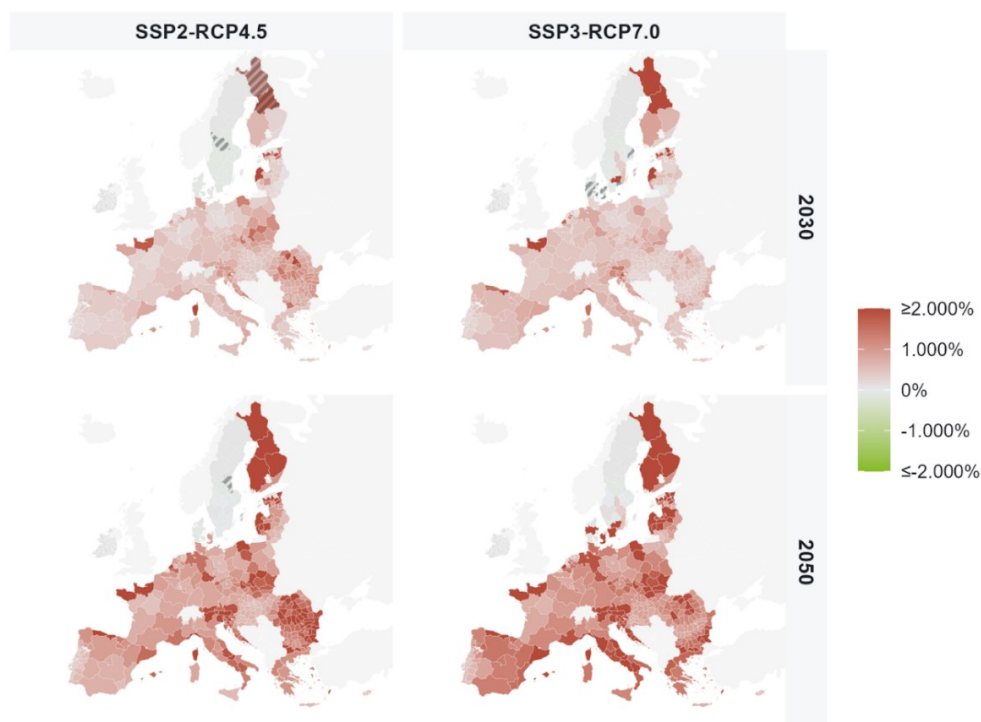


Figura 1.7 - Severità annua delle ondate di calore. Le ondate di calore sono definite come periodi di almeno 5 giorni consecutivi con temperatura massima superiore al 90° percentile e maggiore di 30 °C. Baseline: 1981-2000. Orizzonti: 2030 (2021-2040), 2050 (2041-2070). Valore: mediana ensemble sui 10 modelli. Tratteggio: aree con meno del 70% di accordo sul segno.

Il primo e più netto dei segnali attesi riguarda l'intensificazione delle ondate di calore. Già al 2030 la mediana europea della severità annua cresce di circa il 450%-500% sotto entrambi gli scenari, traducibile in circa dieci-dodici giorni aggiuntivi di condizioni di ondata di calore all'anno rispetto al baseline. Al 2050 la mediana raddoppia nello scenario SSP2-RCP4.5 e quasi triplica nello scenario SSP3-RCP7.0, mentre l'Italia mostra un'amplificazione ancora più forte, con incrementi assoluti compresi tra 30 e 58 giorni all'anno. Le aree alpine e prealpine, in particolare, presentano variazioni percentuali tra le più elevate del continente, anche perché partono da un baseline storico più contenuto.

Variabilità giornaliera della temperatura (TVAR)

Variazione percentuale rispetto alla baseline 1981-2000

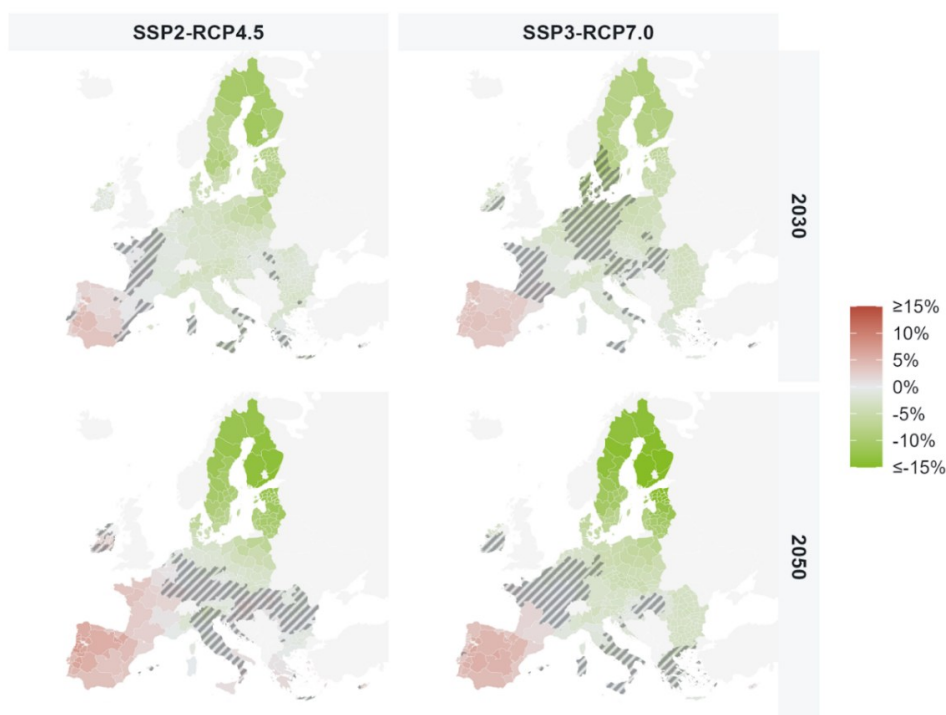


Figura 1.8 - Variabilità giornaliera della temperatura (TVAR). Baseline: 1981-2000. Orizzonti: 2030 (2021-2040), 2050 (2041-2070). Valore: mediana ensemble sui 10 modelli. Tratteggio: aree con meno del 70% di accordo sul segno.

Il secondo elemento del segnale termico è la variabilità giornaliera della temperatura (TVAR), ossia l'ampiezza delle oscillazioni termiche da un giorno all'altro (per la definizione e l'interpretazione di TVAR, SPEI e SPI si rimanda al glossario in coda al rapporto). La mediana europea è lievemente negativa in tutti gli scenari e orizzonti, segnalando che la distribuzione delle temperature si sposta verso valori più alti senza allargarsi in modo proporzionale. Il segnale italiano è coerente con quello continentale. Ai fini dell'adattamento, questo implica che il fattore dominante di stress sarà soprattutto lo spostamento medio della distribuzione termica verso livelli più elevati, più che un aumento della sua dispersione.

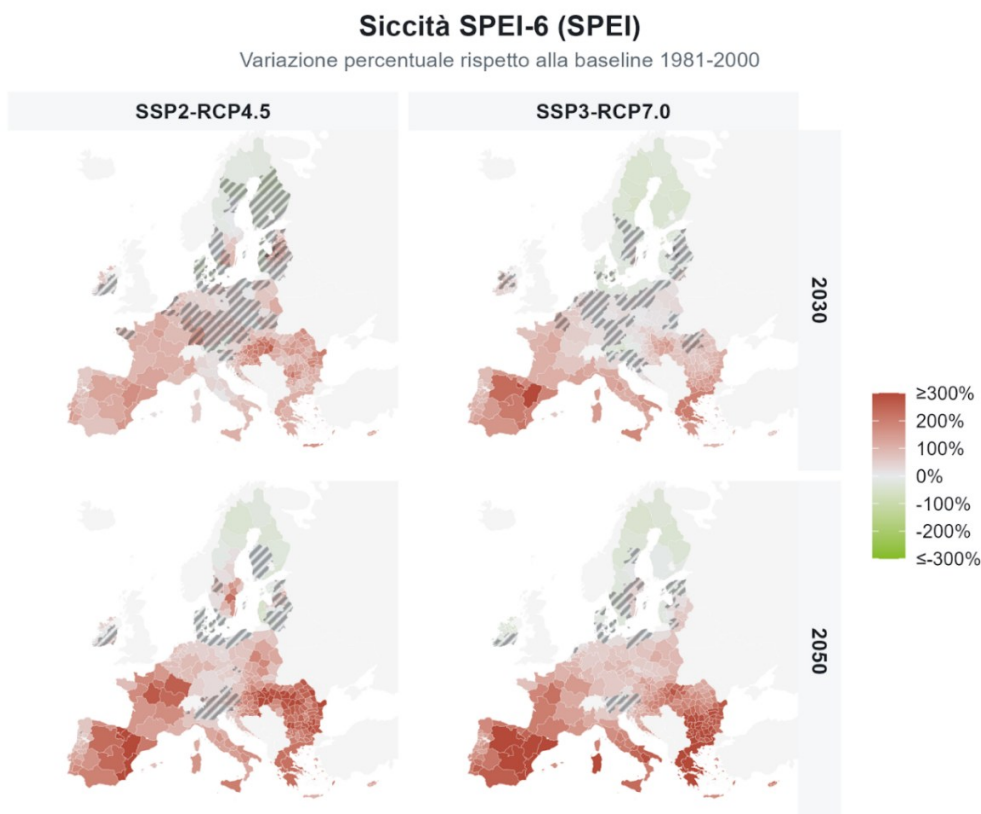


Figura 1.9 - Siccità misurata con SPEI. Baseline: 1981-2000. Orizzonti: 2030 (2021-2040), 2050 (2041-2070). Valore: mediana ensemble sui 10 modelli. Tratteggio: aree con meno del 70% di accordo sul segno.

Alla tendenza termica si affianca il segnale di aridificazione, che trova nell'indice SPEI la sua rappresentazione più integrata, perché combina deficit di precipitazione e maggiore domanda evapotraspirativa dovuta al riscaldamento. L'Italia si colloca nettamente sopra la mediana continentale: al 2050 i valori mediani nazionali risultano molto elevati e Sardegna e Basilicata si avvicinano ai valori più estremi dell'intero dominio europeo. Le implicazioni sono profonde per agricoltura, disponibilità idrica, usi civili e industriali e resilienza degli ecosistemi nel Mezzogiorno.

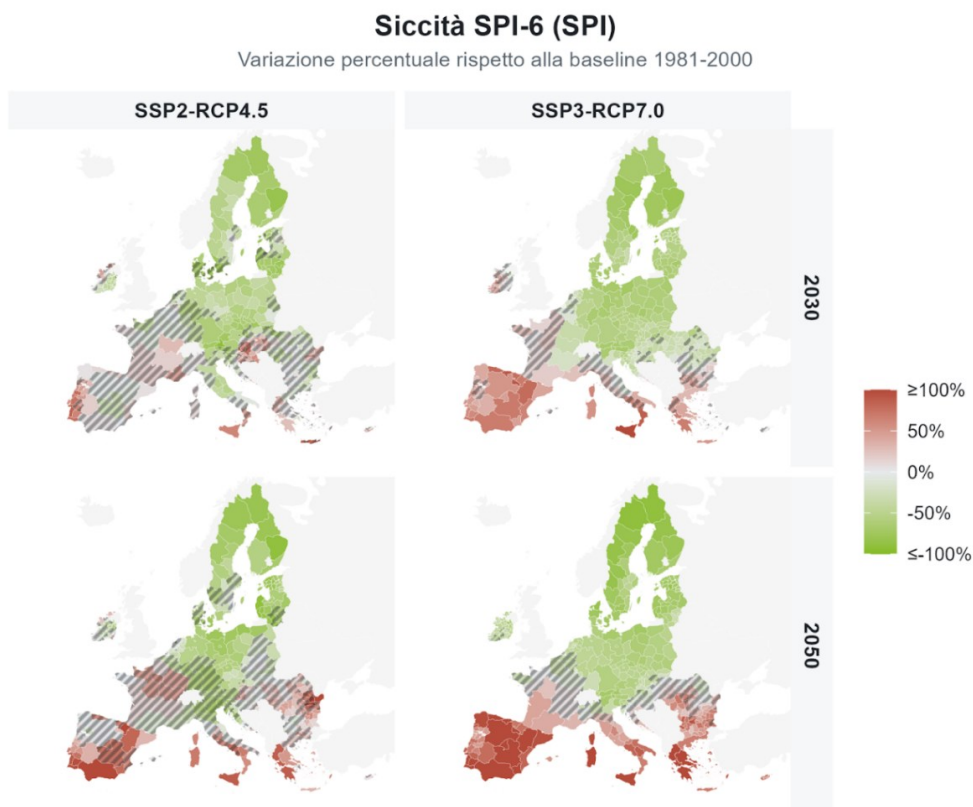


Figura 1.10 - Siccità misurata con SPI. Baseline: 1981-2000. Orizzonti: 2030 (2021-2040), 2050 (2041-2070). Valore: mediana ensemble sui 10 modelli. Tratteggio: aree con meno del 70% di accordo sul segno.

L'indice SPI, che isola la sola componente pluviometrica, restituisce invece un quadro più sfumato. Il confronto con lo SPEI è particolarmente istruttivo: mentre quest'ultimo cresce marcatamente, lo SPI mostra per l'Italia un segnale meno netto e in alcuni casi persino positivo. Questa apparente divergenza indica che il deficit idrico atteso non sarà dovuto soltanto a una riduzione dei volumi di pioggia, ma soprattutto all'aumento della domanda evaporativa atmosferica. Pianificare la risposta climatica guardando solo alla precipitazione cumulata sarebbe quindi fuorviante.

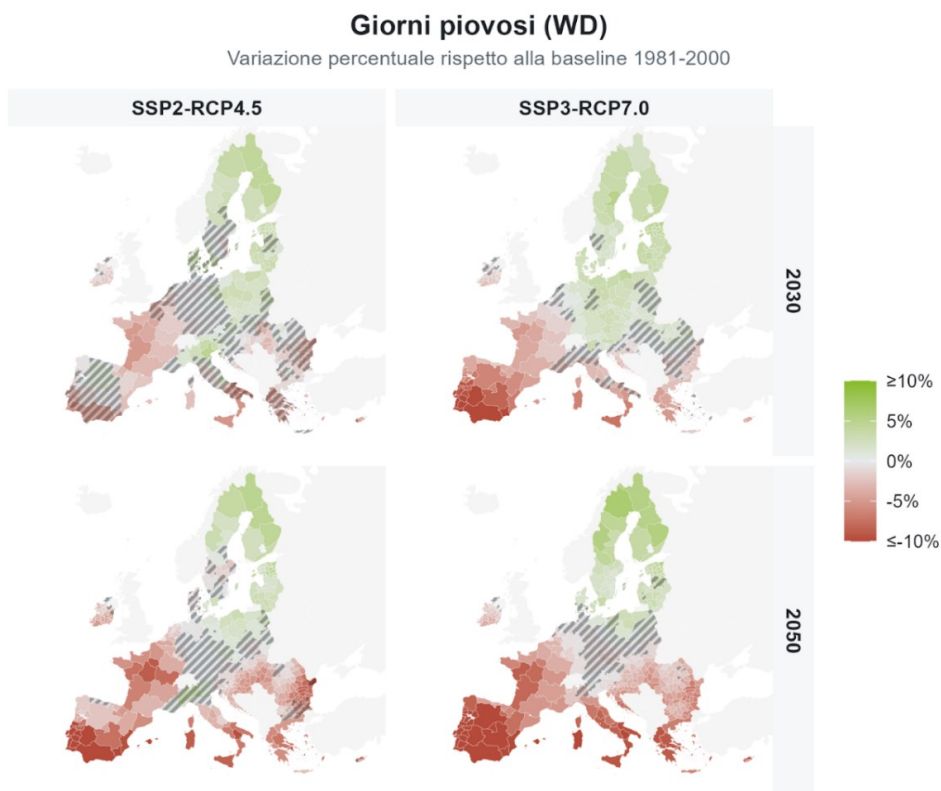


Figura 1.11 - Numero di giorni piovosi annui (WD). Baseline: 1981-2000. Orizzonti: 2030 (2021-2040), 2050 (2041-2070). Valore: mediana ensemble sui 10 modelli. Tratteggio: aree con meno del 70% di accordo sul segno.

L'altra faccia dell'aridificazione è il calo strutturale dei giorni piovosi. L'Italia emerge fra le aree più esposte a tale processo, con riduzioni mediane particolarmente marcate nel Mezzogiorno e picchi in Sicilia e Sardegna. Letto insieme allo SPEI, questo segnale delinea un Sud sempre più soggetto a un regime di aridificazione persistente.

Pioggia estrema su 5 giorni (RX)

Variazione percentuale rispetto alla baseline 1981-2000

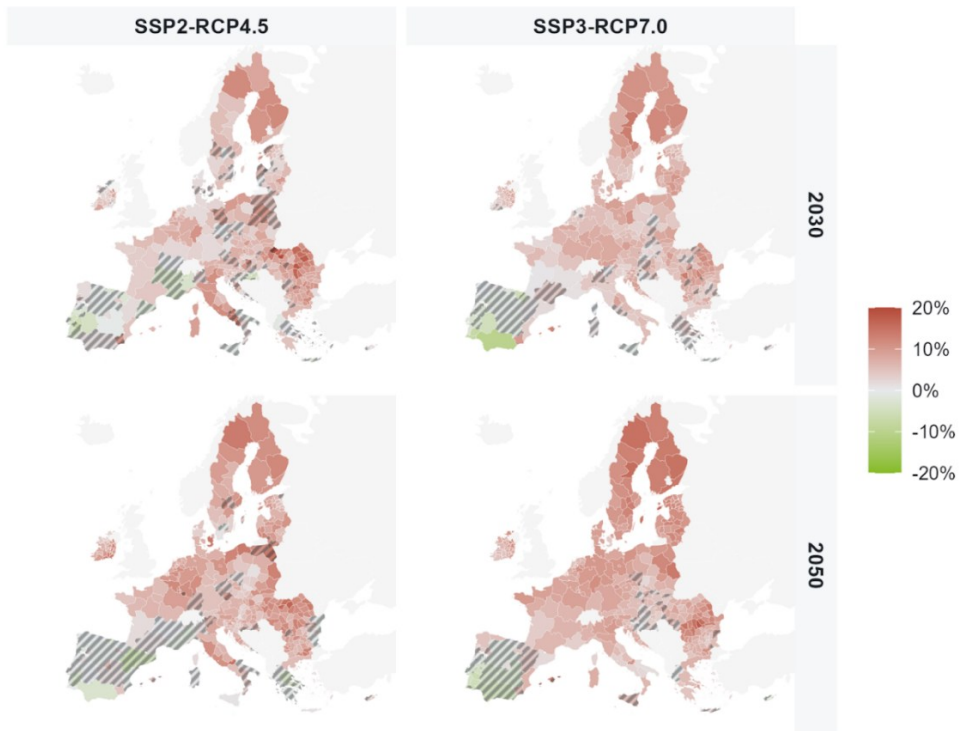


Figura 1.12 - Massimo cumulato di precipitazione su 5 giorni consecutivi (RX). Baseline: 1981-2000. Orizzonti: 2030 (2021-2040), 2050 (2041-2070). Valore: mediana ensemble sui 10 modelli. Tratteggio: aree con meno del 70% di accordo sul segno.

Se la pioggia ordinaria si riduce, quella estrema si intensifica. La precipitazione estrema su cinque giorni mostra incrementi europei contenuti ma robusti e coerenti. L'Italia segue il trend continentale, con valori mediani positivi e picchi in alcune regioni del Nord-Est e del versante adriatico. Il segnale è coerente con un aumento del rischio idrogeologico e infrastrutturale.

Pioggia estrema oltre il 99,5° percentile (PEXT)

Variazione percentuale rispetto alla baseline 1981-2000

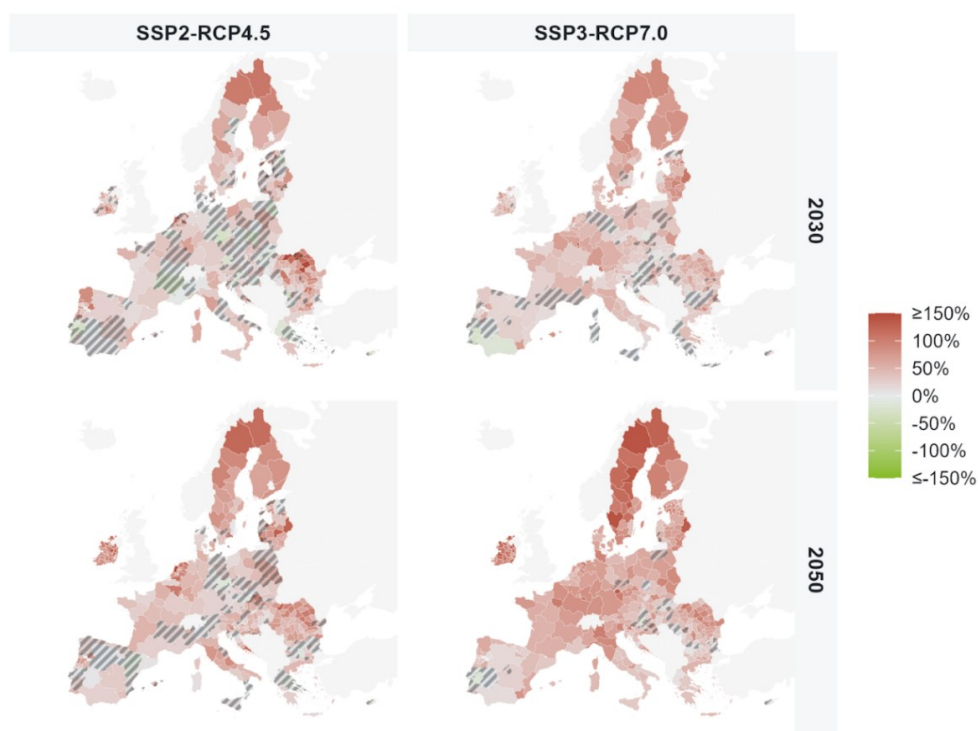


Figura 1.13 - Precipitazione annua cumulata dei giorni oltre il 99,5° percentile locale (PEXT).
Baseline: 1981-2000. Orizzonti: 2030 (2021-2040), 2050 (2041-2070). Valore: mediana ensemble
sui 10 modelli. Tratteggio: aree con meno del 70% di accordo sul segno.

La precipitazione oltre il 99,5° percentile, cioè gli eventi più severi dal punto di vista del rischio idrogeologico, completa il quadro. L'Italia segue il continente con valori mediani elevati e con picchi regionali molto marcati, in particolare in Lombardia e Liguria nello scenario più severo al 2050. Questa evidenza conferma quantitativamente che l'intensificazione degli estremi pluviometrici non è in contraddizione con il segnale di aridificazione: al contrario, i due fenomeni coesistono e definiscono il doppio stress idrico che caratterizzerà il clima italiano dei prossimi decenni.

Nel complesso, le variabili analizzate compongono un quadro strategico coerente. Nello scenario tendenziale, il sistema climatico italiano ed europeo si muove verso un nuovo regime caratterizzato da ondate di calore molto più severe, da una stagione idrica più povera nella sua componente ordinaria ma più violenta nei suoi episodi estremi, e da un'aridificazione strutturale che colpirà in modo asimmetrico il bacino mediterraneo. La collocazione temporale di questi cambiamenti, entro il 2050 e quindi pienamente all'interno dell'orizzonte di pianificazione strategica di imprese e istituzioni, rende necessaria la loro traduzione in scelte operative di adattamento, di gestione resiliente degli asset e di politiche di trasferimento e mitigazione del rischio.

Capitolo 2: Contesto normativo: il quadro politico europeo e italiano in materia di clima

2.1 Il quadro politico europeo

Nel contesto più ampio del presente rapporto, le politiche climatiche sono fondamentali per la gestione dei rischi climatici, poiché influenzano sia l'evoluzione a lungo termine dei pericoli climatici fisici (rischio fisico), sia gli adeguamenti economici a breve e medio termine associati alla transizione verso un'economia a basse emissioni di carbonio (rischio transizionale).

Per analizzare il quadro delle politiche climatiche a livello italiano, è ovviamente necessario partire dal contesto normativo europeo. Difatti, la normativa dell'UE costituisce il quadro giuridico vincolante che guida le politiche nazionali in materia di energia, trasporti e industria.

Negli ultimi 20 anni, la politica climatica europea si è evoluta attraverso una serie di iniziative legislative volte a ridurre le emissioni di gas a effetto serra. Il Green Deal europeo, introdotto dalla European Commission nel dicembre 2019 attraverso una comunicazione della Commissione (COM/2019/640), rimane il pilastro principale delle politiche climatiche dell'UE, sebbene stia attualmente subendo un cambiamento strategico caratterizzato da una maggior focalizzazione sul rafforzamento dell'industria e competitività.

L'orientamento a lungo termine della politica climatica dell'UE è definito dal regolamento (UE) 2021/1119, noto come *European Climate Law*. Il regolamento stabilisce l'obiettivo obbligatorio di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 e introduce un obiettivo intermedio che richiede una riduzione delle emissioni nette di gas serra di almeno il 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990; questi obiettivi sono formalizzati nel pacchetto legislativo *Fit for 55* (COM/2021/550). Il regolamento (UE) 2026/667, adottato dal Parlamento europeo e dal Consiglio Europeo l'11 marzo 2026, fissa un obiettivo climatico intermedio giuridicamente vincolante per il 2040, ovvero una riduzione del 90% delle emissioni di gas a effetto serra rispetto ai livelli del 1990 (European Union, 2026).

Promuovendo la riduzione delle emissioni inquinanti, la *European Climate Law* contribuisce a limitare l'entità dei futuri rischi fisici, quali gli eventi meteorologici estremi e l'aumento delle temperature, definendo un chiaro percorso di decarbonizzazione. Per renderlo possibile, l'UE ha messo in atto tre misure rilevanti: il Sistema di scambio delle quote di emissione dell'UE (EU ETS) (Direttiva 2003/87), la Direttiva sull'efficienza energetica (EED) (Direttiva 2023/1791) e la Direttiva sulle energie rinnovabili (RED) (Direttiva 2023/2413).

Le direttive EU ETS, EED e RED sono da intendersi come misure complementari e quindi necessarie, ma non sufficienti, per il raggiungimento del target di decarbonizzazione al 2050, ma dovrebbero comunque contribuire alla riduzione delle emissioni, in linea con l'attuale tendenza al ribasso delle emissioni nette di gas serra in Europa (Figura 2.1).

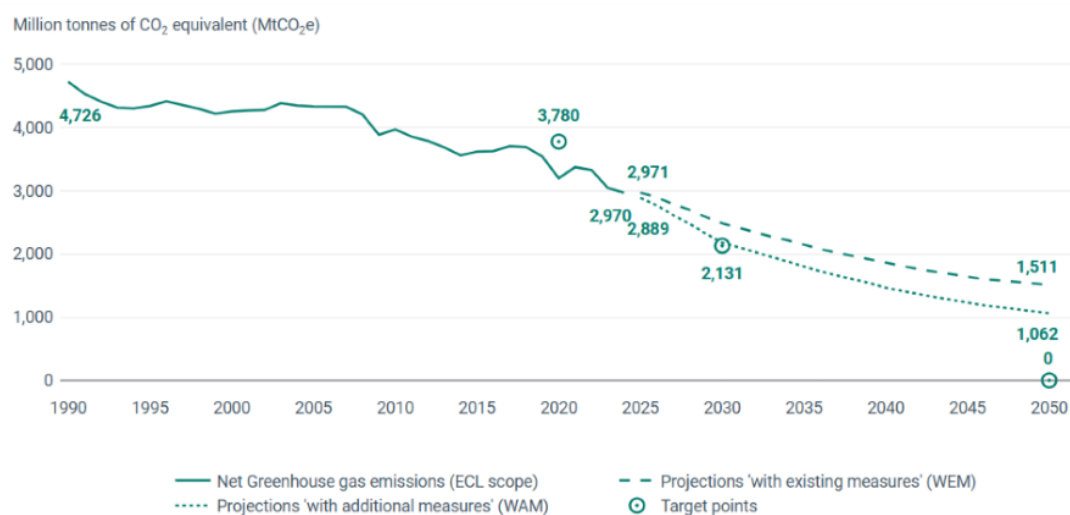


Figura 2.1 - Decremento delle emissioni di CO₂ in UE-27 nel periodo 1990-2024 e proiezione fino al 2050 sia con le misure esistenti (tratteggio ampio) che con misure aggiuntive (tratteggio fino). Fonte: European Environment Agency (2026).

Analizziamo brevemente ciascuna di esse. Una pietra miliare della politica climatica dell'UE è l'EU ETS, un sistema *cap-and-trade* che prevede che venga fissato un limite massimo alle emissioni di gas serra per specifici settori industriali ed energetici (*cap*), mentre le aziende dapprima ricevono e poi acquistano quote di emissione che possono scambiarsi sul mercato (*trade*), incentivando così all'abbattimento della CO₂ e favorendo il raggiungimento della neutralità carbonica attraverso la spinta all'uso di tecnologie pulite.

Dalla sua introduzione nel 2005, l'EU ETS ha coperto circa il 40% delle emissioni di gas serra dell'UE e ha contribuito a una riduzione di circa il 47% delle emissioni di questi settori entro il 2023 rispetto ai livelli del 2005 (ICAP, 2025). È importante sottolineare che, come mostra la Figura 2.2, la diminuzione delle emissioni dovuta alla transizione verso un paradigma industriale più pulito non ha influenzato la crescita economica in termini di PIL, che ha continuato ad aumentare costantemente anche dopo l'introduzione dell'ETS.

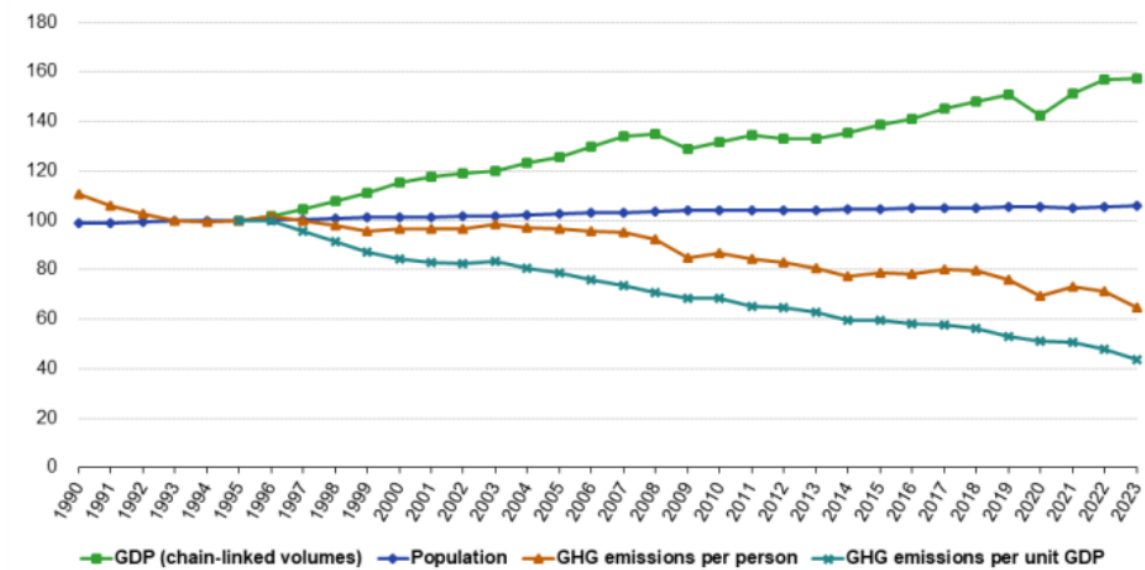


Figura 2.2 - Dinamiche di PIL, popolazione, emissioni di CO2 per persona, ed emissioni di CO2 per unità di PIL nell'UE dal 1990 al 2023. Fonte: European Environment Agency (2026).

Il sistema mira ora a raggiungere una riduzione del 62% delle emissioni di gas serra nei settori coperti dall'ETS entro il 2030 rispetto ai livelli del 2005.

Sulla base di questo meccanismo, l'UE ha introdotto un sistema parallelo denominato EU ETS2 (Direttiva 2023/959) per estendere il mercato del carbonio a settori precedentemente non contemplati, in particolare ai fornitori di combustibili utilizzati per produrre energia per l'edilizia privata e pubblica, per il trasporto su strada, e dalle piccole imprese. Questi settori contribuiscono con una quota consistente alle emissioni di CO2 e hanno registrato progressi più lenti nella decarbonizzazione (EEA, 2023; EEA, 2024; EEA, 2025). L'attuazione dell'ETS2, inizialmente prevista per il 2027, è stata posticipata al 2028. Il motivo principale del rinvio è da rintracciare nelle preoccupazioni, rivendicate da alcuni governi degli Stati membri, relative agli effetti distributivi dell'ETS2 che, in quanto sistema che impatta sui prezzi dell'energia, richiederebbe misure di compensazione sociale per le famiglie e le piccole imprese (misure peraltro già previste dal *Fondo Sociale per il Clima*).

A completamento del quadro regolatorio del mercato del carbonio europeo, il meccanismo di adeguamento carbonico alle frontiere, ovvero il *Carbon Border Adjustment Mechanism*, noto come CBAM (Regolamento (UE) 2023/956), integra l'EU ETS e il futuro ETS2 applicando il prezzo del carbonio a determinate importazioni in base alle loro emissioni incorporate, estendendo così il principio dell'EU ETS oltre i confini dell'Unione, al fine di ridurre il rischio di rilocalizzazione delle emissioni di carbonio .

La transizione verde del settore energetico è promossa non solo nel contesto dell'ETS e dell'ETS2, ma anche attraverso le altre due direttive EED e RED, che mirano a ridurre le emissioni settoriali e, di conseguenza, il rischio climatico fisico, riducendo al contempo l'esposizione alle fluttuazioni del mercato energetico.

La prima iniziativa, in ordine cronologico, è la direttiva sull'efficienza energetica (EED) (UE) 2023/1791. Tale direttiva definisce il quadro generale della politica europea in materia di efficienza energetica, introducendo obiettivi più ambiziosi di riduzione dei consumi e imponendo agli Stati membri specifici obblighi di risparmio energetico. In particolare, l'obiettivo a breve termine consiste nel ridurre il consumo energetico dell'Unione europea dell'11,7% entro il 2030 (European Union, 2023). La EED si pone in sinergia con la direttiva sulla prestazione energetica degli edifici (EPBD) (UE) 2024/1275 (cd. "Case Green"), che rappresenta l'applicazione settoriale degli obiettivi di efficientamento al comparto edilizio, responsabile di circa il 40% del consumo energetico finale e del 36% delle emissioni di gas serra in Europa. La EPBD introduce, infatti, requisiti specifici per gli edifici, stabilendo che, a partire dal 2028, tutti gli edifici pubblici di nuova costruzione dovranno essere a emissioni zero, obbligo esteso a tutti i nuovi edifici dal 2030. Inoltre, entro il 2030, il 16% degli edifici non residenziali con le peggiori prestazioni energetiche dovrà essere ristrutturato, percentuale che salirà al 26% entro il 2033 (European Union, 2024).

La seconda direttiva è la Direttiva sulle energie rinnovabili (RED) (UE) 2023/2413, che stabilisce un obiettivo vincolante secondo cui le fonti di energia rinnovabile dovranno rappresentare almeno il 42,5% del consumo energetico finale dell'UE entro il 2030 (European Union, 2023). Lo scopo della misura è di diminuire la dipendenza del continente dai combustibili fossili; dal punto di vista del rischio, l'aumento della quota delle energie rinnovabili dovrebbe contribuire a ridurre il rischio climatico fisico a lungo termine, mitigando al contempo i rischi associati alle interruzioni dell'approvvigionamento di combustibili fossili importati.

Oltre alle politiche di mitigazione, l'UE ha anche sviluppato un approccio all'adattamento attraverso la Strategia dell'UE sull'adattamento ai cambiamenti climatici (European Commission, 2021). La strategia mira ad aiutare gli Stati membri ad affrontare gli impatti dei cambiamenti climatici in atto, anziché concentrarsi esclusivamente sulle future riduzioni delle emissioni. In pratica, incoraggia l'uso di dati climatici più accurati e sostiene l'inclusione del rischio climatico nelle decisioni di pianificazione, specialmente in settori quali le infrastrutture e l'uso del suolo (LULUCF).

La strategia riconosce che gli eventi estremi stanno diventando e sono destinati a diventare sempre più frequenti (vedi Cap. 1) e sempre più costosi, e che i soli fondi

governativi potrebbero non essere sufficienti a coprire i danni che ne derivano (European Commission, 2021). Per far fronte a questa situazione, sottolinea l'importanza dei programmi assicurativi e dei meccanismi di condivisione del rischio. Ad esempio, suggerisce di ampliare la copertura assicurativa contro le catastrofi naturali e di incoraggiare i paesi a sviluppare sistemi assicurativi pubblico-privati. Menziona inoltre l'utilizzo di strumenti finanziari dell'UE, come il Fondo di solidarietà, che fornisce assistenza finanziaria ai paesi colpiti da gravi catastrofi. In aggiunta, sostiene l'integrazione dei rischi climatici nei finanziamenti per le infrastrutture e lo sviluppo regionale, affinché gli investimenti siano più resilienti fin dall'inizio. Infine, la strategia promuove lo sviluppo di sistemi di allerta precoce e di strumenti di gestione del rischio di catastrofi, che possono contribuire a ridurre i danni, migliorando la preparazione e la risposta agli eventi avversi inattesi.

Gli sviluppi sopra descritti illustrano come la politica climatica europea interagisca sempre più con i sistemi economici e finanziari. Le misure normative adottate nell'ambito del *Green Deal* europeo influenzano le decisioni di investimento delle imprese e della cittadinanza degli Stati membri. Questo perché l'esposizione crescente delle economie europee ai rischi climatici evidenzia l'importanza di valutare le implicazioni finanziarie dei rischi ambientali.

In risposta a queste sfide, l'UE ha introdotto una serie di strumenti normativi per integrare le considerazioni di sostenibilità nei mercati finanziari. Tra questi figurano il regolamento sui requisiti patrimoniali CRR (Regolamento (UE) 575/2013) e la direttiva sui requisiti patrimoniali CRD (Direttiva 2013/36/UE), la direttiva Solvency II (Direttiva 2009/138/CE), il regolamento UE sulla tassonomia (Regolamento (UE) 2020/852), che istituisce un sistema di classificazione per le attività sostenibili dal punto di vista ambientale, la direttiva sulla rendicontazione di sostenibilità delle imprese (CSRD) (Direttiva (UE) 2022/2464), che amplia gli obblighi di informativa delle imprese in materia di rischi e impatti ambientali, e il Regolamento sulla divulgazione di informazioni relative alla sostenibilità nel settore dei servizi finanziari (SFDR) (Regolamento (UE) 2019/2088), che introduce requisiti di trasparenza per gli operatori dei mercati finanziari.

La sezione seguente esamina questi strumenti normativi e il loro ruolo nel favorire l'integrazione delle considerazioni relative al rischio climatico nel processo decisionale finanziario.

2.2 Il quadro normativo dell'UE sulla finanza sostenibile per il rischio climatico

Il crescente corpus di legislazione europea in materia di clima ha progressivamente superato il suo mandato ambientale originario per esercitare un'influenza sostanziale

sui sistemi economici e finanziari. Infatti, gli obiettivi di riduzione delle emissioni, il sistema di scambio delle emissioni ETS, e i vincoli normativi settoriali adottati nell'ambito del Green Deal europeo hanno introdotto adeguamenti strutturali che incidono sulla redditività a lungo termine delle imprese (Zetzsche et al., 2020). Questi adeguamenti hanno implicazioni significative per il settore finanziario, in particolare per gli istituti bancari e le compagnie assicurative che sono esposti alle performance degli attori economici interessati.

Il *Network for Greening the Financial System* (NGFS) ha svolto un ruolo chiave nello sviluppo di linee guida metodologiche per queste analisi. L'NGFS è una coalizione internazionale di banche centrali e autorità di vigilanza finanziaria istituita nel 2017 per rafforzare il ruolo del sistema finanziario nella gestione dei rischi legati al clima. Al 2025, l'NGFS comprende 144 banche centrali e autorità di vigilanza finanziaria, con la European Central Bank come membro permanente. Un contributo fondamentale dell'NGFS è lo sviluppo dell'analisi degli scenari climatici, che combina la modellizzazione macroeconomica con i percorsi climatici per valutare le implicazioni dei rischi sia fisici che di transizione per l'attività economica e la stabilità finanziaria. Gli scenari includono traiettorie alternative, quali: la transizione ordinata (basso rischio fisico e transizionale), la transizione disordinata (basso rischio fisico, alto rischio transizionale), lo scenario "too little, too late" (alto rischio fisico e transizionale) e quello del "mondo serra" (alto rischio fisico, basso rischio transizionale). Essi sono ampiamente utilizzati negli stress test climatici da parte delle banche centrali e delle autorità di vigilanza per valutare i potenziali impatti sul rischio di credito.

Secondo gli scenari dell'NGFS, le politiche climatiche globali vigenti risultano insufficienti a raggiungere gli obiettivi dell'Accordo di Parigi in materia di mitigazione dell'aumento delle temperature. Con l'attuale andamento, entro il 2100 si registrerà un aumento delle temperature di 3 °C, il che, in termini di rischi climatici, comporterebbe un calo della produttività del lavoro in media del 10% a livello globale, un aumento dei danni annuali previsti causati dalle inondazioni fluviali di tre volte in India e del doppio in Cina e Germania rispetto ai livelli del 2020, un aumento dei danni causati dai cicloni tropicali fino al 47%, una perdita del PIL globale dovuta a rischi acuti (ad esempio, inondazioni, cicloni tropicali, ondate di calore e siccità) di oltre l'8% entro la metà del secolo, mentre il cambiamento graduale delle condizioni climatiche potrebbe ridurre il PIL globale di oltre il 15% entro il 2050 (NGFS, 2025).

Dunque, le iniziative normative dell'UE sono motivate dal crescente riconoscimento dei rischi climatici come potenziale fonte di instabilità finanziaria. Un importante sviluppo concettuale in questa evoluzione normativa è il trattamento del rischio climatico come fattore trasversale alle categorie tradizionali di rischio finanziario, anziché come classe di rischio a sé stante. Infatti, i pericoli legati al clima possono incidere sul sistema finanziario attraverso molteplici canali.

In generale, come vedremo in dettaglio nei prossimi capitoli, gli eventi meteorologici estremi possono danneggiare i beni fisici e interrompere l'attività economica, mentre i cambiamenti normativi legati alla decarbonizzazione possono alterare la redditività e la valutazione di determinati settori. Sia i rischi di transizione, determinati dai cambiamenti politici e tecnologici, sia i rischi fisici, derivanti dai pericoli climatici, incidono sull'economia reale attraverso perdite di reddito e costi di adattamento, e sul sistema finanziario attraverso maggiori costi di finanziamento ed effetti di contagio (ECB 2025; ECB, 2026). Queste pressioni generano perdite private e lacune assicurative, che possono ripercuotersi sul settore pubblico attraverso misure fiscali, sostegno finanziario a banche e assicuratori e un aumento della spesa per i soccorsi in caso di calamità e per le infrastrutture (ECB, 2020). Di conseguenza, i rischi climatici si traducono in rischi per il debito sovrano, creando circuiti di retroazione che possono incidere sulla sostenibilità del debito e aumentare i costi di finanziamento del governo (vedi Cap. 4).

La trasmissione finanziaria del rischio di transizione avviene principalmente attraverso i canali del rischio di credito. Un prezzo del carbonio più rigoroso nell'ambito dell'EU ETS, insieme ai vincoli normativi che incidono sui settori ad alte emissioni, potrebbe erodere la capacità di rimborso dei mutuatari esposti, aumentando così le probabilità di insolvenza. Parallelamente, il calo delle valutazioni degli attivi nei settori ad alta intensità di carbonio potrebbe incidere sulla qualità e sul valore di recupero delle garanzie, con conseguenze negative sulla perdita in caso di insolvenza (ECB, 2020; EBA, 2020; EBA, 2021).

I rischi fisici costituiscono un canale di trasmissione complementare, con diverse implicazioni, tra cui il deterioramento diretto delle attività produttive e dei flussi di reddito dei mutuatari, il deterioramento della qualità del credito e, di conseguenza, l'amplificazione del rischio sistemico nel settore bancario (ECB, 2020).

Il settore assicurativo è esposto a rischi attraverso canali distinti ma correlati tra loro. Sul lato delle passività, la crescente frequenza e gravità degli eventi meteorologici estremi si traducono in un aumento dei sinistri e delle perdite di sottoscrizione. Sul fronte delle attività, gli assicuratori devono affrontare rischi di valutazione derivanti da portafogli di investimento concentrati in settori vulnerabili ai rischi di transizione. La convergenza di queste dinamiche su entrambi i lati del bilancio degli assicuratori introduce rischi correlati che sollevano preoccupazioni sulla solvibilità e sulla capacità di determinare il prezzo del rischio a lungo termine (EIOPA, 2022).

Pertanto, le autorità di regolamentazione europee hanno progressivamente integrato le considerazioni relative al clima nei quadri prudenziali che disciplinano sia le banche sia le imprese di assicurazione. Nel settore bancario, la Guida della European Central Bank sui rischi legati al clima e all'ambiente (ECB, 2020) funge da documento di vigilanza fondamentale che stabilisce chiare aspettative per gli istituti significativi

nell'ambito del Meccanismo Unico di Vigilanza (SSM). La guida delinea 13 aspettative di vigilanza su come le banche dovrebbero identificare, gestire e divulgare i rischi climatici e ambientali rilevanti; in particolare, ci si aspetta che gli enti sottoposti a vigilanza:

- integrino i rischi legati al clima e all'ambiente nelle strutture di governance e nei quadri di gestione del rischio;
- includano le considerazioni climatiche nei processi di valutazione del rischio di credito e negli standard di concessione dei prestiti;
- conducano analisi di scenario prospettiche ed esercizi di stress test climatici;
- migliorino le pratiche informative relative al clima in conformità ai requisiti normativi applicabili.

Queste aspettative di vigilanza sono rafforzate e integrate dall'EBA, che ha inserito il rischio climatico nelle proprie Linee guida sulla concessione e il monitoraggio dei prestiti (EBA, 2020) e sta progressivamente integrando le considerazioni relative al rischio ambientale nel regolamento sui requisiti patrimoniali (CRR - Regolamento (UE) 575/2013) e nella direttiva sui requisiti patrimoniali (CRD - Direttiva 2013/36/UE), che insieme costituiscono il pacchetto CRD IV/V/VI di riferimento delle norme prudenziali dell'UE per le banche e le imprese di investimento, che attuano gli standard di Basilea III/IV .

Nel settore assicurativo, la risposta normativa si inserisce principalmente nell'ambito della sopracitata direttiva Solvency II (direttiva 2009/138/CE), che all'articolo 44 richiede «*piani specifici per monitorare e affrontare i rischi finanziari derivanti da fattori di sostenibilità*». L'European Insurance and Occupational Pensions Authority (EIOPA) ha chiarito che i rischi legati al clima devono essere sistematicamente integrati nei processi di valutazione interna dei rischi e della solvibilità (ORSA), anche attraverso l'analisi di scenari a lungo termine e di proiezioni prospettiche dei rischi.

L'EIOPA ha inoltre condotto stress test dedicati al clima per gli assicuratori europei, l'ultimo dei quali nel 2022, che hanno rivelato una significativa eterogeneità nella vulnerabilità degli assicuratori agli shock legati al clima. L'esercizio ha evidenziato che uno scenario di transizione disordinata, combinato con crescenti perdite dovute a catastrofi naturali, potrebbe incidere in modo significativo sia sulla redditività della sottoscrizione che sulle valutazioni degli attivi, con implicazioni per l'adeguatezza patrimoniale ai sensi della formula standard di Solvency II e dei modelli interni (EIOPA, 2022).

Un presupposto fondamentale per l'integrazione efficace del rischio climatico nel processo decisionale finanziario è la disponibilità di dati coerenti. A questo proposito, una serie di iniziative normative dell'UE svolge un ruolo centrale nel migliorare la trasparenza a livello sia delle entità finanziarie sia di quelle non finanziarie.

Una delle componenti centrali del quadro UE per la finanza sostenibile è il regolamento UE sulla tassonomia (UE) 2020/852, che istituisce un sistema di classificazione per identificare le attività economiche sostenibili dal punto di vista ambientale. La tassonomia comprende attività in diversi settori con un impatto significativo sul clima, tra cui energia, produzione, trasporti, edilizia e immobiliare, gestione delle risorse idriche e dei rifiuti, nonché tecnologie dell'informazione e della comunicazione.

Il regolamento fornisce una definizione condivisa di sostenibilità, riducendo il rischio di greenwashing nei mercati finanziari. Detto questo, è importante notare che il regolamento sulla tassonomia dell'UE non fornisce un'etichetta di sostenibilità per le imprese, ma piuttosto un quadro di classificazione che quantifica la quota di attività economiche allineate agli obiettivi ambientali, sostenendo così le decisioni di investimento e la valutazione del rischio climatico. In questo modo, il regolamento incentiva la riallocazione del capitale sulle attività in linea con la transizione dell'UE verso un'economia climaticamente neutra.

Il quadro è strutturato attorno a 6 obiettivi ambientali: mitigazione dei cambiamenti climatici, adattamento ai cambiamenti climatici, uso sostenibile e protezione delle risorse idriche e marine, transizione verso un'economia circolare, prevenzione e controllo dell'inquinamento, protezione e ripristino della biodiversità e degli ecosistemi (European Union, 2020).

Oltre ai 6 obiettivi ambientali, esistono 4 condizioni generali che un'attività economica deve soddisfare per essere considerata sostenibile: contribuire in modo sostanziale ad almeno un obiettivo ambientale; non arrecare un danno significativo a nessuno degli altri cinque obiettivi ambientali; rispettare le garanzie minime; rispettare i criteri di screening tecnico stabiliti negli atti delegati della tassonomia (European Commission, 2025).

Per garantire che un'attività economica contribuisca in modo sostanziale ad almeno un obiettivo ambientale, evitando al contempo di arrecare un danno significativo agli altri, l'UE definisce requisiti di prestazione specifici, noti come criteri di screening tecnico. Tali criteri sono stabiliti tramite atti delegati e fissano soglie e condizioni dettagliate che le attività devono soddisfare per essere considerate sostenibili dal punto di vista ambientale. Esempi di criteri di screening tecnico includono limiti di intensità delle emissioni per la produzione di energia elettrica inferiori a 100 g di CO₂ per kWh, un risparmio energetico minimo di almeno il 30% nelle ristrutturazioni edilizie nel settore delle costruzioni o emissioni dirette di CO₂ pari a zero (0 g/km) per i veicoli passeggeri nel settore dei trasporti.

Una caratteristica fondamentale della tassonomia dell'UE è la distinzione tra attività ammissibili alla tassonomia, non ammissibili e allineate alla tassonomia. Mentre l'ammissibilità indica l'esposizione a settori rilevanti per la transizione, l'allineamento

riflette la conformità agli standard di sostenibilità dell'UE. Il divario tra i due offre una visione dei progressi di transizione delle imprese e della potenziale esposizione ai rischi legati al clima.

Ai sensi della direttiva sulla rendicontazione di sostenibilità delle imprese (CSRD), le società sono tenute a fornire informazioni nelle loro relazioni annuali sulla percentuale delle loro attività che rientrano nell'ambito di applicazione della tassonomia dell'UE e sulla misura in cui tali attività soddisfano i criteri stabiliti negli atti delegati. Ciò comporta la distinzione tra le attività che rientrano nel quadro della tassonomia e quelle che rispettano pienamente i suoi requisiti ambientali.

Naturalmente, la CSRD non serve solo a comunicare alle autorità di regolamentazione in che misura le aziende si allineano alla tassonomia dell'UE. La sostenibilità aziendale è presente nel quadro dell'UE dall'inizio degli anni 2000 con il *Libro verde sulla responsabilità delle imprese*. È stata rafforzata attraverso la CSRD adottata nel 2022 ed entrata in vigore nel gennaio 2023: la direttiva estende l'ambito della rendicontazione di sostenibilità a circa 50.000 aziende operanti nell'UE, estensione poi ridotta applicando l'obbligo alle circa 10.000 aziende più grandi (escludendo le aziende con meno di 10 dipendenti e/o meno di €20 milioni di fatturato netto) attraverso l'approvazione del Pacchetto Omnibus (Direttiva UE 2026/470), pubblicato nella Gazzetta Ufficiale il 26 febbraio 2026. Un concetto centrale introdotto dalla direttiva è la doppia materialità: le imprese devono riferire sia su come i rischi ambientali incidono sui loro risultati finanziari, sia su come le loro attività incidono sull'ambiente. Questo approccio amplia l'ambito della rendicontazione aziendale combinando le prospettive finanziarie e ambientali. L'attuazione della direttiva si basa sugli standard europei di rendicontazione sulla sostenibilità (ESRS) sviluppati dal Gruppo consultivo europeo per l'informativa finanziaria. Questi standard definiscono requisiti di informativa dettagliati, compresa l'esposizione al rischio climatico.

A completamento del quadro normativo, il Regolamento sulla divulgazione di informazioni in materia di sostenibilità nel settore dei servizi finanziari (SFDR), adottato nel 2019, introduce obblighi di informativa per gli operatori dei mercati finanziari e i consulenti finanziari (European Union, 2019). In particolare, il regolamento richiede alle istituzioni di spiegare in che modo i rischi ambientali, sociali e di governance sono integrati nelle decisioni di investimento e nella gestione del portafoglio. Nel quadro dell'SFDR, i prodotti finanziari sono classificati in base alle loro caratteristiche di sostenibilità, in modo da fornire agli investitori una comprensione più chiara di come i fattori di sostenibilità siano considerati all'interno delle strategie di investimento.

La tabella 2.1 riassume i principali strumenti politici dell'UE e il loro ruolo nell'affrontare i rischi legati al clima in tutti i settori normativi.

Tabella 2.1: Principali strumenti politici dell'UE relativi al rischio climatico

Strumento politico	Anno	Settore politico	Rilevanza per il rischio climatico	In che modo può ridurre il rischio climatico	Possibili rischi di transizione
Green deal europeo (COM/2019/640)	2019	Quadro strategico	Definisce la direzione generale per la decarbonizzazione e l'integrazione dei rischi	Allinea le politiche climatiche, industriali e finanziarie	Costi di adeguamento per i settori ad alta intensità di carbonio
Legge sul clima dell'UE (Regolamento (UE) 2021/1119)	2021	Governance climatica	Definisce obiettivi vincolanti che delineano i percorsi di transizione	Riduce i rischi fisici a lungo termine attraverso la riduzione delle emissioni	Accelera la pressione di transizione in tutti i settori
EU ETS (Direttiva 2003/87/CE, modificata)	2005 / 2023	Prezzo del carbonio	Strumento fondamentale per la determinazione del prezzo del rischio di transizione nei settori chiave	Incentiva la riduzione delle emissioni tramite il prezzo del carbonio	Attività non recuperabili, costi più elevati per i grandi emettitori
EU ETS2	2023 (attuazione 2028)	Prezzo del carbonio (esteso)	Estende il rischio di transizione agli edifici e ai trasporti	Amplia gli incentivi alla decarbonizzazione	Impatti distributivi su famiglie e PMI
CBAM (Regolamento (UE) 2023/956)	2023	Politica commerciale e climatica	Affronta la rilocalizzazione delle emissioni di carbonio e il rischio esterno di transizione	Allinea il costo del carbonio delle importazioni con l'EU ETS	Attriti commerciali, aumento dei costi dei fattori di produzione
Efficienza energetica (Direttiva 2023/1791/CE)	2023	Politica energetica	Riduce l'esposizione ai rischi energetici e climatici	Riduce la domanda di energia e le emissioni	Costi iniziali di investimento e di conformità

Energie rinnovabili (Direttiva 2023/2413/CE)	2023	Politica energetica	Favorisce l'abbandono dei combustibili fossili	Aumenta la quota di energia rinnovabile	Sfide relative alle infrastrutture e all'integrazione dei sistemi
Strategia dell'UE sull'adattamento ai cambiamenti climatici	2021	Adattamento	Si concentra sui rischi fisici	Migliora la resilienza e la pianificazione	Aumenta le esigenze di investimento e adeguamento
Guida della European Central Bank sui rischi climatici e ambientali	2020	Vigilanza prudenziale	Integra il rischio climatico nelle aspettative di vigilanza per le banche	Migliora la gestione del rischio e l'analisi degli scenari	Implica maggiori costi di conformità
Linee guida sull'erogazione e il monitoraggio dei prestiti (EBA)	2020 (applicate dal 2021)	Vigilanza bancaria	Integra i fattori ESG nelle decisioni di concessione dei prestiti	Migliora la valutazione del rischio di credito e la determinazione dei prezzi	Riduce i prestiti ai settori ad alte emissioni
CRR (Regolamento (UE) n. 575/2013) e CRD (Direttiva 2013/36/CE)	2013 (revisioni in corso)	Regolamentazione e prudenziale (settore bancario)	Incorpora il rischio climatico nei quadri di riferimento relativi al capitale e all'informativa	Rafforza la resilienza e la trasparenza	Pressione sul capitale per le esposizioni ad alta intensità di carbonio
Direttiva Solvency II (Direttiva 2009/138/CE, modificata)	2009 / 2025	Regolamentazione e prudenziale (assicurazioni)	Integra il rischio climatico nella gestione del rischio assicurativo	Migliora la valutazione del rischio e l'adeguatezza patrimoniale	Determina premi più elevati e rischi di lacune nella copertura

Tassonomia dell'UE (Regolamento (UE) 2020/852)	2020	Finanza sostenibile	Identifica le attività sostenibili e l'esposizione alla transizione	Indirizza il capitale verso attività a basse emissioni di carbonio	Un allineamento limitato potrebbe restringere le opzioni di finanziamento
CSRD (Direttiva (UE) 2022/2464)	2022	Reportistica aziendale	Migliora i dati sui rischi e gli impatti climatici	Migliora la trasparenza e la valutazione dei rischi	Onere di rendicontazione, in particolare per le nuove imprese
SFDR (Regolamento (UE) 2019/2088)	2019	Regolamentazione finanziaria	Integra i rischi di sostenibilità nelle decisioni di investimento	Migliora l'informativa e la consapevolezza degli investitori	Incertezza nella classificazione, costi di conformità
Vigilanza climatica della BCE	2020	Vigilanza prudenziale	Integra il rischio climatico nella vigilanza bancaria	Rafforza la gestione del rischio nel settore finanziario	Potenziati le pressioni sul capitale e di adeguamento per le banche

Sebbene questi strumenti normativi siano concepiti a livello dell'UE, i loro effetti sul rischio climatico e sull'adeguamento economico sono, in ultima analisi, determinati dalle caratteristiche specifiche di ciascun paese. La sezione seguente si concentra quindi sull'Italia come caso di studio, analizzando come le politiche climatiche europee si applichino al contesto politico nazionale.

2.3 Rischio climatico e contesto normativo in Italia

Mentre le sezioni precedenti si sono concentrate principalmente sulle politiche di mitigazione, per analizzare il quadro normativo e le sue implicazioni per il rischio di transizione, l'adattamento rimane una componente cruciale della politica climatica, in particolare per i paesi in cui gli impatti fisici dei cambiamenti climatici sono già significativi. Come visto nel Capitolo 1, l'Italia rappresenta un caso rilevante a questo proposito, essendo tra i paesi europei più esposti ai rischi climatici fisici, a causa di una combinazione di fattori geografici e climatici. La sua lunga linea costiera, il territorio montuoso e la concentrazione della popolazione e dell'attività economica in aree esposte contribuiscono a una vulnerabilità diffusa.

Gli sviluppi normativi europei vengono recepiti e integrati a livello nazionale dalla Banca d'Italia e dall'Istituto per la Vigilanza sulle Assicurazioni (IVASS), rispettivamente le autorità di vigilanza bancaria e assicurativa italiane.

La Banca d'Italia ha progressivamente integrato il rischio climatico nel proprio quadro di vigilanza, richiedendo alle banche soggette a vigilanza di valutare le esposizioni legate al clima all'interno dei propri portafogli di credito, di incorporare considerazioni climatiche nei processi di valutazione dell'adeguatezza patrimoniale interna (ICAAP) (un sistema ibrido, radicato nella normativa a livello UE (CRD IV/CRR) ma attuato attraverso la legislazione nazionale e monitorato dalle autorità di vigilanza nazionali o dalla BCE) e di sviluppare capacità di analisi di scenario coerenti con le aspettative di vigilanza della BCE (Banca d'Italia, 2025). D'altronde, le caratteristiche strutturali del sistema bancario nazionale spingono in tale direzione: le banche italiane mantengono esposizioni sostanziali verso le piccole e medie imprese (PMI), che rappresentano circa il 99% delle imprese italiane e una quota significativa del credito bancario totale (Banca d'Italia, 2025). Le PMI nei settori ad alta intensità energetica o sensibili al clima, tra cui l'industria manifatturiera, l'agricoltura e l'edilizia, potrebbero trovarsi ad affrontare un rischio di transizione sproporzionato, data la loro limitata capacità di assorbire gli aumenti dei costi del carbonio o di investire in tecnologie a basse emissioni di carbonio rispetto alle grandi imprese (Conway, 2015).

L'Istituto per la vigilanza sulle assicurazioni (IVASS), in linea con le linee guida dell'EIOPA, ha promosso l'integrazione sistematica del rischio climatico nei processi di gestione del rischio degli assicuratori. Data la già menzionata marcata esposizione dell'Italia ai rischi geofisici e idrometeorologici, il settore assicurativo italiano deve affrontare sfide sostanziali relative alla quantificazione del rischio di sottoscrizione e al progressivo ampliamento del divario di copertura assicurativa (EIOPA, 2025). L'Italia si colloca costantemente tra i paesi europei con la più bassa penetrazione assicurativa per i rischi di catastrofi naturali, con una stima del 95% delle perdite da disastri naturali storicamente non assicurate o sotto assicurate (IVASS, 2024; IVASS, 2025).

Un importante sviluppo politico in questo contesto è l'introduzione di un regime assicurativo obbligatorio contro le catastrofi per le imprese, istituito dalla Legge 30 dicembre 2023, n. 213 (Legge di Bilancio 2024), art. 1 commi 101-111, entrata in vigore nel 2025, che impone una copertura assicurativa contro i rischi di catastrofi naturali a tutte le società registrate in Italia, rappresentando un cambiamento strutturale nell'allocazione del rischio finanziario legato al clima tra il settore pubblico e quello privato. Si prevede che il sistema ridurrà l'esposizione fiscale ai costi delle catastrofi, stimati a circa 4 miliardi di euro all'anno negli ultimi decenni (MIMIT, 2025).

Inoltre, l'Italia ha progressivamente sviluppato il proprio quadro politico di adattamento. La Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (SNAC), adottata nel 2015, ha fornito la prima valutazione completa delle

vulnerabilità nei settori chiave, tra cui l'agricoltura, le risorse idriche e le infrastrutture. A questa strategia ha fatto seguito il Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC), approvato nel dicembre 2023, che rappresenta il principale strumento operativo per integrare il rischio climatico nelle politiche pubbliche. Il PNACC promuove l'inclusione sistematica del rischio climatico nella pianificazione territoriale, nella gestione dei bacini idrografici e nelle decisioni di investimento nelle infrastrutture per ridurre l'esposizione. Inoltre, sostiene l'uso di soluzioni basate sulla natura, come il ripristino degli ecosistemi per la prevenzione delle inondazioni, e incoraggia il rafforzamento dei sistemi di allerta precoce per migliorare la preparazione e la gestione del rischio.

Allo stesso tempo, l'Italia si affida a strutture consolidate di gestione del rischio di catastrofi, in particolare al sistema della Protezione Civile, che svolge un ruolo centrale nella risposta agli eventi estremi. Tuttavia, questo approccio rimane in parte reattivo ed è associato a costi fiscali significativi, rafforzando la necessità di misure preventive e anticipate più incisive.

Il monitoraggio scientifico e la disponibilità dei dati sono componenti chiave del quadro. L'ISPRA fornisce indicatori climatici e valutazioni dei rischi, mentre strumenti come la piattaforma IdroGEO offrono una mappatura dettagliata dell'esposizione a frane e alluvioni su tutto il territorio nazionale. Questi strumenti supportano una pianificazione basata su dati concreti e consentono ai responsabili politici di identificare le aree prioritarie di intervento.

Parallelamente, gli investimenti legati al clima sono sostenuti attraverso il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), che include misure volte a migliorare la resilienza delle infrastrutture, la gestione delle risorse idriche e la prevenzione dei rischi.

La Tabella 2.2 che segue riassume i tratti principali degli strumenti regolatori passati in rassegna.

Tabella 2.2: Principali strumenti politici italiani relativi al rischio climatico

Strumento politico	Anno	Settore politico	Rilevanza per il rischio climatico	In che modo può ridurre il rischio climatico	Possibili rischi di transizione

Banca d'Italia - Processo di valutazione dell'adeguatezza a patrimoniale interna (ICAAP)	In corso (linee guida aggior nate)	Vigilanza prudenziale (settore bancario)	Integra il rischio climati co nella valutaz ione del capital e interno delle banche	Migliora l'identific azione dei rischi	Richiede un mag giore capitale
Linee guida IVASS sul rischio climatico	2023	Vigilanza prudenziale (assicurazioni)	Promu ove l'integr azione del rischio climati co nella govern ance	Migliora la valutazione del rischio e la pianificazione della solvibilità	Determina prem i più elevati
Legge italiana n. 213/2023 (quadro normativo sul rischio di catastrofi)	2023	Gestione del rischio f inanziario	Affront a l'espos izione al rischio di catastr ofi natural i e le lacune	Amplia la condivisione del rischio e la copertura assicurativa	Aumenta i costi per le imprese

			assicurative		
Strategia nazionale di adattamento (SNAC)	2015	Politica di adattamento	Identifica le vulnerabilità settoriali ai rischi fisici	Fornisce un quadro di riferimento per la pianificazione dell'adattamento in tutti i settori	Attuazione limitata a livello regionale/locale
Piano nazionale di adattamento (PNACC)	2023	Politica di adattamento	Integra il rischio climatico nelle politiche e nella pianificazione pubblica	Promuove la resilienza attraverso misure di pianificazione, prevenzione e adattamento	Richiede ingenti investimenti pubblici e coordinamento
Piani di gestione dei bacini idrografici	2000	Gestione delle risorse idriche	Affronta i rischi di alluvioni e siccità	Migliora la governance idrica e le misure di prevenzione delle inondazioni	Sfide di coordinamento tra le regioni
Sistema di protezione civile	1992	Gestione del rischio di catastrofi	Risponde agli eventi meteorologici estremi	Riduce gli impatti immediati attraverso la risposta alle emergenze e la preparazione	Costi fiscali elevati e approccio reattivo

Piattaforma Idr oGEO (ISPRA)	2020	Monitoraggio / dati	Fornisce una mappa dettagliata dei rischi di frane e inondazioni	Supporta l'identificazione dei rischi e la pianificazione basata su dati concreti	L'efficacia dipende dall'utilizzo locale dei dati
Piano nazionale di ripresa e resilienza (PNRR)	2021	Investimenti pubblici	Sostiene la resilienza climatica e l'adattamento delle infrastrutture	Finanzia progetti di gestione delle risorse idriche, infrastrutture e prevenzione dei rischi	Rischi di esecuzione e limiti di capacità amministrativa

La politica di adattamento dell'Italia fornisce una sintesi della strategia europea complessiva, volta a garantire che i rischi legati al cambiamento climatico siano presi in considerazione nei processi decisionali economici e finanziari, ed evidenzia i rischi specifici associati al territorio italiano.

Tutti i progressi compiuti, però, non riescono a placare le preoccupazioni relative all'effettiva attuazione di queste misure, all'adeguatezza dei finanziamenti e al modo in cui i governi nazionali e regionali svolgono le loro funzioni di coordinamento.

Il successo delle misure volte ad affrontare gli effetti del cambiamento e ad attuare misure concrete di adattamento dipende in gran parte dalla capacità delle istituzioni di adattare le azioni nazionali, definite a un livello superiore, alle condizioni particolari di ciascun luogo e di coniugarle su scala locale. Di qui la necessità che la politica climatica europea si concentri non soltanto sulla mitigazione, che resta fondamentale, ma anche sull'aumento degli investimenti nell'adattamento e sullo sviluppo del settore assicurativo e dei meccanismi di condivisione del rischio.

Capitolo 3: Gli impatti futuri dei cambiamenti climatici e le loro conseguenze sociali ed economiche

Dopo aver delineato nel Capitolo 1 l'evoluzione attesa delle condizioni climatiche e nel Capitolo 2 analizzato il contesto normativo europeo e italiano, questo Capitolo esamina i principali canali attraverso cui tali cambiamenti si trasmettono all'economia e alla società italiana. L'obiettivo non è sommare danni settoriali eterogenei, ma identificare i meccanismi di impatto più rilevanti e i relativi ordini di grandezza. Le stime riportate di seguito illustrano quindi esposizioni, vulnerabilità e possibili costi economici, ma non devono essere sommate meccanicamente né interpretate come direttamente comparabili alle stime aggregate di PIL e debito presentate e discusse nel Capitolo 4. In particolare, le perdite settoriali documentate in questo capitolo non sono input della funzione di danno macroeconomica utilizzata nel Capitolo 4: i due capitoli adottano approcci complementari ma metodologicamente distinti. Il Capitolo 3 ricostruisce i canali di impatto settore per settore a partire da letteratura specialistica eterogenea per metodo, perimetro e orizzonte temporale; il Capitolo 4 stima invece l'effetto aggregato sul PIL applicando una funzione di danno calibrata empiricamente sulla relazione storica fra temperatura e crescita economica.

3.1 Impatti economici settoriali

3.1.1 Infrastrutture

3.1.1.a I rischi per le infrastrutture e lo sviluppo economico

Il cambiamento climatico è destinato ad alterare in modo sostanziale le condizioni operative delle infrastrutture italiane. Gli esempi sono già noti: deformazione dei binari ferroviari dovuta all'espansione termica, effetti a catena innescati dal ribaltamento di gru nei porti durante eventi di vento estremo, riduzione della produzione energetica in condizioni di siccità, interruzioni della mobilità e dei servizi essenziali durante ondate di calore o alluvioni.

Il tema è stato affrontato in modo sistematico dal Comitato istituito presso il Ministero delle Infrastrutture nel 2021, che nel 2022 ha prodotto un rapporto dettagliato sugli impatti climatici sulle infrastrutture italiane e sulle possibili misure di resilienza (Carraro, 2022). Da allora, tuttavia, il quadro climatico si è ulteriormente aggravato. All'inizio degli anni Duemila il superamento della soglia di +1,5 °C era collocato intorno al 2040; oggi il riscaldamento globale è già vicino a +1,4 °C e la soglia di +1,5 °C potrebbe essere raggiunta entro la fine di questo decennio (ECMWF, 2024). In Europa il riscaldamento ha già superato i +2,1 °C rispetto agli anni Ottanta, circa il doppio della

media globale, mentre in molte città italiane le temperature medie annue sono aumentate di quasi 1 °C negli ultimi trent'anni e le notti tropicali sono diventate più frequenti (EEA, 2024; Spano et al., 2021).

Il sistema infrastrutturale italiano, articolato in reti idriche, energetiche, di trasporto, telecomunicazione e logistica, rappresenta la spina dorsale della vita economica e sociale del Paese. La sua esposizione a rischi climatici multipli è in rapida crescita. Alle ondate di calore, alle precipitazioni intense, alle frane, alla siccità e agli incendi si sommano fenomeni più lenti ma strutturali, come l'innalzamento del livello del mare, la salinizzazione delle falde e la subsidenza, che minacciano porti, tratte costiere e infrastrutture urbane (Forzieri et al., 2025).

La criticità non dipende soltanto dall'intensità dei singoli eventi, ma anche dal carattere sistemico dei rischi. Le infrastrutture non sono compartimenti stagni: un'interruzione della rete elettrica può compromettere trasporti, comunicazioni, distribuzione dell'acqua potabile e funzionalità degli ospedali; allo stesso modo, guasti nella mobilità o nelle reti digitali possono amplificare gli impatti di uno shock climatico su scala urbana e territoriale. Le infrastrutture vanno quindi lette come sistemi interconnessi, fisici e cognitivi, che interagiscono con dati, regolazione e capacità amministrativa (Forzieri et al., 2025).

Questa interdipendenza è già visibile negli eventi recenti. L'alluvione in Emilia-Romagna del 2023 ha interrotto per giorni tratte ferroviarie strategiche, mentre le ondate di calore del 2022 hanno causato blackout diffusi e rallentamenti nella rete ferroviaria dovuti a guasti agli impianti elettrici. Le valutazioni europee collocano proprio queste interdipendenze tra i principali fattori di rischio emergenti, soprattutto in assenza di protocolli condivisi, strumenti predittivi e capacità di coordinamento operativo (Joint Research Center, 2025).

La vulnerabilità delle infrastrutture si distribuisce inoltre in modo diseguale sul territorio nazionale. In molte aree mancano risorse finanziarie, personale tecnico qualificato, piani di adattamento aggiornati e strumenti operativi per tradurre la conoscenza scientifica in interventi concreti. Anche i grandi centri urbani presentano punti critici, soprattutto dove reti datate o congestionate si combinano con elevata pressione antropica. Il *Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* riconosce esplicitamente questi divari, sottolineando che il Centro-Nord dispone in media di maggiori strumenti strategici e amministrativi rispetto a molte aree del Mezzogiorno e delle isole (MASE, 2023; Mercogliano et al., 2026).

La resilienza infrastrutturale non è quindi soltanto una questione tecnica. È una scelta strategica di sviluppo. Rafforzare l'adattamento delle reti esistenti, progettare nuove infrastrutture resilienti e integrare l'obiettivo di mitigazione nella mobilità e nei servizi

significa incidere sulla capacità del Paese di sostenere crescita, coesione territoriale e competitività in un clima che cambia.

3.1.1.b Il costo dell'inazione per le infrastrutture

In questo quadro, il costo dell'inazione è già stimabile in termini economici. Le analisi condotte per il Ministero delle Infrastrutture indicano che il danno annuo diretto (*expected annual damage*, EAD) per le infrastrutture italiane potrebbe aumentare da circa 0,42 miliardi di euro l'anno nel periodo storico 1981-2010 a circa 2 miliardi al 2030 e a circa 5 miliardi al 2050 nello scenario tendenziale dello studio Carraro (2022), corrispondente a RCP4.5. L'incremento più rilevante in valore assoluto riguarda i trasporti, seguiti da energia e sistemi idrici e di gestione dei rifiuti.

Tabella 3.1 - I costi diretti e indiretti dell'inazione per le infrastrutture (miliardi di euro l'anno)

	2020-2030	2050-2070
Trasporti	1,2	2,8
Energia	0,04	0,57
Acqua e rifiuti	0,23	1,6
Totale danni diretti alle infrastrutture	2,06 ± 0,22	5,17 ± 0,46
Totale danni diretti e indiretti	2,3 - 8,7	11,5 - 18,0

Non aumenta solo l'entità del danno: cambia anche la sua composizione. Se nel periodo storico i danni erano associati soprattutto alle esondazioni fluviali, nel periodo 2041-2070 siccità e ondate di calore potrebbero arrivare a rappresentare circa il 92% dei danni climatici, contro il 31% del periodo di riferimento 1981-2010 (Carraro, 2022). Per il settore energia, ad esempio, la riduzione dell'efficienza dei sistemi di raffreddamento delle centrali dovuta all'aumento della temperatura dell'acqua e dell'aria può propagarsi alle infrastrutture che da essa dipendono, come telecomunicazioni e logistica. Nel settore dei trasporti, il calore estremo aumenta il rischio di deformazione delle rotaie e deterioramento del manto stradale, mentre la riduzione dei deflussi fluviali può compromettere la navigabilità delle vie interne. Nei sistemi idrici e di gestione dei rifiuti, l'aumento della temperatura e la variabilità idrologica accrescono le criticità operative e i costi di trattamento.

Ai danni diretti si aggiungono poi i cosiddetti danni indiretti, ossia le ripercussioni macroeconomiche dei guasti e delle interruzioni di servizio. Le stime ottenute con il modello ICES suggeriscono che, nello scenario tendenziale dello studio Carraro (2022),

RCP4.5, e in assenza di ulteriori misure di adattamento o mitigazione, il danno complessivo diretto e indiretto causato dalla perdita o dal danneggiamento di infrastrutture possa variare tra lo 0,1% e lo 0,4% del PIL medio nel decennio 2020-2030 e salire fino allo 0,33%-0,55% del PIL nel 2050 (Carraro, 2022; Forzieri et al., 2025). In valori attuali, ciò equivale a una perdita di capacità produttiva di circa 2,3-8,7 miliardi di euro, destinata a crescere fino a circa 11,5-18 miliardi al 2050. Queste stime non vanno sommate meccanicamente alle perdite macroeconomiche aggregate discusse nella Sezione 4, ma mostrano con chiarezza come le infrastrutture costituiscano uno dei principali canali di trasmissione del rischio climatico all'economia italiana.

La geografia del danno è anch'essa asimmetrica. In termini assoluti, il rischio è più elevato nelle regioni del Nord con maggiore densità di infrastrutture esposte. In termini relativi, l'aumento del rischio climatico è più marcato nelle regioni del Sud, dove l'intensificazione degli estremi legati a temperatura e precipitazioni si combina con minori capacità di adattamento. Il cambiamento climatico rischia quindi di amplificare anche le disuguaglianze economiche regionali (Carraro, 2022; Mercogliano et al., 2026).

3.1.1.c Investimenti e politiche per uscire dall'inazione

Ridurre il costo dell'inazione richiede investimenti in adattamento ormai non più rinviabili. Le stime disponibili indicano che le risorse addizionali, necessarie per l'adattamento delle infrastrutture italiane, potrebbero collocarsi tra 8 e 10 miliardi di euro fino al 2030, pari a circa un miliardo in più all'anno, cui si aggiungono costi operativi e di manutenzione addizionali annui di circa 604 milioni nello scenario tendenziale dello studio Carraro (2022), RCP4.5. Tali costi sarebbero inferiori in uno scenario globale di decarbonizzazione più efficace, ma la loro urgenza non dipende da un successo immediato della mitigazione: anche in scenari relativamente favorevoli, le inerzie climatiche già in atto rendono l'adattamento indispensabile.

Le stime oggi disponibili suggeriscono che il costo dell'adattamento sia circa cinque volte inferiore al danno evitato. In altri termini, un euro investito nella resilienza climatica delle infrastrutture può generare benefici complessivi prossimi a cinque euro entro il 2050, sia sotto forma di danni evitati sia attraverso benefici economici indiretti e minori costi pubblici di ripristino post-evento (Carraro, 2022).

Il problema, tuttavia, non è solo finanziario. Molte infrastrutture esistenti sono state progettate su mappe climatiche storiche che non riflettono più la velocità del cambiamento in atto. Gli Eurocodici, cioè gli standard tecnici europei per la progettazione e la costruzione delle opere civili, sono ancora in fase di aggiornamento per includere in modo sistematico il cambiamento climatico (Polo López et al., 2025). A ciò si aggiunge un ritardo cronico nella manutenzione delle reti esistenti: secondo stime nazionali, oltre un terzo delle infrastrutture pubbliche italiane ha superato i 50 anni di età senza interventi strutturali significativi (Carraro, 2022).

Alle fragilità tecniche si sommano quelle istituzionali e territoriali. La governance dell'adattamento è frammentata tra livelli di governo con competenze spesso sovrapposte o incomplete; i piani esistono, ma faticano a tradursi in progetti attuabili e finanziabili; molti comuni non dispongono di personale tecnico sufficiente per valutare il rischio climatico e tradurlo in priorità operative. Il risultato è una resilienza diseguale: alcune aree del Centro-Nord hanno avviato progetti efficaci, anche grazie al supporto di fondi europei e partenariati pubblico-privati, mentre molte aree interne, costiere e montane del Mezzogiorno restano in ritardo (Mercogliano et al., 2026).

L'adattamento infrastrutturale non può quindi essere considerato un tema marginale della politica ambientale. Deve essere riconosciuto come una priorità strategica di investimento pubblico, pianificazione territoriale e politica industriale. Senza un salto di scala nella qualità dei dati, nella capacità progettuale e nella continuità amministrativa, il Paese rischia di entrare in una traiettoria di regressione infrastrutturale da cui sarebbe difficile uscire.

3.1.2 Acqua e produzioni agricole

Il cambiamento climatico colpisce l'agricoltura italiana anzitutto attraverso la riduzione e la crescente instabilità della base idrica. Nelle Alpi italiane, che alimentano una parte decisiva delle disponibilità primaverili ed estive per pianure e fondovalle, il contenuto idrico del manto nevoso mostra una contrazione di lungo periodo, con i valori più bassi concentrati nelle ultime decadi e nelle code della stagione nivale (Colombo et al., 2022). Le simulazioni sul bacino dell'Aterno-Pescara indicano un aumento delle temperature fino a 0,6 °C per decennio, una riduzione delle precipitazioni di 16,4 mm per decennio e un conseguente calo del deflusso fluviale, accompagnato da siccità meteorologiche e idrologiche più persistenti (Tariq et al., 2024). Anche le riserve sotterranee si indeboliscono: in Toscana settentrionale, ad esempio, le proiezioni segnalano un peggioramento della siccità di falda soprattutto quando si considera l'aumento dell'evapotraspirazione (Secci et al., 2021). A ciò si aggiunge l'erosione della capacità di accumulo artificiale, dato che circa metà dei serbatoi italiani analizzati raggiungerà entro il 2050 la propria *half-life*, ossia il momento in cui la capacità utile di accumulo è ridotta del 50% rispetto a quella di progetto per effetto del progressivo deposito di sedimenti sul fondo dell'invaso (Patro et al., 2022). L'acqua disponibile per l'irrigazione non diminuisce quindi soltanto in media, ma diventa meno regolare, meno accumulabile e più contesa tra usi agricoli, civili ed energetici; nel Mezzogiorno, per esempio, anche il potenziale idroelettrico estivo è proiettato in forte calo (Amaranto et al., 2025).

Dentro questo quadro, i danni alle produzioni agricole non si distribuiscono in modo uniforme. Il Nord-Est, una delle aree più produttive del Paese, sta già evolvendo verso

condizioni più aride; lungo la costa adriatica una parte del territorio potrebbe entrare in classe arida e le risaie risultano tra i sistemi maggiormente esposti, con il 76% della superficie potenzialmente interessata da queste nuove condizioni climatiche (Straffellini e Tarolli, 2023). Le evidenze microeconomiche sulle aziende italiane mostrano inoltre che il mais è già vulnerabile agli aumenti di temperatura ai livelli mediani osservati nel campione, mentre il frumento appare più resistente nel breve periodo; l'adattamento tramite maggiore uso di fertilizzanti compensa solo in parte i danni e perde efficacia quando gli shock termici diventano più intensi (Coughlan et al., 2026). Nel complesso mediterraneo, il fabbisogno irriguo è destinato ad aumentare in media di circa il 13% per il mais, del 16% per il grano e del 10% per la vite (Masia et al., 2021).

Per le colture ad alto valore aggiunto il rischio si manifesta soprattutto come maggiore variabilità, perdita di idoneità e spostamento geografico delle aree più produttive. Per l'olivo, gli anni di resa eccezionalmente bassa sono aumentati dal 2014 e risultano fortemente associati a specifici stress termici (Di Paola et al., 2023), mentre l'aridità crescente rappresenta un rischio strutturale per la produzione olivicola italiana (Orlandi et al., 2020). In Sardegna, la viticoltura mantiene una relativa resilienza solo al prezzo di uno spostamento verso classi di idoneità inferiori, soprattutto nello scenario RCP8.5 (Serra et al., 2025). In Puglia, scarsità idrica e pressione irrigua stanno diventando il vincolo centrale della sostenibilità agricola regionale (Ellena et al., 2025).

Le opzioni di adattamento esistono, ma operano entro margini sempre più stretti. Tecniche di irrigazione più efficienti, integrazione tra telerilevamento e strumenti di supporto alle decisioni, o volumi irrigui ottimizzati per colture come mais e pomodoro possono migliorare la gestione dell'acqua e il bilanciamento tra resa, redditività e sostenibilità (Corbari et al., 2021; Garofalo et al., 2025). Tuttavia, questi aggiustamenti non eliminano il vincolo di fondo, che è una disponibilità idrica più scarsa, più incerta e più costosa.

Quando si guarda alle aziende agricole nel loro complesso, l'adattamento assume forme più onerose e meno lineari. Nelle aziende arabili italiane esposte alla siccità, le risposte osservate includono maggiore ricorso alla falda e riduzione delle superfici irrigate, con effetti economici e distributivi influenzati anche dalle regole della Politica Agricola Comune (Buttinelli et al., 2026). Nelle principali aree agricole del Paese, inoltre, i percorsi di adattamento risultano molto diseguali: alcuni sistemi riescono a difendere meglio la redditività, altri molto meno, e spesso il miglioramento dell'efficienza idrica si accompagna a compromessi su lavoro, reddito o assetto colturale (Cortignani et al., 2021).

In termini di ordine di grandezza, la letteratura più datata ma ancora spesso citata stima che la riduzione delle rese possa tradursi in una perdita del valore della produzione agricola aggregata pari a circa 12,5 miliardi di euro nel 2050 in uno scenario compatibile con RCP2.6, con un possibile aumento fino a 30 miliardi in uno scenario RCP8.5

(McCallum et al., 2013). Queste stime non sono perfettamente comparabili con gli scenari centrali adottati nel presente rapporto, ma restano utili come ordine di grandezza. Il danno, soprattutto alle produzioni pregiate, può inoltre riflettersi in una progressiva perdita di valore fondiario: le stime disponibili indicano deprezzamenti compresi tra l'1% e l'11% in RCP4.5 e tra il 4% e il 16% in RCP8.5 a fine secolo (Bozzola et al., 2018), mentre Van Passel et al. (2017) riportano perdite di valore fondiario fino al 10% per ogni grado di aumento della temperatura.

Tabella 3.2 - Principali perdite economiche stimate per acqua e agricoltura

Misura di perdita economica	Orizzonte/scenario	Stima	Fonte
Perdita del valore della produzione agricola italiana	2050, scenario compatibile con RCP2.6	circa 12,5 miliardi di euro	McCallum et al. (2013)
Perdita del valore della produzione agricola italiana	2050, scenario RCP8.5	fino a 30 miliardi di euro	McCallum et al. (2013)
Deprezzamento del valore fondiario	Fine secolo, RCP4.5	da -1% a -11%	Bozzola et al. (2018)
Deprezzamento del valore fondiario	Fine secolo, RCP8.5	da -4% a -16%	Bozzola et al. (2018)
Riduzione della produzione ittica italiana	Entro il 2030, scenario A1B	-8% / -9%	Spano et al. (2020)

Per questo settore il testo dispone soprattutto di stime in euro o in variazioni percentuali di output e valore fondiario; non emerge ancora una misura robusta e comparabile di perdita in percentuale del PIL nazionale.

Anche allevamento, acquacoltura e pesca risentiranno dei cambiamenti climatici. Secondo stime prodotte da progetti europei, nello scenario A1B dell'IPCC, assimilabile a un RCP4.5 almeno fino al 2050, il settore ittico italiano potrebbe registrare una riduzione della produzione dell'8%-9% già entro il 2030 (Spano et al., 2020). Per l'acquacoltura non esistono stime altrettanto precise, ma il comparto appare esposto perché concentrato in aree costiere vulnerabili, come l'alto Adriatico. Anche bovini e suini risultano particolarmente sensibili alle alte temperature e alla siccità (Spano et al., 2020).

Nel complesso, il cambiamento climatico non impone soltanto tecniche irrigue più efficienti. Impone una riorganizzazione più profonda dei sistemi agricoli, della gestione dell'acqua e delle scelte di investimento, in un contesto in cui la risorsa chiave per la produzione diventa insieme più scarsa, più instabile e più contesa.

3.1.3 Turismo

Il turismo è uno dei principali settori del terziario italiano e una componente rilevante della produzione nazionale. Nel 2019 ha contribuito per il 10,4% al PIL del Paese (WTTC, 2021). È però anche un settore particolarmente sensibile alle condizioni meteorologiche e di comfort climatico. Il cambiamento climatico non si manifesta qui come uno shock unico e lineare, ma come una ricomposizione progressiva della geografia, della stagionalità e dei costi della domanda. Gli effetti passano attraverso catene d'impatto che collegano erosione costiera, stress termico, scarsità idrica, degrado ecosistemico e interruzioni operative, mentre i turisti rispondono spostando il periodo del viaggio, la destinazione o il tipo di attività in modi molto eterogenei tra territori e segmenti di mercato (Arabadzhyan et al., 2021; Gössling e Scott, 2025; Lam-González et al., 2020).

Il rischio, quindi, non coincide semplicemente con una riduzione del volume complessivo di turismo. Riguarda anche la qualità percepita dell'esperienza, la fruibilità fisica degli asset su cui tale esperienza si fonda e i costi necessari per mantenere competitivo il prodotto turistico. In Italia questo significa che i prodotti più dipendenti da condizioni climatiche stabili, come il turismo balneare e quello sciistico, sono esposti a una riallocazione forzata dei flussi e a una maggiore volatilità della redditività.

Le evidenze più solide riguardano le coste, che per il turismo italiano rappresentano insieme un'infrastruttura fisica e un asset economico. Già al 2050 l'erosione potrebbe interessare circa il 70% delle spiagge italiane, mentre un quinto della superficie attuale potrebbe risultare quasi completamente sommersa; a fine secolo la quota salirebbe al 45%, con Sardegna, Campania, Lazio e Puglia esposte a perdite superiori alla metà delle spiagge attrezzate (Celata e Gioia, 2024). In questo caso il danno fisico coincide quasi immediatamente con un danno economico, dato che meno superficie balneabile significa minore capacità ricettiva, minore qualità dell'esperienza e maggiore pressione competitiva tra località. Inoltre, l'adattamento oggi prevalente in Italia resta basato soprattutto su difese rigide che spesso aggravano l'erosione e riducono la resilienza naturale del litorale, mentre le opzioni di arretramento pianificato sono rese più difficili dall'urbanizzazione retrostante.

Il caso della costa adriatica pugliese mostra bene come questi danni si combinino con altri stressori, tra cui aumento dei periodi secchi consecutivi e crescente vulnerabilità dell'attrattività turistica (Parete et al., 2024). Anche il deterioramento del capitale

naturale marino ha una dimensione economica diretta; ad esempio, il contributo della *Posidonia oceanica* al *marine-based tourism* in Italia è stato stimato in circa 6 milioni di euro nel 2019 e 3,7 milioni nel 2021 (Bartolini et al., 2024).

Accanto alla trasformazione degli asset fisici, il cambiamento climatico modifica il calendario stesso della convenienza turistica, cioè i mesi in cui una destinazione riesce a offrire condizioni climatiche considerate piacevoli e competitive. Gli studi sugli indici climatici per il Mediterraneo convergono su una tendenza all'allungamento della stagione favorevole nelle mezze stagioni, mentre i mesi centrali dell'estate diventano più ostili a causa dello stress termico (Demiroglu et al., 2020; Scott et al., 2016; Nam et al., 2024). Per le spiagge mediterranee, ad esempio, le proiezioni indicano che entro fine secolo, nello scenario RCP8.5, luglio e agosto potrebbero registrare circa quattro giorni in più di stress termico "molto forte" e un giorno in più di stress "estremo", pur a fronte di una possibile estensione della stagione balneare verso primavera e autunno (Nam et al., 2024).

In Sardegna, questa riallocazione può tradursi in aumenti di ricavi nelle stagioni intermedie ma perdite estive legate all'aumento delle temperature: l'effetto annuo netto può apparire moderatamente positivo solo al prezzo di una profonda redistribuzione intra-annuale dei flussi e dei ricavi (Köberl et al., 2016). Per il turismo urbano italiano, gli esiti al 2050 su scala comunale restano fortemente eterogenei: uno scenario di forte mitigazione come RCP2.6 può ancora produrre effetti moderatamente favorevoli, mentre gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 comportano conseguenze più severe per l'intensità turistica (Mazzarano et al., 2025).

La misura del rischio dipende anche dal modo in cui viene definito il comfort climatico. La valutazione varia sensibilmente a seconda dell'indice adottato (Scott et al., 2016), e il numero di giorni classificati come soggetti a forte stress termico può differire anche di quattro giorni a seconda della variabile utilizzata per costruire l'indicatore turistico (Velea et al., 2024). Questo punto non è puramente metodologico: una parte dell'adattamento spontaneo potrebbe consistere nello spostamento delle attività verso la sera e la notte, ma proprio per questo diventa essenziale non sottostimare il ruolo delle notti tropicali, che gli indici tradizionali tendono spesso a trascurare (Mnguni e Fitchett, 2025).

Se sulle coste il rischio riguarda perdita di attrattività fisica e comfort, nelle montagne italiane assume sempre più la forma di una crisi di sostenibilità economica dell'offerta. Nell'Appennino sono state censite 101 stazioni sciistiche, di cui solo 28 aperte, mentre 41 risultano chiuse e abbandonate e 32 parzialmente chiuse; nel complesso, le stazioni chiuse o intermittenti rappresentano il 44% dei chilometri di piste disponibili (Bonanomi et al. 2024).

La vulnerabilità non è casuale: le stazioni aperte sono mediamente più alte e più grandi, mentre quelle a bassa quota e di piccola dimensione sono quelle che più spesso perdono sostenibilità economica. Nelle Alpi italiane l'adattamento tramite innevamento artificiale ha finora attenuato parte del danno. In Alto Adige, un aumento di 1 °C delle temperature invernali era storicamente associato a un calo dell'8% degli arrivi, ma questa sensibilità si è ridotta dagli anni Novanta, verosimilmente grazie alla diffusione dell'innnevamento artificiale (Falk e Lin, 2018).

Tuttavia, la letteratura mostra con chiarezza che lo snowmaking non elimina il problema, ma lo sposta dalla disponibilità di neve naturale alla disponibilità di acqua, energia, capitale e soglie minime di redditività. Le simulazioni condotte per il Tirolo indicano che una stagione di 100 giorni resta tecnicamente difendibile fino agli anni 2030-2040 solo assumendo innevamento artificiale esteso all'intero comprensorio; oltre i 3 °C di riscaldamento molte aree diventano però difficilmente sostenibili e la produzione di neve necessaria può aumentare fino a quattro volte (Steiger e Stötter, 2013). Un'analisi su una località alpina svizzera stima inoltre un aumento del 79% dei consumi d'acqua per l'innnevamento entro fine secolo in RCP8.5, segnalando il rischio di conflitti d'uso anche per le destinazioni italiane (Vorkauf et al., 2024).

La scarsità d'acqua è infatti il vincolo trasversale che collega coste, isole, città e montagne. Una rassegna sistematica sul nesso acqua-turismo nel Mediterraneo mostra che il problema non riguarda solo l'efficienza dei consumi alberghieri, ma la governance di sistemi territoriali in cui il turismo compete sempre più direttamente con agricoltura, usi civili ed energia (Ricart et al., 2024). In Sardegna, ad esempio, le simulazioni sulla resilienza di un invaso negli scenari RCP4.5 e RCP8.5 mostrano che anche quando il sistema riesce a mantenere il *refill* lo fa al prezzo di *trade-off* con altri usi, in particolare l'idroelettrico (Mereu et al., 2016).

In termini di ordine di grandezza, alcune stime più datate riportano per l'Italia una riduzione del 15% degli arrivi internazionali in uno scenario di aumento della temperatura di 2 °C e del 21,6% in uno scenario di aumento di 4 °C; includendo anche il comportamento dei turisti nazionali, la domanda totale italiana potrebbe contrarsi del 6,6% e dell'8,9% rispettivamente, con perdite dirette stimate in 17 e 52 miliardi di euro (McCallum et al., 2013). Anche queste stime non sono perfettamente comparabili con gli scenari centrali del presente rapporto, ma restano utili come indicazione del potenziale ordine di grandezza.

Tabella 3.3 - Principali stime di perdita economica e di esposizione fisica per il settore turistico

Misura di perdita economica	Orizzonte/scenario	Stima	Fonte
Contrazione della domanda turistica totale italiana	Scenario di aumento della temperatura di +2 °C	-6,6%	McCallum et al. (2013)
Contrazione della domanda turistica totale italiana	Scenario di aumento della temperatura di +4 °C	-8,9%	McCallum et al. (2013)
Perdite dirette stimate	Scenario di aumento della temperatura di +2 °C	17 miliardi di euro	McCallum et al. (2013)
Perdite dirette stimate	Scenario di aumento della temperatura di +4 °C	52 miliardi di euro	McCallum et al. (2013)
Riduzione degli arrivi internazionali	Scenario di aumento della temperatura di +2 °C / +4 °C	-15% / -21,6%	McCallum et al. (2013)
Perdita fisica dell'asset turistico costiero	2050	erosione su circa il 70% delle spiagge italiane	Celata e Gioia (2024)

Per il turismo disponiamo di stime dirette in euro e in variazione percentuale della domanda, oltre a indicatori di esposizione fisica dell'asset costiero; una misura pulita e omogenea di perdita in percentuale del PIL nazionale non è esplicitata nelle fonti citate nel testo. La voce 'Perdita fisica dell'asset turistico costiero' va letta come indicatore di esposizione (quota di spiagge a rischio erosione), non come perdita economica monetizzata.

Il messaggio di fondo è duplice. Da un lato, il cambiamento climatico non implica necessariamente una contrazione uniforme della domanda turistica: può produrre guadagni relativi in alcune stagioni, in alcuni territori e per alcuni segmenti. Dall'altro, questa apparente compensazione non equivale a una riduzione del rischio, perché può poggiare su costi crescenti di adattamento, maggiore volatilità dei ricavi e una distribuzione molto diseguale dei danni tra regioni, mesi e modelli di business. Il turismo italiano non sembra entrare in una fase di semplice declino lineare, ma in una fase di riallocazione selettiva dei flussi e della redditività, in cui erosione, calore, acqua ed ecosistemi diventano fattori economici centrali e non più semplice sfondo ambientale.

3.1.4 Produttività del lavoro

Il calore non si limita a ridurre la produttività, ma ridisegna la struttura stessa del mercato del lavoro, spingendo i lavoratori più vulnerabili verso l'inattività e ampliando fratture occupazionali già esistenti. A scala europea, le proiezioni indicano una contrazione della produttività fino al 5% nell'Europa meridionale entro gli anni Ottanta del secolo, con le perdite più elevate concentrate nelle regioni dove prevalgono occupazioni relativamente meno retribuite, un elemento cruciale anche in chiave distributiva. L'adattamento tramite climatizzazione e robotica indossabile potrebbe attenuare i danni del 30%-40%, ma è verosimile che la diffusione di tali tecnologie segua le stesse linee di disuguaglianza che il calore sta amplificando (Szewczyk, Mongelli e Ciscar, 2021).

Per l'Italia, le evidenze microeconomiche mostrano che, a partire dal terzo giorno consecutivo di ondata di calore, ogni giornata aggiuntiva con temperatura pari o superiore a 30 °C si associa a una riduzione di 0,56 punti percentuali nei tassi di occupazione provinciali. L'effetto non è soltanto produttivo, ma anche comportamentale, siccome l'offerta di lavoro si contrae attraverso un aumento dell'inattività nei settori dell'edilizia, dell'agricoltura, dell'ospitalità e dei servizi pubblici, comparti caratterizzati da una prevalenza di contratti flessibili e di categorie di lavoratori svantaggiati (Intraligi e Biagetti, 2026). Le alte temperature incidono anche sulla salute occupazionale; ad esempio, nel settore edilizio il rischio relativo di infortunio sale a 1,216 nei giorni di calore estremo, in coerenza con le evidenze epidemiologiche nazionali (Gariazzo et al., 2023; Marinaccio et al., 2019).

Queste evidenze si inseriscono in un contesto istituzionale ancora fragile. Le politiche di mitigazione risultano molto più diffuse di quelle di adattamento: Pietrapertosa et al. (2021) rilevano che le politiche di mitigazione coprono il 78% delle città analizzate, mentre quelle di adattamento raggiungono soltanto il 10% delle regioni e il 2% delle città, senza che alcuna provincia disponga di piani specifici. Il rischio è quindi che il calore colpisca un mercato del lavoro già vulnerabile in un sistema amministrativo ancora poco attrezzato a gestirne gli effetti.

Tabella 3.4 - Principali perdite economiche e proxy di perdita per la produttività del lavoro

Misura di perdita economica	Orizzonte/scenario	Stima	Fonte
Contrazione della produttività	Anni Ottanta del secolo	fino a -5%	Szewczyk, Mongelli e Ciscar (2021)

nell'Europa meridionale			
Riduzione dei tassi di occupazione provinciali in Italia	Dopo il terzo giorno consecutivo di ondata di calore, per ogni giorno aggiuntivo con temperatura ≥ 30 °C	-0,56 punti percentuali	Intraligi e Biagetti (2026)
Aumento del rischio di infortunio nel settore edilizio	Giorni di calore estremo	1,216	Gariazzo et al. (2023); Marinaccio et al. (2019)
Danni evitabili con adattamento tecnologico	Anni Ottanta del secolo	circa 30%-40%	Szewczyk, Mongelli e Ciscar (2021)

Per il lavoro la letteratura citata nel testo quantifica soprattutto perdite di produttività, occupazione e sicurezza, più che una perdita aggregata già convertita in euro o in percentuale del PIL italiano.

3.1.5 Impatti macro-finanziari

Gli impatti fisici del cambiamento climatico non restano confinati all'economia reale, ma si propagano attraverso il sistema finanziario lungo una catena di trasmissione che va dai prezzi alimentari all'inflazione, dai danni materiali al debito sovrano, dalla perdita di servizi ecosistemici al rischio creditizio. Il primo anello di questa catena è l'inflazione: l'aumento delle temperature atteso entro il 2035 potrebbe innalzare l'inflazione alimentare dell'1%-1,5% e quella complessiva dello 0,5%-0,8%, con effetti persistenti per almeno dodici mesi (Kotz et al., 2024). La relazione temperatura-prezzi presenta inoltre una forte asimmetria stagionale, dato che nei Paesi più caldi gli aumenti di temperatura risultano inflazionistici in estate, ma deflazionistici nelle altre stagioni, complicando la risposta di politica monetaria (Ciccarelli, Kuik e Martínez Hernández, 2024).

Il canale inflazionistico non è però soltanto domestico. I fallimenti dei raccolti in Paesi terzi si trasmettono rapidamente alle economie avanzate. Ad esempio, l'estate del 2010, che provocò un aumento dei prezzi agricoli globali superiore al 30%, ridusse la crescita reale del PIL di circa 0,8 punti percentuali in ciascuno dei due anni successivi (De Winne e Peersman, 2021). Questo effetto di contagio internazionale amplifica la vulnerabilità europea ben oltre l'esposizione climatica diretta del continente. La BCE ha incorporato questi meccanismi nei propri scenari di stress: nello scenario "Disastri e stagnazione politica", una sequenza ravvicinata di ondate di calore, siccità e alluvioni in

Europa porterebbe il PIL a contrarsi fino al 4,7% entro il 2030, una magnitudo comparabile alla crisi finanziaria del 2008; nello scenario "Realtà divergenti", la propagazione di disastri climatici dalle economie emergenti attraverso le catene di approvvigionamento ridurrebbe il PIL fino all'1,8% (Mauderer e Stracca, 2025).

Un ulteriore canale riguarda l'esposizione del credito privato. Oltre il 34% dei prestiti bancari dell'area euro alle imprese non finanziarie, per un valore superiore a 1.300 miliardi di euro, è destinato a settori ad alto rischio di scarsità idrica, mentre il 75% delle esposizioni creditizie corporate dipende in modo rilevante da almeno un servizio ecosistemico (Ceglar et al., 2025; Boldrini et al., 2023). Va precisato che si tratta di misure di esposizione finanziaria, non di perdite attese, dato che indicano l'ammontare di credito potenzialmente sensibile a uno shock climatico ma non equivalgono a perdite creditizie, che dipenderebbero dalla probabilità di default condizionata allo shock e dal tasso di recupero. La distanza fra esposizione e perdita attesa dipende dalla resilienza dei debitori, dalle garanzie reali e dalla capacità di adattamento dei settori coinvolti. Anche con questa avvertenza, la dimensione e la pervasività dell'esposizione segnalano che il rischio climatico non è confinato a pochi comparti ma attraversa l'intera economia come fattore di rischio finanziario sistemico.

Tabella 3.5 - Principali perdite economiche stimate negli impatti macro-finanziari

Misura di perdita economica	Orizzonte/scenario	Stima	Fonte
Riduzione della crescita reale del PIL dopo lo shock agricolo globale del 2010	Due anni successivi allo shock	circa -0,8 punti percentuali di crescita annua	De Winne e Peersman (2021)
Impatto sul PIL nello scenario BCE "Disastri e stagnazione politica"	Entro il 2030	fino a -4,7% del PIL	Mauderer e Stracca (2025)
Impatto sul PIL nello scenario BCE "Realtà divergenti"	Entro il 2030	fino a -1,8% del PIL	Mauderer e Stracca (2025)
Aumento dell'inflazione alimentare	Entro il 2035	+1%-1,5%	Kotz et al. (2024)
Aumento dell'inflazione complessiva	Entro il 2035	+0,5%-0,8%	Kotz et al. (2024)

Questa tabella privilegia gli effetti già espressi come perdita di PIL o di crescita; le misure di esposizione creditizia restano utili nel testo, ma non sono perdite economiche in senso stretto e per questo non sono riportate qui.

3.2 Impatti sociali

Gli impatti settoriali descritti sopra non si esauriscono in perdite di output o di asset. Essi si distribuiscono in modo diseguale tra territori, redditi e gruppi sociali. Per questo è necessario affiancare alla lettura settoriale una lettura distributiva.

3.2.1 Disuguaglianze

Il cambiamento climatico non agisce come uno shock neutrale. Tende invece a colpire con maggiore intensità i gruppi sociali e i territori che partono da condizioni di maggiore fragilità economica. La letteratura più recente converge infatti su un punto essenziale, ossia i danni climatici hanno carattere regressivo. All'aumentare delle temperature, le perdite di reddito e di benessere si concentrano in misura maggiore sui segmenti più poveri della popolazione, sia tra Paesi sia all'interno dei singoli Paesi. Una nostra analisi dedicata alla distribuzione dei redditi entro i confini nazionali mostra che gli impatti economici del riscaldamento sono sistematicamente più severi per i decili inferiori, mentre i gruppi ad alto reddito subiscono danni relativamente minori; nello scenario di riferimento senza ulteriore azione climatica, coerente con un riscaldamento di circa 3,6 °C, l'indice di Gini può aumentare fino a 6 punti percentuali in alcune aree del mondo, con effetti particolarmente marcati nei contesti più vulnerabili (Gilli et al., 2024).

Questa evidenza è confermata anche da una nostra valutazione multi-modello pubblicata su *Nature Climate Change*, che integra otto modelli di valutazione con eterogeneità di reddito. In media, entro il 2100 gli impatti climatici aumenterebbero la disuguaglianza di 1,4 punti di Gini. Lo stesso studio mostra inoltre che limitare l'aumento della temperatura media globale entro 1,5 °C ridurrebbe di circa due terzi l'aumento di disuguaglianza nel lungo periodo, mentre schemi di redistribuzione eguale pro capite dei proventi delle politiche climatiche potrebbero compensare gli effetti regressivi di breve termine e ridurre l'indice di Gini di quasi 2 punti (Emmerling et al., 2024). La politica climatica non è quindi distributivamente neutra, ma può essere disegnata in modo da contenere simultaneamente rischio climatico e disuguaglianze economiche.

Le disuguaglianze climatiche si manifestano però su almeno due piani distinti ma connessi: da un lato la distribuzione dei danni tra gruppi sociali e livelli di reddito; dall'altro la distribuzione territoriale degli impatti tra regioni e province. Nel caso italiano, entrambe le dimensioni tendono a rafforzarsi reciprocamente.

Per l'Italia, tali dinamiche assumono infatti una forma territoriale particolarmente netta. Come mostra la Figura 3.1, gli impatti della temperatura sulla performance economica italiana si distribuiscono in modo fortemente asimmetrico lungo il gradiente Nord-Sud. Il dato medio nazionale evidenzia una riduzione del PIL pro capite del 3,7% nel 2050 e dell'8,5% nel 2080; tuttavia, dietro questa media si osserva una forte polarizzazione territoriale. Le regioni meridionali e le isole maggiori registrano perdite comprese tra il 5% e il 15% nel 2050 e tra il 5% e il 25% nel 2080, mentre nelle aree settentrionali gli impatti risultano più contenuti e, in alcune zone prossime all'arco alpino, si osservano perfino guadagni relativi. La geografia del danno climatico tende dunque a sovrapporsi al divario di sviluppo già esistente nel Paese, aggravandolo ulteriormente.

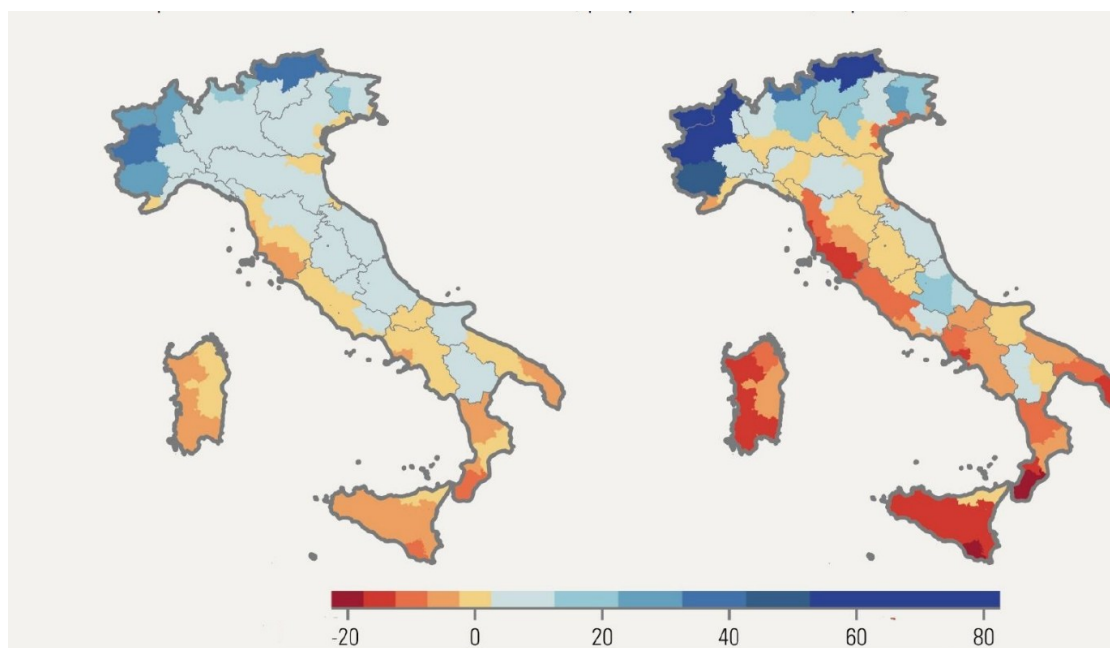


Figura 3.1 - Impatti dell'aumento della temperatura sulla performance economica, variazioni percentuali del PIL pro capite rispetto alle condizioni climatiche correnti per provincia italiana, nello scenario RCP8.5 (2050 a sinistra, 2080 a destra). Fonte: Relazione sullo stato della Green Economy 2019, p. 30. Le stime riportate provengono dalla letteratura citata e non sono prodotte dalla suite modellistica del Capitolo 4 né alimentano direttamente quelle proiezioni; sono usate qui come evidenza indipendente del profilo territoriale dell'impatto.

Lo stesso rapporto quantifica anche l'effetto distributivo di questo processo. La disuguaglianza territoriale, misurata mediante l'indice di Gini applicato alla distribuzione spaziale del PIL pro capite, aumenta da 0,18 nel periodo storico a 0,21 nel 2050 e a 0,29 nel 2080, con un incremento della disuguaglianza regionale del 16% a metà secolo e del 61% nella seconda metà del secolo. In altri termini, il cambiamento climatico non solo riduce il reddito medio, ma ne altera anche la distribuzione geografica, concentrando quote crescenti di ricchezza nelle aree relativamente più forti e comprimendo ulteriormente il peso economico relativo delle regioni meridionali. Nel caso italiano, la questione climatica si configura quindi anche come una questione di

coesione territoriale e sociale: senza politiche di adattamento e redistribuzione mirate, il riscaldamento globale rischia di diventare un moltiplicatore delle disparità preesistenti.

3.2.2 Salute e mortalità

L'Italia presenta un'esposizione alla mortalità correlata alle temperature tra le più alte al mondo e le proiezioni indicano che il riscaldamento futuro non sarà compensato da una riduzione sufficiente dei decessi da freddo, in quanto il bilancio netto sarà negativo. Il punto di partenza è già oggi allarmante. Uno studio osservazionale multi-Paese stima la frazione totale di decessi attribuibili a temperature, sia calde sia fredde, nel 7,71% a livello globale, ma con il rischio attribuibile più elevato registrato proprio in Italia, insieme a Cina e Giappone (Gasparrini et al., 2015). A livello europeo, l'Italia si conferma il Paese con la quota più alta di mortalità legata alla temperatura, circa il 10% dei decessi totali, sebbene il freddo resti ancora responsabile di una quota circa dieci volte superiore a quella del calore (Martínez-Solanas et al., 2021).

Questa evidenza potrebbe suggerire, in apparenza, che il riscaldamento globale riduca almeno in parte la mortalità netta. La letteratura più recente indica invece il contrario. Analizzando 854 città europee sotto molteplici scenari climatici e demografici, Masselot et al. (2025) concludono che l'aumento dei decessi per calore supera sistematicamente la riduzione di quelli per freddo in tutti gli scenari considerati, anche in quello più mite. La mortalità netta è dunque destinata ad aumentare e questa tendenza potrebbe essere invertita soltanto con livelli di adattamento implausibilmente elevati nelle popolazioni urbane. Nel breve periodo 2020-2039, la mortalità è già proiettata in lieve aumento per l'Europa meridionale, a fronte di una modesta diminuzione nell'Europa centrale, confermando che il peso di questo fenomeno ricade in modo sproporzionato sul bacino mediterraneo (Carleton et al., 2022).

Se l'adattamento sistemico appare insufficiente, interventi mirati possono comunque ridurre una parte dell'esposizione. Le soluzioni basate sulla natura, in particolare i tetti verdi, si dimostrano efficaci nel ridurre le temperature superficiali e migliorare il comfort termico degli edifici in clima mediterraneo, mentre analisi modellistiche ne confermano il contributo alla riduzione dell'isola di calore urbana (Bevilacqua et al., 2017; Cirrincione, Marvuglia e Scaccianoce, 2021). Queste soluzioni operano però su scala locale e non possono sostituire strategie di adattamento più ampie. Il dato di fondo resta che l'Italia si colloca già oggi tra i Paesi più esposti alla mortalità legata alla temperatura e che il cambiamento climatico sta aggravando questa vulnerabilità in modo strutturale.

Tabella cross-settori riassuntiva?

Capitolo 4: Le conseguenze macroeconomiche e finanziarie dei cambiamenti climatici

Gli impatti settoriali delineati nel Capitolo 3 si traducono in impatti macroeconomici generali. È opportuno precisare che le stime settoriali del Capitolo 3 non sono sommate nella funzione di danno utilizzata in questo capitolo: il Capitolo 3 identifica i canali di esposizione, mentre il Capitolo 4 quantifica le perdite di PIL tramite una funzione di danno macroeconomica calibrata in modo indipendente. In sostanza, se il capitolo 3 identifica le diverse esposizioni settoriali, questo Capitolo sviluppa nuove stime di perdita economica aggregata usando un modello di crescita economica accoppiato ad uno di sostenibilità del debito.

4.1 Le stime della letteratura scientifica sull'impatto del cambiamento climatico sulla crescita economica mondiale ed europea

Gli impatti economici del cambiamento climatico sono tra i temi più studiati e più complessi dell'economia del clima. La quantificazione dei rischi fisici resta caratterizzata da un'elevata eterogeneità di risultati. Tale eterogeneità non dipende soltanto da differenze nei dati, ma riflette divergenze metodologiche sostanziali: la variabile climatica utilizzata, la forma della funzione di danno, il trattamento degli effetti sulla crescita, il ruolo attribuito all'adattamento, l'inclusione o meno degli eventi estremi e dei *tipping points*, nonché la monetizzazione degli impatti non di mercato. Una recente meta-analisi mostra con particolare chiarezza questa dispersione: al crescere della temperatura media globale, l'intervallo delle perdite economiche compatibili con le diverse specificazioni si amplia sensibilmente, soprattutto oltre la soglia dei 2-3 °C (Howard e Sterner, 2025).

Le stime sintetizzate da Howard e Sterner indicano che, per un aumento di 3 °C della temperatura media globale, i danni economici non catastrofici si collocano in un intervallo compreso tra il 3,2% e il 9,2% del PIL mondiale, a seconda che vengano o meno inclusi effetti persistenti sulla crescita. Quando si incorporano anche componenti catastrofiche, l'intervallo sale al 12,5%-18,5% del PIL. Attribuendo pesi probabilistici alle principali assunzioni strutturali, la stima centrale si colloca tra il 7,1% e il 12,6% del PIL mondiale. Il punto rilevante è che le stime più contenute tendono a derivare da specificazioni che escludono una parte importante degli effetti persistenti, degli impatti non di mercato e delle componenti sistemiche più difficili da modellizzare. L'incertezza, quindi, non può essere interpretata come neutralità rispetto al rischio: ciò che è più difficile da misurare coincide spesso con ciò che può produrre i danni maggiori.

Questa lettura è rafforzata da contributi più recenti che collocano i danni macroeconomici potenziali su livelli ben superiori a quelli incorporati nelle funzioni di

danno tradizionali. In particolare, una stima basata sulla temperatura globale anziché su quella locale mostra che un aumento di 1 °C può ridurre il PIL mondiale di oltre il 20% nel lungo periodo. Nella stessa analisi, uno scenario di riscaldamento non contrastato implica una perdita di benessere attualizzata superiore al 30% e un costo sociale del carbonio superiore a 1.200 dollari per tonnellata. Il punto metodologico rilevante è che la temperatura media globale risulta molto più strettamente correlata agli eventi estremi rispetto alle misure climatiche nazionali utilizzate in molti studi panel, contribuendo così a spiegare perché le nuove stime risultino molto più elevate di quelle convenzionali (Bilal e Känzig, 2026).

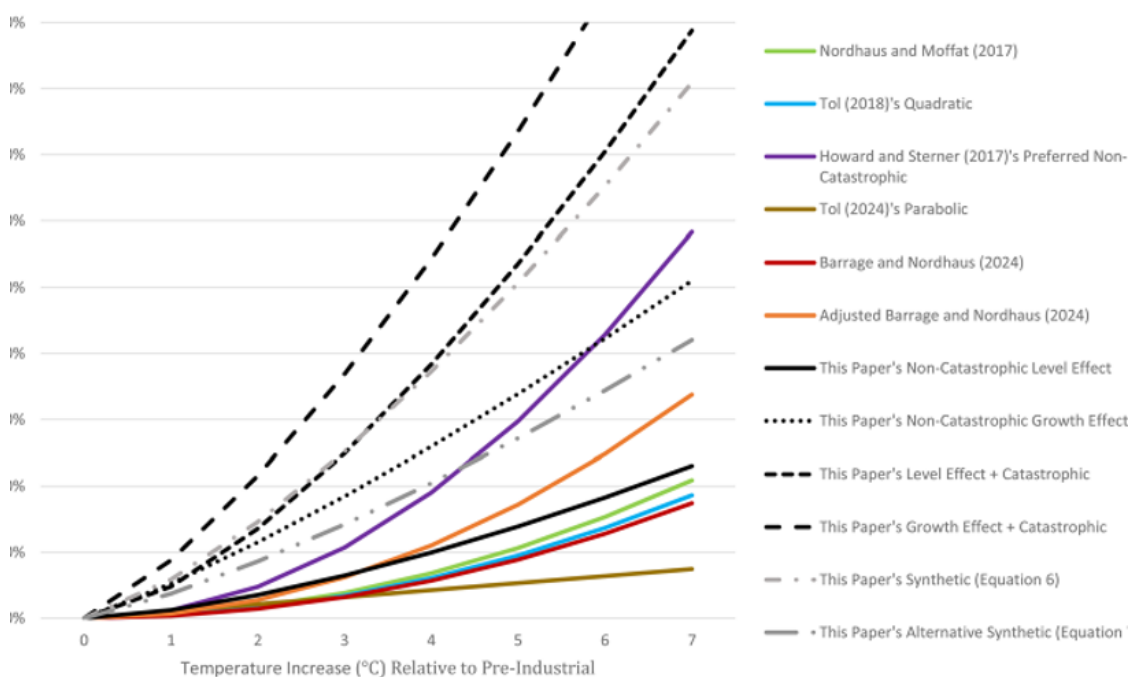


Figura 4.1 - Relazione temperatura-danno nelle principali meta-analisi e nella regressione preferita dell'analisi più recente. Fonte: Howard e Sterner (2025).

Nel complesso, la letteratura globale consente tre conclusioni relativamente robuste. In primo luogo, le perdite economiche aggregate associate al riscaldamento globale sono molto incerte, ma l'incertezza cresce in modo non lineare con l'aumentare della temperatura. In secondo luogo, il rischio di sottostima appare oggi più rilevante del rischio opposto, poiché molte specificazioni continuano a trascurare eventi estremi, *tipping points*, effetti persistenti sulla crescita e una quota rilevante degli impatti non di mercato. In terzo luogo, la frontiera più recente della ricerca tende a produrre profili di danno più ripidi rispetto a quelli incorporati nei modelli di valutazione integrata tradizionali (Howard e Sterner, 2025; Bilal e Känzig, 2026).

Per l'Europa, la base empirica appare più avanzata sul piano dei rischi fisici settoriali e territoriali che non su quello di una funzione di danno macroeconomica unica. Le simulazioni sviluppate in ambito PESETA V indicano che, in uno scenario di 2 °C di riscaldamento globale entro il 2050, l'Unione europea potrebbe registrare una perdita media di circa lo 0,7% del PIL, equivalente a circa 2,5 trilioni di euro non scontati, considerando sette categorie di rischio: produttività del lavoro, siccità, alluvioni costiere e fluviali, tempeste, incendi e danni alle infrastrutture di trasporto. Le perdite risultano distribuite in modo fortemente asimmetrico nello spazio europeo, con maggiore esposizione delle regioni dell'Europa meridionale ed orientale; per l'area mediterranea, in particolare, risultano centrali la produttività del lavoro, la siccità e il rischio costiero (Mongelli et al., 2025; Gagliardi, 2025).

Accanto alle stime prospettiche, il danno osservato conferma che i costi economici degli estremi climatici sono già oggi rilevanti. Nel periodo 1980-2024, gli eventi meteorologici e climatici estremi hanno causato nell'Unione europea perdite economiche stimate in 822 miliardi di euro, di cui oltre 208 miliardi concentrati nel quadriennio 2021-2024. L'analisi delle tendenze resta complessa, per via dell'elevata variabilità interannuale, ma i dati più recenti mostrano che gli ultimi quattro anni rientrano tutti tra i cinque anni con le perdite più elevate dell'intera serie storica. Va inoltre ricordato che queste stime riguardano soprattutto le perdite sugli asset e non esauriscono i costi indiretti, sanitari, produttivi e distributivi del cambiamento climatico (EEA, 2025).

Dal punto di vista della composizione dei rischi, una parte crescente del danno europeo è associata a calore estremo e siccità. Le perdite economiche da ondate di calore, misurate attraverso la riduzione della produttività del lavoro, sono state stimate tra lo 0,3% e lo 0,5% del PIL europeo in alcuni anni estremamente caldi recenti, con impatti superiori all'1% in diverse regioni più vulnerabili. Le proiezioni indicano inoltre che negli anni Sessanta del secolo tali perdite potrebbero superare l'1,1% del PIL europeo in assenza di ulteriore adattamento. Per la siccità, in uno scenario senza ulteriore azione climatica e senza adattamento, le perdite annue per UE+UK potrebbero aumentare dagli attuali 9 miliardi di euro a oltre 65 miliardi di euro l'anno in un mondo a 4 °C, con una marcata concentrazione geografica nel Sud e nell'Ovest del continente (García-León et al., 2021; Naumann et al., 2021).

Per l'Italia, la base conoscitiva disponibile è più limitata e più eterogenea. Le stime oggi più citate comprendono: una valutazione modellistica che attribuisce, in uno scenario di aumento della temperatura di circa 1 °C rispetto al 2001, una perdita compresa tra lo 0,12% e lo 0,2% del PIL nel 2050; una seconda, riferita a scenari più intensi, che stima una perdita dello 0,5% del PIL con +2 °C e del 2% con +4 °C al 2050; e una stima econometrica riferita allo scenario RCP8.5 che porta a un declino medio del PIL pro

capite del 3,7% nel 2050 e dell'8,5% nel 2080, con una marcata penalizzazione delle regioni meridionali e insulari.

Tabella 4.1 - Principali stime disponibili degli impatti macroeconomici del cambiamento climatico per l'Italia

Studio	Metodo	Scenario climatico	Orizzonte	Stima dell'impatto
Carraro, a cura di (2009)	Modellistica economica	Aumento di circa 1 °C rispetto al 2001	2050	Perdita compresa tra 0,12% e 0,2% del PIL; circa 2-3,5 miliardi di euro l'anno a prezzi 2018
McCallum et al. (2013)	Modellistica economica	+2 °C e +4 °C	2050	Perdita dello 0,5% del PIL con +2 °C e del 2% con +4 °C; circa 9 e 35 miliardi di euro
Bosello, Dasgupta e Tavoni (2019)	Stima econometrica panel ad alta risoluzione spaziale	RCP8.5	2050 e 2080	Declino medio del PIL pro capite del 3,7% nel 2050 e dell'8,5% nel 2080
Carraro (2022)	Modellistica economica (modello ICES)	RCP4.5	2030 e 2050	Danno complessivo diretto e indiretto da infrastrutture: 0,1%-0,4% del PIL nel 2020-2030; 0,33%-0,55% del PIL nel 2050 (equivalente a 2,3-8,7 mld €/anno, crescente fino a 11,5-18 mld € al 2050)

Queste differenze sono il risultato di approcci diversi alla misurazione del danno. Le stime più contenute derivano in genere da esercizi modellistici che trattano solo in

modo parziale gli eventi estremi, non catturano pienamente i danni catastrofici e rappresentano in modo incompleto le dimensioni patrimoniali e sociali dell'impatto. La stessa letteratura disponibile segnala quindi che tali valori devono essere letti con cautela e considerati verosimilmente come sottostime dei costi effettivi.

In questo quadro, il problema italiano non è l'assenza totale di risultati, ma l'assenza di una base di stime recente, omogenea e pienamente comparabile. Gli studi disponibili differiscono per scenario, orizzonte temporale, metodo e copertura degli impatti, e rendono difficile costruire una lettura coerente del rischio macroeconomico per il Paese. Proprio questa eterogeneità motiva la costruzione, nella sezione seguente, di un esercizio esplicito e trasparente per l'Italia e l'Europa, fondato su scenari comuni e su un raccordo diretto tra danni climatici, crescita economica e sostenibilità del debito.

4.2 Metodi e scenari utilizzati per le nuove stime per l'Italia e l'Europa

La letteratura esistente sui costi macroeconomici e finanziari del cambiamento climatico per l'Italia è ampia ma poco omogenea. Gli studi differiscono per scenario, orizzonte, funzione di danno e livello di aggregazione territoriale; molti sono inoltre datati rispetto al rapido avanzamento dell'evidenza empirica sui danni climatici. Per questo, in questo rapporto presentiamo nuove stime modellistiche che integrano per la prima volta, in modo coerente per l'Italia, la dimensione macroeconomica e quella della sostenibilità del debito. Le nuove stime non sostituiscono la letteratura esistente, ma ne organizzano le principali evidenze entro un quadro modellistico unitario, con scenari, orizzonte temporale e variabili macro-fiscali resi espliciti. Si noti che le stime macroeconomiche presentate in questo capitolo non derivano dall'aggregazione delle perdite settoriali documentate nel Capitolo 3, ma da una funzione di danno indipendente calibrata sulla temperatura. Le due viste sono complementari, dato che il Capitolo 3 identifica i canali di trasmissione fisica e settoriale, mentre il Capitolo 4 quantifica l'impatto aggregato sul PIL e sulle finanze pubbliche.

L'analisi si sviluppa lungo due narrative socioeconomiche di riferimento. La prima, SSP2-RCP4.5, rappresenta un percorso intermedio di emissioni moderate e cooperazione internazionale parziale, con un riscaldamento medio globale atteso di circa 2,7 °C a fine secolo. La seconda, SSP3-RCP7.0, descrive invece un contesto di rivalità regionale, minore cooperazione e politiche climatiche più deboli, con un riscaldamento atteso di circa 3,6 °C a fine secolo. Non si tratta di previsioni puntuali, ma di due cornici utili a delimitare un intervallo plausibile di esposizione del sistema italiano a traiettorie diverse della transizione e dei rischi fisici.

All'interno di ciascuna narrativa, il modello climato-economico RICE50+ (Gazzotti et al., 2021) proietta il PIL nazionale tenendo conto degli effetti della temperatura sulla produttività. Si tratta di un modello che estende la struttura di DICE di Nordhaus a 57 regioni indipendenti, fra le quali l'Italia compare come paese a sé. Le proiezioni italiane

sono dunque estratte direttamente come output regionale del modello a partire da una calibrazione delle variabili climatiche locali. L'incertezza sulla relazione tra temperatura e crescita viene esplorata attraverso due versioni della funzione di danno (ossia la relazione matematica che traduce variazioni di temperatura in perdite economiche). La prima corrisponde al valore mediano della stima pubblicata da Kalkuhl e Wenz (2020), una regressione panel non-lineare con effetti fissi che stima la relazione storica fra temperatura annuale e prodotto regionale lordo su oltre 1.500 regioni subnazionali in 77 Paesi del mondo, includendo dinamiche di breve periodo tramite lag distribuiti. La seconda specificazione è costruita sul 95° percentile della distribuzione dei coefficienti stimati nello stesso studio, corrispondendo quindi a un caso peggiore ma plausibile secondo gli stessi assunti, non a uno scenario climatico più estremo. In entrambi i casi la funzione incorpora sia effetti transitori sia effetti persistenti della temperatura sulla crescita. Questi due livelli di danno si trovano all'interno delle stime della letteratura scientifica e non considerano rischi non osservati storicamente, come ad esempio quelli di tipping points. Le traiettorie di crescita così ottenute alimentano poi un modello stocastico di sostenibilità del debito, che restituisce non un solo percorso centrale ma una distribuzione di traiettorie possibili del rapporto debito/PIL, coerente con una lettura del rischio fiscale non limitata alla sola mediana.

Questa impostazione è particolarmente importante per il caso italiano. Data la dimensione iniziale dello stock di debito pubblico, anche variazioni relativamente contenute della crescita media si accumulano in modo rilevante lungo l'orizzonte di simulazione. Nello scenario socio-economico SSP2-RCP4.5, la crescita reale media dell'Italia nel periodo 2025-2050 è pari all'1,1% l'anno; nello scenario SSP3-RCP7.0, scende allo 0,6% l'anno. Il primo, dunque, rappresenta uno scenario di congiuntura economica ottimistica, mentre il secondo più realistica (per quanto doppia della media degli ultimi vent'anni). Le due evoluzioni socio-economiche sono associate a due evoluzioni climatiche, con lo scenario SSP2-4.5 che raggiunge un riscaldamento globale di 2.7°C a fine secolo, e quello SSP3-RCP7 che dipinge un mondo più caldo con 3.6°C di riscaldamento. La differenza fra gli scenari può apparire moderata se letta su base annuale, ma diventa cruciale quando viene propagata lungo venticinque anni e poi trasmessa, attraverso la base imponibile e il denominatore del rapporto debito/PIL, alla dinamica fiscale complessiva. Anche per questo una parte della dinamica apparentemente favorevole del debito nella baseline dipende da ipotesi di crescita reale non trascurabile, soprattutto nello scenario intermedio.

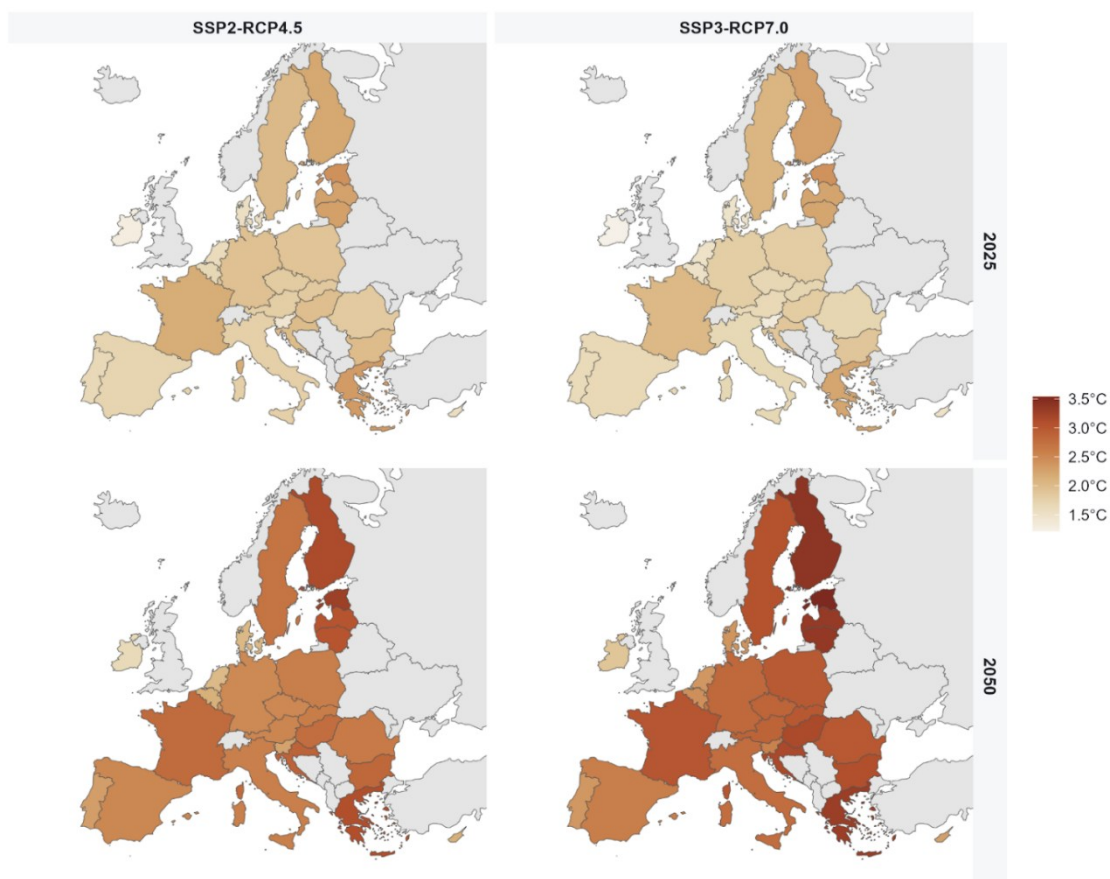
Il modello di sostenibilità del debito utilizza queste traiettorie come aspettative centrali e costruisce attorno ad esse un albero di scenari probabilistici che riproduce i momenti storici delle principali variabili macro-finanziarie italiane. In ciascun nodo dell'albero, il modello ottimizza il mix di strumenti di debito per scadenza e tasso in modo da minimizzare il costo di finanziamento atteso sotto vincoli di sostenibilità di lungo periodo e di tolleranza del rischio di rifinanziamento. Il rischio di coda, ossia la

possibilità che si verifichino esiti molto peggiori della media negli estremi sfavorevoli della distribuzione, è sintetizzato attraverso una misura di Conditional Value-at-Risk (CVaR) al 95% sul fabbisogno lordo di finanziamento. In termini operativi, il CVaR al 95% è la media dei valori del fabbisogno di finanziamento al di sopra del 95° percentile della sua distribuzione di scenario, ossia il valore atteso negli scenari più avversi (il 5% peggiore). Questo consente di distinguere le situazioni in cui il debito appare sostenibile in media da quelle in cui la fragilità emerge soprattutto nelle code della distribuzione, un punto cruciale per l'interpretazione del caso italiano.

Il capitolo mette inoltre a confronto due regimi di politica fiscale. Il primo mantiene costante il saldo primario allo 0,95% del PIL, un livello coerente con la media storica italiana degli ultimi quarant'anni circa. In termini sostanziali, ciò equivale ad assumere che, una volta fissato un avanzo primario di riferimento, lo Stato scelga di difenderlo anche quando il contesto macroeconomico peggiora. Il secondo mantiene invece costante la spesa primaria, ancorandola allo stesso valore di riferimento e lasciando che il saldo primario oscilli in funzione del ciclo economico. Nel primo caso l'assorbimento dello shock avviene soprattutto sulla spesa; nel secondo si trasferisce invece sul saldo e, con il tempo, sul debito. Il punto del confronto non è stabilire quale delle due regole sia più realistica in astratto, ma chiarire dove cada l'aggiustamento quando arriva lo shock climatico.

La calibrazione italiana impiega un'aliquota fiscale media del 45,3% del PIL e un rapporto debito/PIL iniziale di circa il 140% nelle simulazioni del 2023. Lo spread sovrano è modellato in modo endogeno: reagisce all'evoluzione del rapporto debito/PIL e si applica su una curva risk-free a tassi bassi, comparabili alla yield curve italiana di inizio 2021. L'endogeneità dello spread consente di catturare la possibile amplificazione via mercato dei titoli di Stato all'aumento dell'indebitamento, un canale rilevante per la valutazione del rischio sovrano in presenza di shock climatici.

Su questa base metodologica, il primo passaggio consiste nel ricostruire la dimensione fisica dello shock. A parità di riscaldamento medio globale, il segnale climatico si distribuisce infatti in modo molto disomogeneo sul territorio e l'Europa meridionale è tra le aree del pianeta in cui l'amplificazione regionale è più marcata. La Figura 4.2 rappresenta l'aumento della temperatura locale rispetto al livello preindustriale, confrontando gli anni 2025 e 2050 nelle due narrative considerate. Il quadro che emerge è chiaro: l'Europa meridionale e centrale si riscalda più rapidamente della media globale, e l'Italia rientra nella fascia di maggiore esposizione continentale.



Figura

4.2 - Aumento delle temperature per l'Europa rispetto ai livelli preindustriali in due scenari, nel 2025 e nel 2050.

La Figura 4.3 isola la traiettoria del riscaldamento locale italiano lungo l'intero orizzonte. Le due curve restano molto vicine fino a circa il 2035, quando in entrambi i casi il riscaldamento medio in Italia supera la soglia dei 2 °C. Successivamente, gli scenari si separano in modo progressivo. Questo passaggio è decisivo, perché traduce uno stesso dibattito sugli scenari globali in un set di differenze climatiche locali che hanno implicazioni dirette per la crescita e, quindi, per la sostenibilità fiscale dell'Italia.

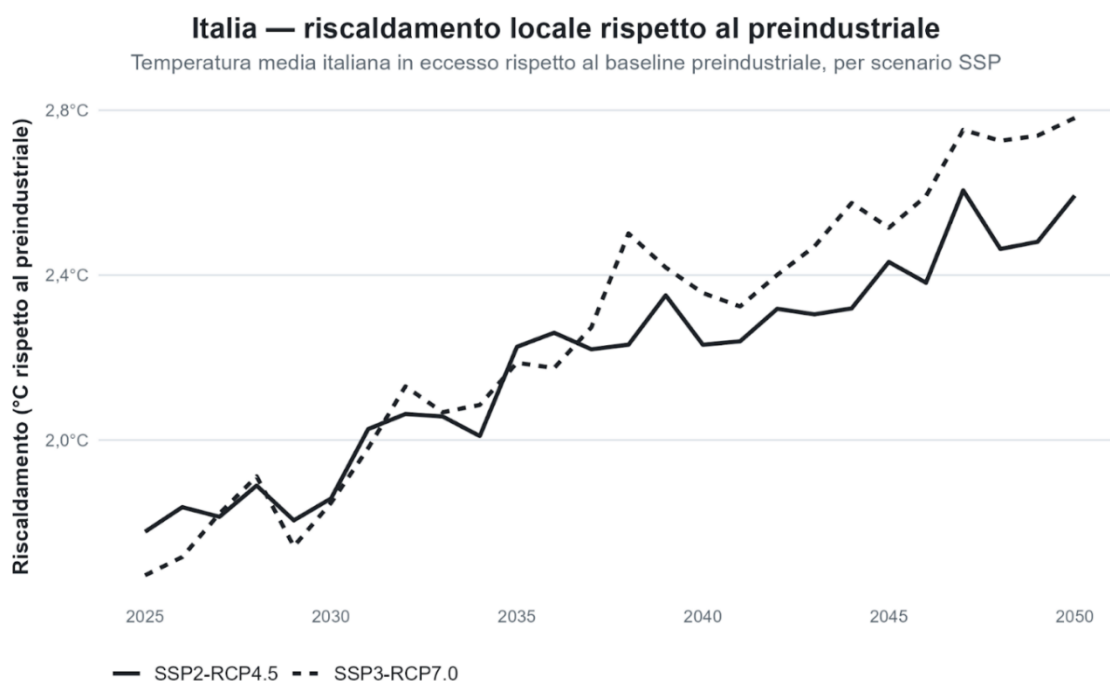


Figura 4.3 - Aumento delle temperature per l'Italia rispetto ai livelli preindustriali in due scenari, dal 2025 al 2050.

4.3 Gli impatti futuri sulla crescita economica italiana ed europea

Il passo successivo consiste nel tradurre il segnale fisico in impatto economico. La Figura 4.4 proietta la variazione attesa del PIL al 2050 rispetto a un controfattuale senza danni climatici, distinguendo fra un'ipotesi di danno più contenuta, corrispondente al valore mediano della funzione di Kalkuhl-Wenz, e un'ipotesi più severa, costruita sul 95° percentile della stessa specificazione. Le perdite più intense si concentrano nei Paesi mediterranei e nell'Europa sud-orientale, in coerenza con il pattern di amplificazione termica locale documentato nelle mappe precedenti.

Per l'Italia, le nostre stime indicano al 2050 un livello di PIL inferiore rispetto allo scenario senza danni di circa l'1,6% (funzione di danno mediana) e del 4,2% (95° percentile) nello scenario ad alta crescita (SSP2-RCP4.5), e del 2,2% e del 6,0% nello stesso ordine nello scenario tendenziale (SSP3-RCP7.0); cfr. Tabella 4.2.

Queste stime sono generalmente in linea con quelle della letteratura scientifica, senza considerare i casi più estremi e impatti inattesi come quelli derivanti da possibili tipping points. Il confronto tra le due funzioni di danno misura quindi la sensibilità dei risultati alle ipotesi di coda: il passaggio dal valore mediano al 95° percentile amplia di circa 2,6 punti percentuali in SSP2-RCP4.5 e di circa 3,8 punti percentuali in SSP3-RCP7.0 la perdita attesa di PIL. In un Paese che nel periodo 2025-2050 cresce mediamente dell'1,1% l'anno nello scenario ottimista e dello 0,6% nello scenario tendenziale, anche scarti apparentemente contenuti sul livello del PIL diventano macroeconomicamente

rilevanti, perché si accumulano lungo tutto l'orizzonte e si riflettono su entrate, investimenti e spazio fiscale.

Tabella 4.2 – Proiezione danni climatici in Italia al 2050

Scenario →	Ottimista	Tendenziale
Funzione di danno ↓	SSP2-RCP4.5	SSP3-RCP7.0
Moderata	- 1,6%	- 2,2%
Elevata	- 4,2%	- 6,0%

La tabella riporta, per ciascuna combinazione di scenario socio-climatico e severità del danno, la variazione percentuale del PIL rispetto alla baseline senza impatti climatici. Il segno negativo indica una diminuzione del PIL.

Questo punto merita di essere esplicitato. Le perdite stimate non rappresentano uno shock una tantum che si riassorbe rapidamente, ma un'erosione persistente del sentiero di crescita. Poiché la funzione di danno incorpora sia effetti transitori sia effetti persistenti della temperatura sulla produttività, il divario rispetto al controfattuale tende a cumularsi nel tempo. Per questo la lettura economicamente corretta non è soltanto quella del livello di PIL perso al 2050, ma quella di un sentiero di crescita strutturalmente più debole, soprattutto nei Paesi già esposti a bassa crescita tendenziale e ad alta fragilità fiscale.

Sono proprio queste perdite di crescita, graduali ma cumulative, a costituire l'input fondamentale del modello di sostenibilità del debito discusso nella sezione successiva. Data la dimensione dello stock di debito pubblico italiano, un divario di pochi punti percentuali di PIL rispetto al controfattuale è già sufficiente a produrre effetti di amplificazione significativi sulla traiettoria fiscale.

La Tabella 4.3 traduce le perdite di livello della Tabella 4.2 in perdite di crescita media annua, ossia nella metrica con cui i pianificatori economici e di bilancio leggono più abitualmente l'impatto cumulativo del clima. Nelle stime centrali con funzione di danno mediana, l'erosione del sentiero di crescita italiano fra il 2025 e il 2050 va dal 6% nello scenario più favorevole (SSP2-RCP4.5) al 15% nello scenario tendenziale (SSP3-RCP7.0). Nelle code di rischio, ossia al 95° percentile della funzione di danno, le perdite salgono rispettivamente al 16% e al 41%. La lettura combinata restituisce un messaggio chiaro: anche nella stima centrale dello scenario tendenziale la crescita potenziale italiana si riduce di circa un settimo; nello scenario di coda dello stesso scenario, di circa due quinti.

Tabella 4.3 – Perdita di crescita media annua del PIL italiano, 2025–2050

Crescita media reale, baseline	Scenario / Funzione di danno	Crescita media reale, con danno climatico	Riduzione relativa
1,11%	SSP2-RCP4.5, mediana	1,04%	-5,9%
	SSP2-RCP4.5, 95° perc	0,93%	-16,0%
0,61%	SSP3-RCP7.0, mediana	0,52%	-14,9%
	SSP3-RCP7.0, 95° perc	0,36%	-40,7%

La colonna “Riduzione relativa” esprime la differenza percentuale fra crescita media reale annua baseline e crescita media reale annua sotto impatti climatici (non una differenza in punti percentuali). Fonte: elaborazione su simulazioni RICE50+ con funzione di danno Kalkuhl-Wenz, scenari SSP2-RCP4.5 e SSP3-RCP7.0.

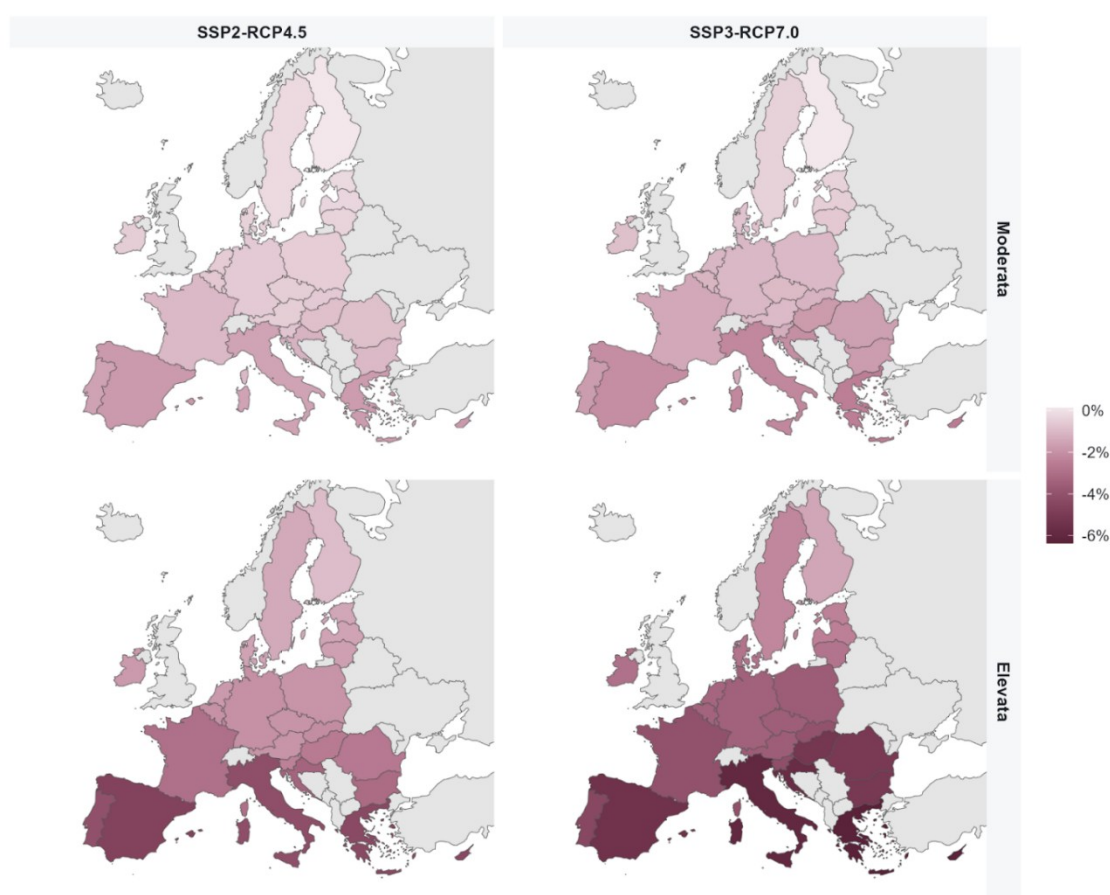


Figura 4.4 - Impatto del cambiamento climatico sul PIL dei Paesi europei al 2050 in due scenari e con due diverse ipotesi di danno.

4.4 Le conseguenze per la stabilità del sistema finanziario e per le finanze pubbliche

Le perdite di PIL discusse nella sezione precedente si trasmettono alle finanze pubbliche lungo tre canali strettamente intrecciati. Una crescita più debole aumenta meccanicamente il rapporto debito/PIL. Uno stock di debito più elevato richiede

maggior servizio del debito e si riflette in un premio al rischio sovrano più ampio. Infine, la minore crescita comprime le entrate. Tutto ciò impone un trade-off di fondo nella gestione delle finanze pubbliche: salvaguardare la traiettoria del debito accettando una compressione significativa della spesa pubblica, oppure preservare il livello della spesa lasciando deteriorare debito, interessi e premio sovrano. Per rendere esplicito questo trade-off il modello di sostenibilità del debito propaga simultaneamente i tre canali fino al 2050 sotto due regole fiscali alternative. La prima è una regola di saldo primario fisso mantenendo quindi un avanzo primario costante allo 0,95% del PIL in ogni anno della simulazione, pari alla media storica italiana degli ultimi quarant'anni circa (per una definizione completa di saldo primario, consultare il Glossario). Di conseguenza, lo Stato difende l'avanzo di riferimento anche quando il contesto macroeconomico peggiora, scaricando l'aggiustamento sulla spesa primaria. La seconda è una regola di spesa costante, che fissa la spesa primaria al livello di baseline, lasciando assorbire lo shock alla traiettoria di debito e interessi. Le due regole non sono previsioni di politica fiscale, ma due archetipi di reazione che delimitano lo spazio entro cui si colloca l'aggiustamento effettivo. (Zenios et al. 2021, Consiglio et al. 2016)

La sostenibilità del debito non può essere valutata guardando solo alla mediana (Zenios et al. 2021, Consiglio et al. 2016). Infatti, in un problema di finanza pubblica, le crisi non emergono nello stato medio del mondo, ma negli stati avversi in cui crescita, saldo primario e costo del finanziamento si combinano in modo sfavorevole. Per questo il modello, in linea con la logica della stochastic debt sustainability analysis, guarda in modo esplicito alla parte alta della distribuzione e tratta la dinamica del 75° e del 90° percentile come indicatori cruciali di sostenibilità con una probabilità relativamente alta e con una probabilità minore.

Il punto economico è semplice ma decisivo. Una mediana in discesa dice che, nello scenario centrale, il debito tende a migliorare. Ma un 75° percentile elevato o crescente indica che una quota ampia e non remota degli stati del mondo resta instradata verso traiettorie molto più fragili. Questo è problematico per almeno tre ragioni. Primo, il sovrano deve essere finanziabile non solo nello scenario mediano, ma anche negli scenari avversi che restano plausibili. Secondo, la dinamica del debito è non lineare, cioè quando il rapporto debito/PIL entra in zone molto alte, anche piccoli shock aggiuntivi possono richiedere aggiustamenti fiscali sproporzionati o innescare pressioni sul rifinanziamento. Terzo, gli stati favorevoli non compensano simmetricamente quelli sfavorevoli, quindi se in alcuni rami il debito scende molto, questo non elimina il problema che in altri rami possa avvicinarsi a livelli incompatibili con la sostenibilità.

Figura 4.5 - Evoluzione del rapporto tra debito pubblico e PIL per l'Italia fino al 2050 in diversi scenari e con diverse funzioni di danno. La figura riporta la traiettoria del rapporto debito/PIL italiano fino al 2050 sotto saldo primario fisso allo 0,95% del PIL e spread sovrano endogeno. Le linee continue rappresentano la mediana dell'albero stocastico, la banda scura la forchetta interquartile (q25-q75) e la fascia chiara l'intervallo fra il 10° e il 90° percentile. Il riferimento

senza danni climatici (in grigio) è confrontato con la regola di spesa costante in presenza di danni moderati ed elevati (in arancione), per ciascuno dei due scenari SSP.

La Figura 4.5 ricostruisce il rapporto debito/PIL italiano fino al 2050, partendo da un livello iniziale di circa il 140% nel 2023. Nel riferimento senza danni climatici e con saldo primario fisso allo 0,95% del PIL (ovvero il saldo primario medio negli ultimi 40 anni circa), la mediana scende a circa il 90% nello scenario SSP2-RCP4.5 e al 103% in SSP3-RCP7.0 entro la fine dell'orizzonte. La traiettoria mediana, però, non racconta tutto, dato che il 75° percentile raggiunge il 175% (SSP2-RCP4.5) e il 197% (SSP3-RCP7.0), mentre il 90° percentile sfiora il 330% e il 372% rispettivamente. Queste code corrispondono al 10% degli stati del mondo più avversi modellati dall'albero stocastico del modello di sostenibilità del debito. La loro ampiezza riflette la stocasticità delle variabili macro-finanziarie italiane (tasso d'interesse, crescita reale, saldo primario) i cui shock sono calibrati per riprodurre i momenti storici delle stesse variabili nel periodo di stima. In altre parole, una parte significativa della distribuzione resta in zone fortemente vulnerabili anche nel quadro di partenza, prima ancora di introdurre il rischio climatico, semplicemente perché lo stock iniziale di debito è abbastanza alto da rendere alcune realizzazioni storicamente rare ma plausibili incompatibili con una traiettoria di consolidamento.

L'introduzione dei danni climatici sotto regola di spesa costante peggiora sistematicamente il quadro, sia spostando la mediana verso l'alto sia allargando la distribuzione (per una descrizione dettagliata della metodologia si rimanda a Calcaterra et al. 2025). Al 2050 la mediana raggiunge circa il 102% e il 122% in SSP2-RCP4.5, a seconda dell'intensità del danno, e il 115% e il 138% in SSP3-RCP7.0. Il punto decisivo è ancora una volta nelle code: nel caso più sfavorevole - SSP3-RCP7.0, danni elevati, spesa costante - il 75° percentile supera il 245%.

Questa lettura per code è formalizzata nella Tabella 4.4, che riporta la probabilità terminale che il rapporto debito/PIL superi il 200% al 2050. La probabilità è calcolata sommando, per ciascuna combinazione di scenario climatico, regola fiscale e severità del danno, la massa di probabilità dei rami terminali in cui il debito/PIL > 200% nell'anno finale di simulazione. Non si tratta dunque di una semplice statistica descrittiva della distribuzione, ma di una misura diretta della probabilità che l'Italia entri, entro il 2050, in una zona di forte criticità fiscale. Questa soglia è arbitraria ma simbolica, visto che fra le economie industrializzate solo il Giappone si trova oltre il livello del 200%, in un contesto culturale e istituzionale molto unico.

Tabella 4.4 - Probabilità che il debito/PIL superi il 200% al 2050

Severità del danno	Regola fiscale	SSP2-RCP4.5	SSP3-RCP7.0
--------------------	----------------	-------------	-------------

Nessuna		20,6%	24,3%
Moderata	Bilancio primario fisso	20,9%	27,3%
	Spesa costante	21,6%	39,1%
Elevata	Bilancio primario fisso	21,3%	30,9%
	Spesa costante	39,4%	44,0%

La tabella riporta, per ciascuna combinazione di scenario climatico, severità del danno e regola fiscale, la probabilità terminale che il rapporto debito/PIL superi il 200% nel 2050. La riga 'Nessuna' rappresenta il riferimento senza danni climatici e coincide per le due regole fiscali (in assenza di shock il saldo primario fisso e la spesa primaria costante producono la stessa traiettoria); per questo è riportata una sola volta. Le righe con danni distinguono invece i due regimi: 'Bilancio primario fisso' assume un avanzo primario costante allo 0,95% del PIL in ogni anno (l'aggiustamento si scarica sulla spesa); 'Spesa costante' fissa la spesa primaria al livello di baseline (l'aggiustamento si scarica sul saldo e quindi sul debito).

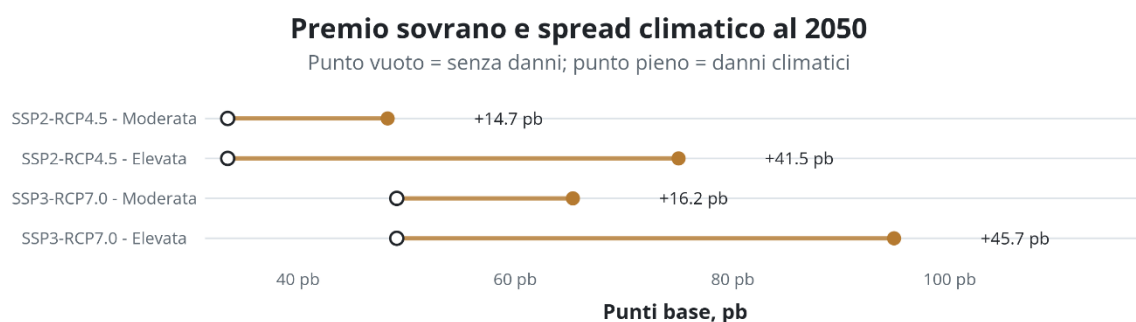
Anche senza danni climatici la probabilità non è trascurabile (20,6% in SSP2-RCP4.5 e 24,3% in SSP3-RCP7.0), segnalando che il quadro di partenza non è benigno. La matrice completa consente però di isolare due effetti distinti. Sotto la regola di saldo primario fisso, l'aggiustamento si scarica sulla spesa e contiene la crescita della probabilità: passando da assenza di danni a danni elevati questa cresce poco, dal 20,6% al 21,3% in SSP2-RCP4.5 e dal 24,3% al 30,9% in SSP3-RCP7.0. Sotto la regola di spesa primaria costante, invece, l'aggiustamento si trasferisce sul debito e amplifica drasticamente il rischio: con danni elevati la probabilità raggiunge il 39,4% in SSP2-RCP4.5 e il 44,0% in SSP3-RCP7.0, raddoppiando o quasi rispetto al riferimento. Il messaggio centrale è quindi duplice. Il primo: i danni climatici non fanno nascere ex novo il rischio di sostenibilità, ma a parità di regola fiscale lo aggravano in modo non lineare, soprattutto nello scenario SSP3-RCP7.0 dove la crescita media è già più debole. Il secondo, più stringente: è la scelta della regola fiscale, più ancora dell'intensità del danno, a determinare l'entità del rischio terminale; con una regola che assorbe lo shock via spesa l'amplificazione climatica resta sotto controllo, mentre con una regola che lo trasferisce sul debito l'amplificazione diventa il canale dominante.

Figura 4.6 - Evoluzione del rapporto tra interessi sul debito e PIL per l'Italia fino al 2050 in diversi scenari e con diverse funzioni di danno. La figura riporta l'onere annuo per interessi sul debito pubblico italiano in percentuale del PIL fino al 2050 sotto saldo primario fisso allo 0,95% del PIL e spread sovrano endogeno. Le linee continue rappresentano la mediana dell'albero stocastico, la banda scura la forchetta interquartile (q25-q75) e la fascia chiara l'intervallo fra il 10° e il 90° percentile. Il riferimento senza danni climatici (in grigio) è confrontato con la regola di spesa costante in presenza di danni moderati ed elevati (in arancione), per ciascuno dei due scenari SSP.

Le dinamiche dello stock di debito si trasferiscono al bilancio corrente attraverso l'onere per interessi, che costituisce il secondo canale della trasmissione fiscale del rischio climatico. Nel riferimento senza danni la mediana al 2050 si attesta sull'1,28%

del PIL in SSP2-RCP4.5 e sull'1,53% in SSP3-RCP7.0. Con danni moderati a spesa costante la mediana sale rispettivamente all'1,55% e all'1,83%; nel caso più severo - danni elevati, spesa costante - raggiunge il 2,05% e il 2,37%. Lo spostamento della mediana è quindi relativamente contenuto.

Il quadro cambia in modo molto più marcato guardando le code della distribuzione, dove il canale del premio al rischio inizia a manifestarsi. Già nel riferimento senza danni il 75° percentile dell'onere per interessi raggiunge il 4,85% del PIL in SSP2-RCP4.5 e il 5,76% in SSP3-RCP7.0 al 2050, mentre il 90° percentile arriva fra il 12,8% e il 14,8%. Sotto danni elevati e spesa costante il 75° percentile sale al 6,65% e al 7,71% del PIL, e



il 90° percentile al 15,6% e al 17,7%. Per un emittente sovrano già molto indebitato, questa dispersione non è un dettaglio statistico, ma misura la probabilità che il servizio del debito assorba, negli stati avversi, una quota anomala di risorse pubbliche proprio quando la vulnerabilità macroeconomica è maggiore.

Figura 4.7 - Oneri sugli interessi cumulati fino al 2050. La figura riporta la mediana del premio sovrano italiano al 2050, in punti base, sotto saldo primario fisso allo 0,95% del PIL e spread sovrano endogeno. Per ciascuna combinazione di scenario SSP e severità del danno, il punto vuoto indica il riferimento senza danni climatici e il punto pieno la corrispondente traiettoria con danni climatici a spesa costante; la differenza fra i due, etichettata in figura, è lo spread climatico imputabile al canale del premio al rischio sovrano.

La Figura 4.7 isola in forma compatta il canale del premio al rischio. La grandezza riportata è lo *spread climatico*, ossia la differenza, in punti base, fra il valore mediano del costo di finanziamento nei rami con danni climatici e quello del riferimento senza danni, sullo stesso percorso SSP. Con danni moderati e spesa costante il premio sovrano si allarga di +14,7 punti base in SSP2-RCP4.5 e di +16,2 punti base in SSP3-RCP7.0; con danni elevati l'allargamento sale rispettivamente a +41,5 e +45,7 punti base. Letta in livelli, la mediana al 2050 passa da 33,6 a 75,0 punti base nello scenario peggiore di SSP2-RCP4.5 e da 49,1 a 94,9 punti base in quello peggiore di SSP3-RCP7.0.

Due osservazioni sono qui rilevanti. La prima è che lo spread climatico cresce in modo più che proporzionale passando da danni moderati a danni elevati, infatti l'allargamento triplica, segnalando una chiara non linearità nella reazione del premio sovrano all'accumulo di debito sotto shock climatico. La seconda è che il canale del premio si

somma a quelli già visualizzati nelle Figure 4.5 e 4.6: il maggior debito alimenta uno spread più ampio, lo spread più ampio si traduce in un servizio del debito più elevato, soprattutto nelle code, e questo a sua volta retroagisce sulla traiettoria di debito/PIL.

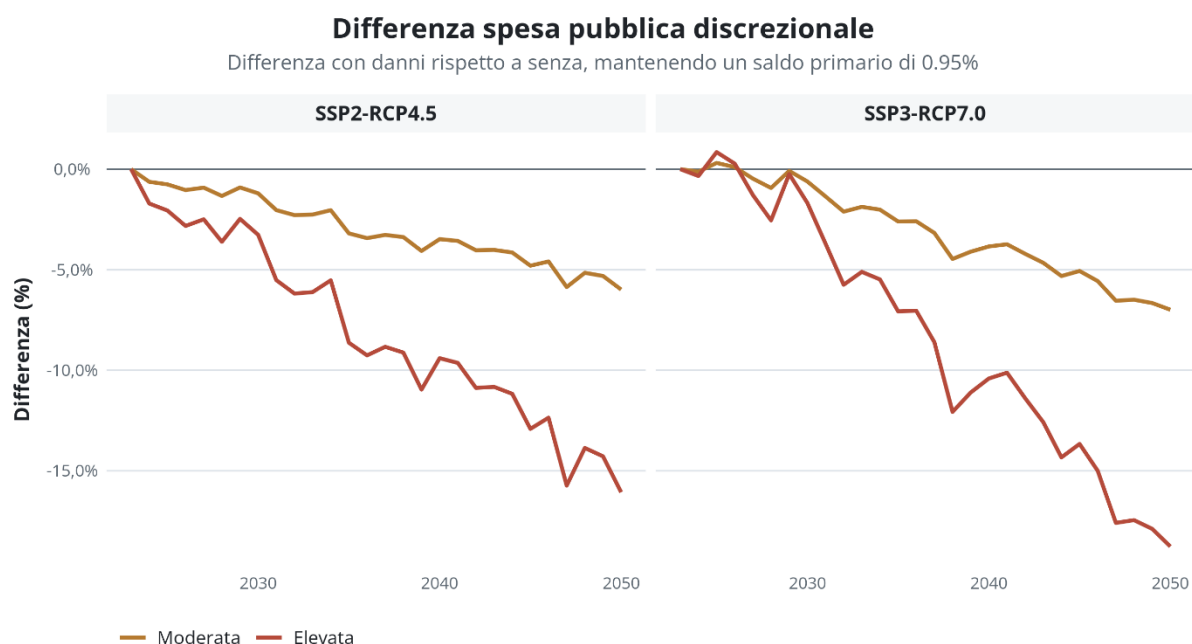


Figura 4.8 - Riduzione della spesa pubblica discrezionale. La figura riporta la variazione percentuale della spesa pubblica discrezionale italiana fino al 2050 rispetto al riferimento senza danni climatici, sotto saldo primario fisso allo 0,95% del PIL e spread sovrano endogeno. La spesa discrezionale è approssimata al 30% della spesa primaria implicita dalla regola di bilancio, in linea con la composizione del bilancio italiano (Coricelli e Fiorito, 2013). La regola di spesa costante è esclusa per costruzione, perché implica una variazione nulla rispetto al riferimento sotto la stessa regola.

Il pannello conclusivo del quadro fiscale isola l'impatto dei danni sulla spesa primaria. La grandezza riportata è la variazione percentuale della spesa pubblica discrezionale italiana, definita come quella quota della spesa primaria implicata dalla regola di bilancio (saldo primario fisso allo 0,95%) che è effettivamente comprimibile nel breve periodo, calibrata a circa il 30% del totale sulla base della composizione di bilancio italiana (Coricelli e Fiorito, 2013). Al 2050 la spesa discrezionale deve comprimersi del 6,0% e del 16,1% nello scenario SSP2-RCP4.5, a seconda dell'intensità del danno, e del 7,0% e del 18,8% in SSP3-RCP7.0, per mantenere invariato l'ancoraggio del saldo primario.

Letta insieme ai pannelli su debito, interessi e premio sovrano, questa figura chiarisce il trade-off fondamentale fra le due regole fiscali considerate. La regola di saldo primario fisso contiene meglio il rapporto debito/PIL e l'allargamento dello spread, ma trasferisce l'aggiustamento sulla spesa discrezionale; ad esempio, nel caso più severo ciò implica un taglio prossimo al 19% della componente comprimibile della spesa primaria. La regola di spesa costante evita questo aggiustamento, ma lascia deteriorare

molto più rapidamente debito, interessi e premio sovrano, come documentato dalle Figure 4.5, 4.6 e 4.7.

Nel complesso, il processo che collega il rischio climatico al bilancio pubblico italiano emerge con chiarezza. Un riscaldamento locale più intenso della media europea si traduce, attraverso la funzione di danno, in una perdita di PIL che si propaga simultaneamente a stock di debito, costo del finanziamento, premio sovrano e spazio fiscale. Con spread endogeno una parte non trascurabile dell'aggiustamento si scarica direttamente sul prezzo dei titoli di Stato (Figura 4.7), che a sua volta retroagisce sulle code dell'onere per interessi.

L'aspetto che il caso italiano rende più visibile è il ruolo della condizione di partenza. L'Italia entra in questo orizzonte con un rapporto debito/PIL di 140% (oltre 3000 miliardi di euro). Anche in uno scenario di riferimento senza shock climatici, l'albero degli scenari del modello assegna una probabilità superiore al 20% al fatto che la traiettoria del debito superi la soglia critica del 200% del PIL al 2050. Da sottolineare come questa non sia una previsione puntuale ma semplicemente una proiezione che misura la quantità di scenari macro-finanziari in cui il rapporto debito/PIL sfora la suddetta soglia. Su un quadro fiscale già così esposto, il rischio climatico non agisce come uno shock marginale ma come un moltiplicatore: porta la probabilità di sfioramento al 39-44% nelle combinazioni più severe, sposta verso l'alto le mediane di debito e interessi, allarga lo spread sovrano fino a +46 punti base e qualora si cercasse di salvaguardare il debito a discapito della spesa pubblica, implicherebbe una compressione della spesa discrezionale fino a circa il 19%. Mentre per un emittente con basso debito iniziale gli stessi danni climatici apparirebbero come un costo gestibile, nel caso italiano si innestano su una vulnerabilità preesistente e ne amplificano in modo materiale la portata. La sostenibilità del debito sovrano italiano non è quindi separabile dal rischio climatico: ogni regola di bilancio che ne ignori l'effetto sottostima il vero costo dell'aggiustamento e, soprattutto, sottostima la probabilità che quell'aggiustamento debba avvenire negli stati del mondo più avversi.

Capitolo 5: Opzioni politiche e tecnologiche per la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici

Nel Capitolo 2 abbiamo presentato il quadro regolatorio che disciplina le politiche climatiche europee e italiane, con particolare attenzione a come tale quadro costituisca un tentativo strutturato di ridurre il rischio climatico.

Dopo aver analizzato gli impatti dei cambiamenti climatici futuri e le loro conseguenze sociali ed economiche nei Capitoli 3 e 4, in questo Capitolo 5 approfondiamo il funzionamento delle politiche climatiche vigenti per la mitigazione e l'adattamento (sezione 5.1), le tecnologie per la neutralità climatica esistenti (sezione 5.2), fornendo infine una stima dei costi da sostenere, di qui ai prossimi decenni, per gli investimenti in mitigazione e adattamento (sezione 5.3).

5.1 Strumenti di politica climatica per la mitigazione e l'adattamento

Le politiche di mitigazione adottate a livello europeo e recepite nel contesto italiano hanno prodotto risultati tangibili nella riduzione delle emissioni di gas serra, contribuendo a orientare il sistema economico verso una progressiva decarbonizzazione. Tuttavia, l'efficacia di tali strumenti si manifesta in modo eterogeneo tra settori e nel tempo, riflettendo sia la diversa intensità regolatoria sia le caratteristiche strutturali dell'economia italiana.

L'evidenza empirica più recente conferma una traiettoria di riduzione delle emissioni, sebbene non lineare. In Italia, le emissioni di gas serra sono diminuite di circa il 30% tra il 1990 e il 2024, passando da 521 a 363 milioni di tonnellate di CO₂ equivalente (ISPRA, 2026). Questo risultato si colloca in linea con la dinamica europea, in cui la riduzione complessiva ha superato il 30% nello stesso periodo. Negli anni più recenti, il trend si è mantenuto ma con una certa volatilità. Nel 2024 le emissioni italiane si sono ridotte del 3,6% su base annua, principalmente per effetto della contrazione delle emissioni nei settori industriale ed energetico, per poi registrare una lieve crescita nel 2025 corrispondente a +0,3% (ISPRA, 2026). Parallelamente, il prodotto interno lordo ha continuato a crescere, determinando una riduzione dell'intensità emissiva dell'economia. Questo fenomeno indica un processo di disaccoppiamento relativo tra crescita economica ed emissioni, già osservato a livello europeo (si veda il capitolo 2), dove tra il 1990 e il 2024 il PIL è aumentato di oltre il 60% a fronte di una riduzione significativa delle emissioni (Eurostat, 2025).

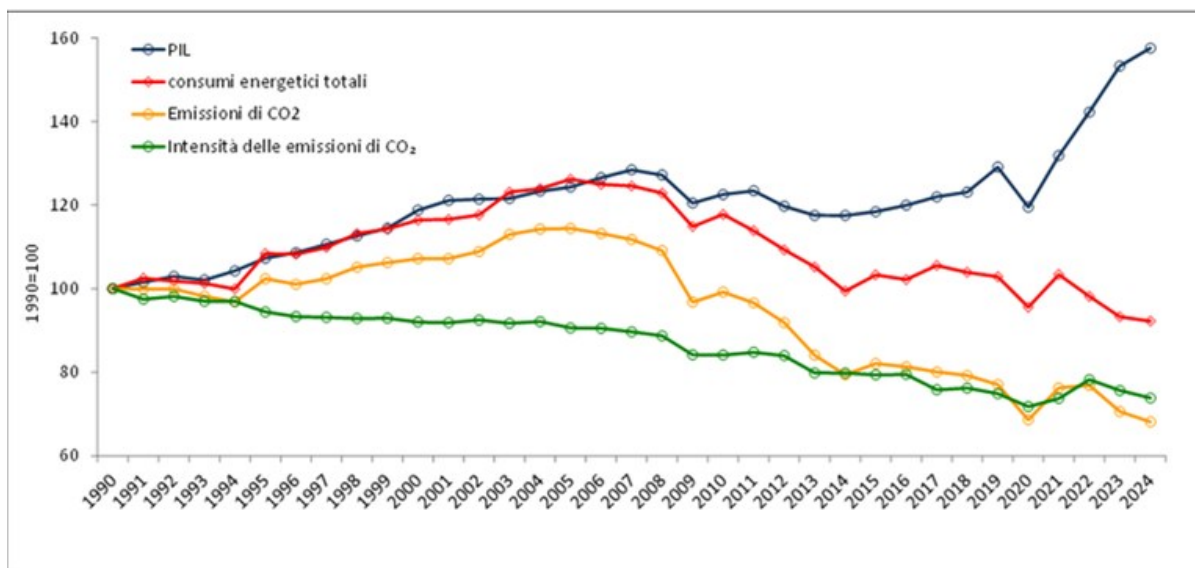


Figura 5.1 - Dinamiche di PIL (linea blu), consumi energetici totali (linea rossa), emissioni di CO₂ (linea gialla), e intensità delle emissioni di CO₂ (linea verde), dal 1990 al 2024. Fonte: ISPRA (2026).

Il sistema europeo di scambio delle emissioni (EU ETS) rappresenta il principale strumento di mitigazione basato sul mercato e costituisce uno dei pilastri della strategia climatica europea. Le evidenze empiriche confermano che esso ha contribuito in modo sostanziale alla riduzione delle emissioni nei settori regolati, pur con risultati differenziati tra comparti produttivi. Nel lungo periodo, l'efficacia del sistema emerge chiaramente dai dati aggregati. Le emissioni nei settori coperti dall'ETS risultano oggi inferiori di circa il 47% rispetto ai livelli del 2005, mentre su un orizzonte più recente si osserva una riduzione del 34% tra il 2013 e il 2023, trainata in larga misura dal settore elettrico (Weitzel & Van der Vorst, 2024). In particolare, la produzione di energia ha registrato un calo delle emissioni pari a circa il 47% nello stesso periodo, grazie alla progressiva sostituzione del carbone e alla diffusione delle fonti rinnovabili (EEA, 2025). Il sistema ETS ha contribuito a questo risultato fornendo un segnale di prezzo crescente e relativamente credibile, che ha incentivato le imprese a investire in efficienza energetica e in tecnologie a minore intensità carbonica.

Nel contesto italiano, tale dinamica si è tradotta in una progressiva riduzione delle emissioni nei settori regolati e in una trasformazione del mix energetico, anche grazie all'aumento del prezzo del carbonio europeo, stabilmente su livelli elevati negli ultimi anni, con un prezzo medio di 73,43 € per tonnellata di CO₂ nel 2025 (a fronte di un prezzo che raramente prima del 2020 aveva superato i 40 €, mantenendosi spesso sotto i 20 €) (ICAP, 2025). Il meccanismo di mercato ha quindi agito come leva per orientare le decisioni di produzione e investimento, confermando la capacità dello strumento di influenzare i comportamenti economici.

Tuttavia, un'analisi disaggregata evidenzia come l'efficacia dell'ETS sia tutt'altro che uniforme. Nei settori industriali ad alta intensità energetica, i progressi risultano più limitati: tra il 1990 e il 2021, hanno ridotto le emissioni di appena il 18,9% (ISPRA, 2026). Inoltre, le riduzioni osservate in alcuni anni recenti appaiono in parte legate a fattori congiunturali, come la contrazione della produzione dovuta ai prezzi energetici elevati, piuttosto che a trasformazioni strutturali dei processi produttivi (EEA, 2025). Un ulteriore elemento di rilievo riguarda la forte concentrazione delle emissioni all'interno del sistema europeo: meno del 2% degli impianti è responsabile di oltre il 40% delle emissioni complessive, il che implica che il percorso di decarbonizzazione europea dipende in larga misura da un numero limitato di grandi operatori industriali (Raude et al., 2025).



Figura 5.2 - Andamento del prezzo dell'Emissions Trading System europeo dalla propria nascita nel 2005 al mese di gennaio 2026. Fonte: ICAP (2026).

Nonostante tali criticità, il sistema ETS gode di un livello relativamente elevato di accettazione tra gli operatori economici. Secondo una consultazione pubblica della European Commission, circa il 69% degli stakeholder considera l'ETS uno strumento efficace e rilevante per la riduzione delle emissioni, mentre oltre la metà lo ritiene almeno moderatamente efficiente in termini di costi (European Commission, 2025). Evidenze empiriche suggeriscono inoltre che un aumento del prezzo del carbonio non ha avuto effetti negativi sistematici sulla redditività delle imprese, ma ha piuttosto stimolato investimenti in innovazione e tecnologie pulite (Kalantzis et al., 2024).

L'introduzione dell'ETS2, prevista dapprima a partire dal 2027 e poi slittata al 2028, estende il prezzo del carbonio ai combustibili utilizzati nei trasporti e negli edifici pubblici e privati. L'efficacia di tale strumento dipenderà dalla sua capacità di influenzare i comportamenti senza generare effetti regressivi eccessivi sulle famiglie (European Commission, 2024). L'estensione del prezzo del carbonio ai settori dei trasporti e degli edifici comporta infatti un probabile trasferimento dei costi energetici ai consumatori finali, incidendo soprattutto in presenza di domanda poco elastica. Questo aspetto è particolarmente rilevante nel contesto italiano, dove circa il 9% delle famiglie, ovvero 2,4 milioni di nuclei pari a 5,3 milioni di italiani, si trova in condizioni di povertà energetica (Ufficio studi della CGIA, 2026). In tale contesto, l'introduzione dell'ETS2 rischia di incidere in modo sproporzionato sui gruppi a basso reddito, che dispongono di minori margini di adattamento nel breve periodo (Borghesi & Cammeo, 2025). L'impatto distributivo dello strumento dipende pertanto dall'efficacia delle misure compensative previste a livello europeo dal Piano Sociale per il Clima, che destinerà all'Italia 7,02 miliardi di €.

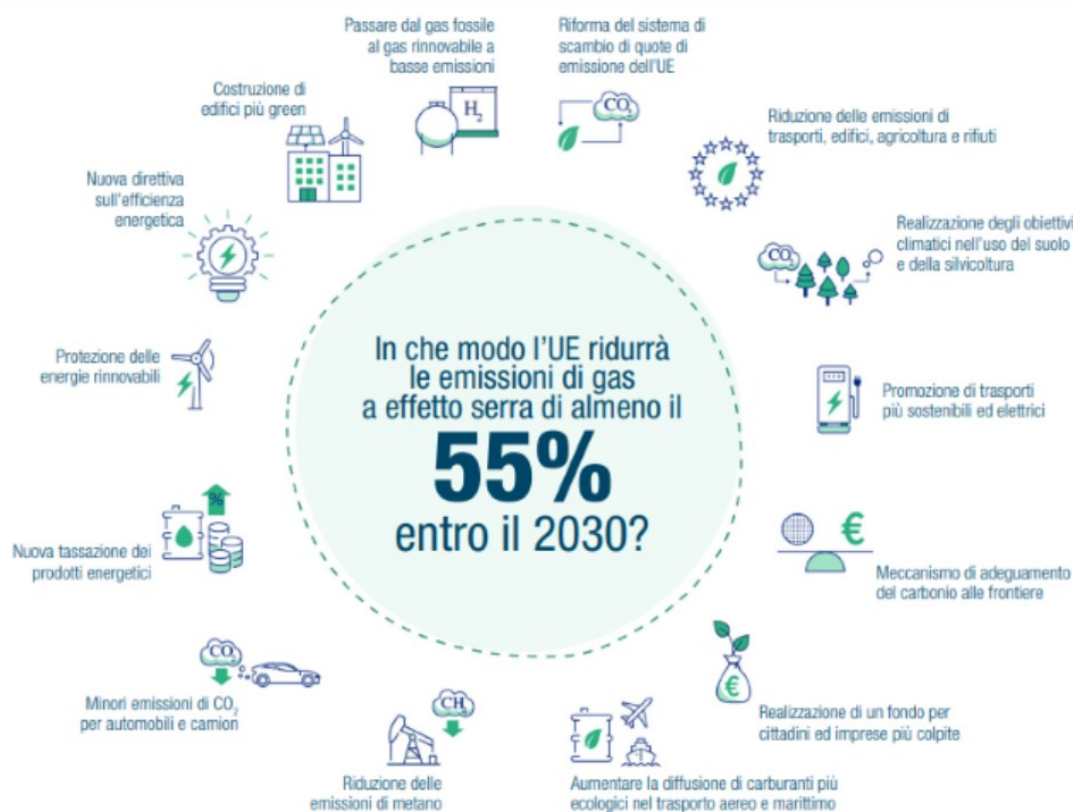


Figura 5.3 - Categorie di intervento del pacchetto di misure climatiche europeo denominato Fit for 55. Fonte: European Commission (2024).

Accanto a questi sviluppi, il funzionamento dell'ETS si confronta oggi con un contesto geopolitico profondamente mutato. La crisi innescata dalle tensioni prima in Ucraina e

poi in Medio-Oriente ha determinato un aumento significativo dei prezzi dell'energia, incidendo sui costi di produzione e alimentando pressioni politiche per una revisione temporanea del sistema di scambio delle emissioni. In diversi Stati membri, tra cui l'Italia, sono emerse richieste di sospensione, motivate dalla necessità di limitare gli effetti distributivi del prezzo dell'ETS nel breve periodo. Tali dinamiche riflettono una tensione strutturale tra obiettivi climatici di lungo periodo e stabilità economica nel breve termine. In questo contesto, sarebbe auspicabile non mettere in discussione il ruolo del prezzo del carbonio, ma evidenziare la necessità di rafforzare il quadro complessivo di policy. In particolare, emerge l'esigenza di utilizzare in modo più strategico i proventi delle aste e di affiancare al mercato del carbonio strumenti di supporto alla transizione industriale e alla protezione delle fasce più vulnerabili.

L'EU ETS si configura dunque come uno strumento efficace nel contribuire alla riduzione delle emissioni, ma la sua sostenibilità dipende sempre più dalla capacità di integrarlo con altre politiche climatiche, industriali e sociali. Infatti, l'efficacia delle politiche dipende spesso dalla coerenza e dalla complementarità dei cosiddetti policy mix (Rogge & Reichardt, 2016).

Un contributo fondamentale alla riduzione delle emissioni deriva dalla trasformazione del sistema energetico, sostenuta dalle politiche europee sulle energie rinnovabili e sull'efficienza energetica. Nel breve periodo, la crescita delle rinnovabili si è rafforzata. Nel 2024 la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili in Italia ha superato i 130 TWh, arrivando a rappresentare circa il 49% della generazione nazionale, un valore prossimo alla parità con quella da fonti fossili¹. Questo risultato segnala una ripresa degli investimenti dopo una fase di rallentamento osservata nel decennio precedente. Tuttavia, il confronto europeo evidenzia ancora un ritardo strutturale. Nel decennio 2013-2023, i consumi finali di energia da fonti rinnovabili in Italia sono cresciuti del 9%, a fronte di una media europea superiore al 38%, con dinamiche particolarmente accelerate in Paesi come la Spagna (Eurostat, 2025). Anche in termini di incidenza sui consumi finali, l'Italia si colloca al di sotto della media UE, con circa il 19,6% nel 2023, in ritardo rispetto all'obiettivo target del 39,4% entro il 2030 (European Commission, 2025).

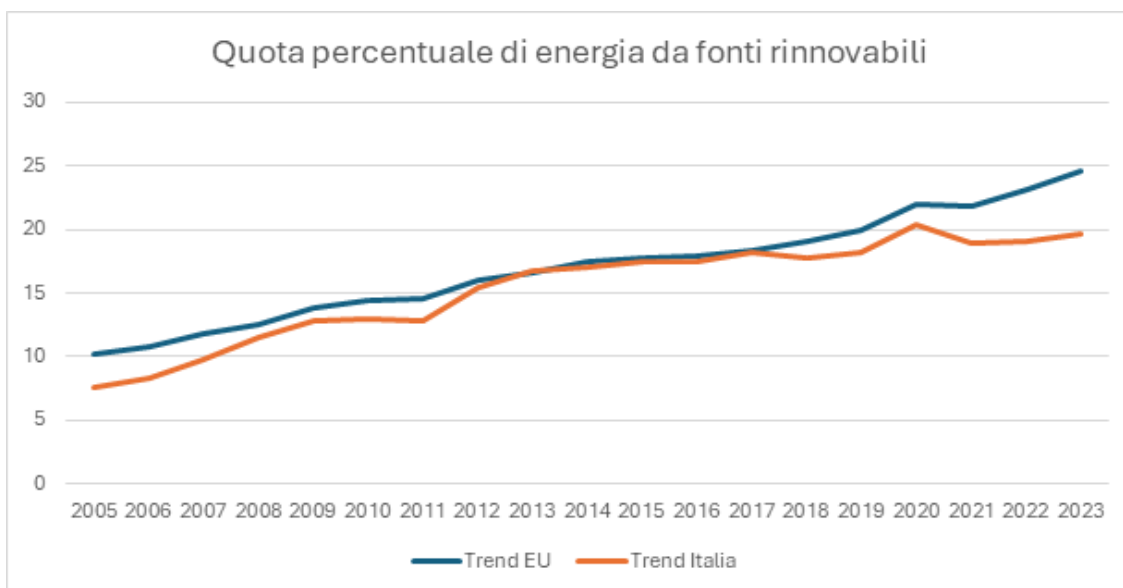


Figura 5.4 - Crescita della quota di energia da fonti rinnovabili sia a livello europeo (linea blu) che per l'Italia (linea arancione). Fonte: Eurostat (2025).

Oltre alle politiche di promozione delle energie rinnovabili, la strategia climatica europea e nazionale si articola in un insieme più ampio di strumenti che agiscono su leve complementari e contribuiscono in modo differenziato alla riduzione delle emissioni e, di conseguenza, alla mitigazione del cambiamento climatico.

Come già intravisto nel Capitolo 2, un ambito rilevante è rappresentato dalle politiche di efficienza energetica, che mirano a ridurre la domanda complessiva di energia. A livello europeo, la revisione della direttiva EED ha introdotto un obiettivo vincolante di riduzione dei consumi energetici pari a circa l'11,7% entro il 2030 rispetto allo scenario di riferimento al 2020 (European Commission, 2023). Considerato che circa il 75% del patrimonio edilizio europeo è ancora energeticamente inefficiente (European Commission, 2023), il potenziale di riduzione delle emissioni associato a tali politiche rimane particolarmente elevato. In Italia, misure come il Superbonus hanno contribuito alla diffusione degli interventi di riqualificazione, con 219 miliardi di € di investimenti attivati nel periodo 2020-2023, sebbene con criticità in termini di sostenibilità fiscale e di efficienza energetica effettivamente conseguita (Corte dei Conti, 2023).

Uno strumento chiave è costituito dagli standard regolatori e normativi, in particolare quelli relativi alle emissioni dei veicoli e alle prestazioni energetiche degli edifici. I regolamenti europei sulle emissioni di CO₂ per autovetture e veicoli commerciali leggeri prevedono una riduzione del 90% delle emissioni per le nuove immatricolazioni entro il 2035, implicando una progressiva eliminazione dei motori a combustione interna (European Union, 2025). Analogamente, la revisione della direttiva sulla prestazione energetica degli edifici (EPBD) introduce obblighi di riqualificazione per gli edifici più

inefficienti, che in Italia rappresentano una quota significativa del patrimonio costruito, contribuendo in modo rilevante alle emissioni del settore civile.

Un ulteriore ambito di intervento riguarda i meccanismi fiscali e gli incentivi economici, che affiancano il prezzo del carbonio. Oltre alla tassazione energetica, questi includono incentivi per tecnologie a basse emissioni, come veicoli elettrici, pompe di calore e impianti rinnovabili. Tuttavia, l'efficacia di tali strumenti è strettamente legata alla loro stabilità e prevedibilità nel tempo. In Italia, la frequente revisione dei meccanismi di incentivo ha talvolta generato effetti di stop-and-go negli investimenti, riducendone l'impatto complessivo (IEA, 2024).

Un ruolo crescente è inoltre svolto dagli strumenti di politica finanziaria, volti a sostenere la transizione nei settori hard-to-abate. Tra questi rientrano i contratti per differenza sul carbonio (CCfD), i fondi per l'innovazione e i programmi europei come l'Innovation Fund, che dispone di una dotazione stimata superiore a 40 miliardi di euro per il periodo 2020-2030, finanziata dai proventi dell'ETS (European Commission, 2024). Tali strumenti sono essenziali per favorire lo sviluppo e la diffusione di tecnologie ancora non pienamente competitive, come l'idrogeno rinnovabile, la cattura e stoccaggio della CO₂ (CCS) e i combustibili sintetici.

Infine, un elemento trasversale è rappresentato dalle politiche di informazione e trasparenza, che contribuiscono a orientare i comportamenti di imprese e consumatori. In questo senso, la crescente standardizzazione delle informazioni ESG consente una maggiore comparabilità tra operatori e favorisce una riallocazione del capitale verso attività a minore intensità emissiva. La relazione tra disclosure climatica e costo del capitale è supportata da evidenze empiriche specifiche. In particolare, Eliwa et al. (2019), su un campione di imprese europee, mostrano che una maggiore qualità della disclosure ESG è associata a una riduzione significativa del costo del debito, attribuibile alla diminuzione del rischio percepito da parte dei creditori e al miglioramento della trasparenza informativa. Il risultato è coerente con l'analisi sistematica condotta da Friede et al. (2015), che hanno esaminato oltre 2.000 studi empirici e rilevano come, nella maggioranza dei casi, la qualità delle pratiche ESG sia associata a migliori condizioni finanziarie, inclusa una riduzione del costo del capitale.

Tuttavia, l'entità di questi effetti dipende in misura rilevante dal contesto istituzionale e dalla qualità delle informazioni disponibili. Analisi di policy mostrano infatti che l'impatto della disclosure climatica è più significativo nei sistemi caratterizzati da minore trasparenza iniziale, mentre risulta più contenuto nei contesti già maturi.

Box 5.1: Le criticità nella decarbonizzazione dei trasporti

Il settore dei trasporti rappresenta uno degli elementi di criticità nel contesto italiano. A differenza di altri comparti, le emissioni dei trasporti sono aumentate di circa il 7% rispetto ai livelli del 1990, contribuendo oggi a circa il 25% delle emissioni nazionali complessive (ISPRA, 2026). La quasi totalità di tali emissioni, oltre il 90%, deriva dal trasporto stradale, a conferma del ruolo dominante della mobilità su gomma nel sistema dei trasporti italiano.

A livello europeo, il quadro risulta analogo: il settore dei trasporti è l'unico tra i principali comparti economici in cui le emissioni non sono diminuite in modo significativo rispetto al 1990, registrando anzi un aumento complessivo di circa il 20% fino al periodo pre-pandemico (EEA, 2023). Questo andamento riflette fattori strutturali quali la crescita della domanda di mobilità, l'espansione del trasporto merci su strada e la lentezza nel rinnovamento del parco veicolare.

Nel caso italiano, la dinamica è ulteriormente aggravata da specificità strutturali. Il tasso di motorizzazione è tra i più elevati in Europa, con oltre 700 autovetture ogni 1.000 abitanti, e il trasporto merci continua a essere fortemente sbilanciato verso la modalità stradale, che copre circa l'85-90% del totale (Eurostat, 2025). Questi elementi rendono particolarmente complessa la riduzione delle emissioni, in quanto implicano cambiamenti non solo tecnologici, ma anche infrastrutturali e comportamentali².

Le politiche di mitigazione analizzate nella sezione precedente hanno dimostrato una capacità significativa di ridurre le emissioni e orientare il sistema economico verso un percorso di decarbonizzazione, sebbene con risultati eterogenei tra settori. Tuttavia, anche in presenza di politiche di mitigazione efficaci, una quota rilevante degli impatti del cambiamento climatico risulta ormai inevitabile nel breve e medio periodo, a causa dell'inerzia dei sistemi climatici e delle emissioni già accumulate in atmosfera. In questo contesto, le politiche di adattamento assumono un ruolo complementare e sempre più centrale, in quanto mirano a ridurre la vulnerabilità dei sistemi economici e territoriali rispetto agli impatti climatici già in atto. A differenza della mitigazione, che opera prevalentemente attraverso strumenti di regolazione e mercato su scala nazionale ed europea, l'adattamento richiede interventi più localizzati e fortemente dipendenti dalle caratteristiche fisiche e socio-economiche dei territori. Ne deriva che l'efficacia complessiva della politica climatica dipende dalla capacità di integrare questi due ambiti di intervento: da un lato, ridurre progressivamente le emissioni per contenere i rischi futuri; dall'altro, rafforzare la resilienza del sistema economico e sociale rispetto agli impatti già manifesti.

Come detto, le politiche di adattamento si caratterizzano per una forte dimensione territoriale e per un'elevata eterogeneità degli strumenti, che riflettono la natura localizzata degli impatti climatici. Nel contesto italiano, tali politiche si basano su un

insieme integrato di strumenti di pianificazione, investimenti infrastrutturali e sistemi di gestione del rischio.

Il principale riferimento strategico è rappresentato dal Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC), che individua misure di adattamento per i principali settori esposti, tra cui risorse idriche, agricoltura, infrastrutture e aree urbane. Tuttavia, l'attuazione del piano dipende in larga misura dalla capacità delle amministrazioni regionali e locali di integrare tali indirizzi nella pianificazione territoriale e urbanistica, dove si concentrano le competenze operative.

Un ruolo centrale è svolto dagli investimenti in prevenzione del rischio idrogeologico, particolarmente rilevanti in Italia. Nell'analisi del 2021 di ISPRA è emerso che oltre il 94% dei comuni italiani (7.423 su circa 7.900) era esposto a rischio di frane, alluvioni o erosione costiera. In questo contesto, gli interventi infrastrutturali, tra cui opere di consolidamento dei versanti, sistemi di drenaggio urbano e infrastrutture verdi, costituiscono una componente essenziale delle politiche di adattamento. La letteratura internazionale indica che i suddetti investimenti presentano un elevato rapporto benefici-costi: la Banca Mondiale stima che ogni € investito in prevenzione possa generare tra 4 e 7 € di risparmi su danni evitati, con alcune stime che suggeriscono risparmi fino a 10 € (World Bank, 2019). Nonostante la crescente attenzione al tema dell'adattamento, quanto emerso nei capitoli 3 e 4 indica che il livello di protezione del sistema economico e territoriale non è ancora adeguato all'intensità crescente degli eventi climatici. Una delle principali criticità riguarda il persistente squilibrio tra spesa per la prevenzione e spesa per la gestione delle emergenze. In Italia, la spesa pubblica per eventi climatici è ancora prevalentemente concentrata su interventi ex post, mentre gli investimenti in prevenzione risultano insufficienti e discontinui nel tempo (Corte dei Conti, 2023).

Un elemento centrale nella valutazione delle politiche di adattamento riguarda il ruolo delle assicurazioni nella gestione dei rischi climatici. In questo ambito, il caso italiano si distingue per un livello particolarmente elevato di protection gap, ossia la quota di perdite economiche che resta scoperta e non viene assorbita dal sistema assicurativo. Secondo le stime più recenti, circa il 95% dei danni causati da eventi climatici estremi in Italia non è assicurato, una quota nettamente superiore rispetto ad altri Paesi europei (EEA, 2023; EEA, 2024; IVASS, 2023). In concreto, questo significa che, nella maggior parte dei casi, i costi ricadono direttamente su famiglie, imprese e finanza pubblica.

Anche a livello europeo la copertura assicurativa rimane limitata (in media solo un quarto delle perdite è assicurato), ma il divario è particolarmente marcato nel caso italiano (EEA, 2023). La scarsa diffusione delle assicurazioni ha anche un effetto meno visibile ma rilevante: riduce gli incentivi alla prevenzione. Se il rischio non è adeguatamente "prezzato", cioè incorporato nei costi sostenuti da famiglie e imprese,

diventa più difficile orientare comportamenti e investimenti verso soluzioni più resilienti. Il risultato è un sistema che tende a reagire agli eventi, piuttosto che anticiparli. In questo contesto, l'introduzione di un obbligo assicurativo per le imprese contro i rischi catastrofici, previsto in Italia a partire dal 2025, rappresenta un primo tentativo di riequilibrare il sistema e ridurre il gap esistente. Tuttavia, la sua efficacia dipenderà da un equilibrio non semplice: da un lato, garantire premi sostenibili e accessibili; dall'altro, assicurare una copertura adeguata e basata su dati affidabili sui rischi. Un ruolo importante potrebbe essere svolto dal settore pubblico, in particolare attraverso meccanismi di riassicurazione o condivisione del rischio.

5.2 Tecnologie di mitigazione e adattamento

La transizione climatica è fondamentalmente un processo di trasformazione tecnologica sistemica, nel quale l'efficacia delle politiche dipende dalla disponibilità e dalla diffusione delle tecnologie. Secondo l'IEA, una quota rilevante delle riduzioni di emissioni necessarie per raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 può essere conseguita con tecnologie già disponibili, mentre una parte significativa dipende da innovazioni ancora in fase di sviluppo o prima di commercializzazione (IEA, 2023). Nella proiezione Net Zero Roadmap della stessa Agenzia, le tecnologie già mature - efficienza energetica, energie rinnovabili, elettrificazione - possono coprire circa il 75% delle riduzioni necessarie entro il 2030, mentre il restante 25% richiede tecnologie emergenti come l'idrogeno verde e tecnologie di cattura, utilizzo e stoccaggio della CO₂ (CCUS).

5.2.1 Efficienza energetica

Dal punto di vista tecnologico, l'efficienza energetica comprende un insieme ampio di soluzioni mature, tra cui isolamento degli edifici, sistemi di riscaldamento ad alta efficienza (come le pompe di calore), motori elettrici efficienti, tecnologie di recupero del calore nei processi industriali, sistemi di gestione digitale dell'energia e apparecchiature a basso consumo. La loro diffusione ha già prodotto effetti rilevanti: nei Paesi membri dell'IEA, i miglioramenti di efficienza conseguiti tra il 2000 e il 2021 hanno evitato un aumento dei consumi energetici finali pari a circa il 24%, con contributi significativi da industria e servizi (58%), edifici (23%) e trasporti (19%) (IEA, 2022). Nonostante la maturità tecnologica, il ritmo di diffusione dell'efficienza energetica rimane inferiore a quanto necessario. Secondo la stessa Agenzia, il miglioramento dell'intensità energetica globale è stato pari a circa l'1% nel 2023, un valore significativamente inferiore al tasso medio osservato nel decennio precedente e ben al di sotto del ritmo richiesto per allinearsi agli obiettivi climatici (IEA, 2024). Questo evidenzia come il principale limite non sia la disponibilità delle tecnologie, ma la loro implementazione su larga scala.

Nel settore degli edifici, il potenziale di riduzione dei consumi è particolarmente elevato. A livello globale, gli edifici sono responsabili di circa il 30% del consumo finale di energia e di una quota rilevante delle emissioni indirette legate all'uso di elettricità e calore (IEA, 2023). In Europa, questo potenziale è ulteriormente amplificato dall'età del patrimonio edilizio, in larga parte costruito prima dell'introduzione di standard energetici avanzati.

Nel contesto italiano, l'efficienza energetica rappresenta una leva particolarmente rilevante sia per la riduzione delle emissioni sia per il contenimento dei costi energetici. Secondo ENEA, nel 2023 i risparmi energetici annuali conseguiti in Italia hanno superato i 3,6 Mtep, pari a circa il 92% dell'obiettivo previsto per quell'anno nell'ambito del Piano Nazionale Integrato Energia e Clima (ENEA, 2024). Permangono tuttavia alcune criticità strutturali. Negli edifici, gli interventi più efficaci richiedono spesso investimenti iniziali elevati e tempi di ritorno medio-lunghi, mentre la frammentazione della proprietà può ostacolare decisioni coordinate. Nel settore industriale, l'adozione delle tecnologie più avanzate è talvolta limitata da vincoli operativi e dalla necessità di integrare gli interventi nei processi produttivi esistenti. A ciò si aggiunge il cosiddetto effetto rebound (effetto di rimbalzo): quando un miglioramento tecnologico riduce il costo unitario dell'energia, gli utenti tendono ad aumentarne l'uso, per cui una parte dei risparmi energetici ottenuti viene compensata da un aumento dei consumi, riducendo il beneficio netto complessivo (ENEA, 2024).

Nel complesso, l'efficienza energetica si configura come una tecnologia ad alta maturità e con un elevato rapporto costi-benefici, ma il suo contributo effettivo alla decarbonizzazione dipende dalla capacità di superare le barriere all'adozione e di accelerarne la diffusione. In questo senso, essa rappresenta non solo una leva autonoma di riduzione delle emissioni, ma anche una condizione abilitante per lo sviluppo delle altre tecnologie della transizione, in particolare energie rinnovabili ed elettrificazione.

5.2.2 Energie rinnovabili

Un elemento determinante della diffusione delle energie rinnovabili è rappresentato dalla progressiva riduzione dei costi delle tecnologie. Tra il 2010 e il 2023, il costo medio globale dell'energia solare fotovoltaica è diminuito di circa l'85%, mentre quello dell'eolico onshore si è ridotto di circa il 55% (IRENA, 2023; IRENA, 2025). Parallelamente, anche i fattori di capacità e le prestazioni tecnologiche sono migliorati, contribuendo a rendere queste tecnologie sempre più competitive rispetto alle fonti fossili. La suddetta dinamica ha portato le rinnovabili a rappresentare, nella maggior parte dei contesti, l'opzione più economica per la nuova capacità di generazione elettrica. Secondo la International Energy Agency, nel 2023 circa il 90% della nuova

capacità elettrica installata a livello globale è stata costituita da fonti rinnovabili, evidenziando il ruolo ormai dominante di queste tecnologie nei sistemi energetici in espansione (IEA, 2024). In molti casi, il costo livellato dell'energia (LCOE) da solare ed eolico risulta inferiore rispetto a quello delle nuove centrali a gas o carbone, soprattutto in contesti caratterizzati da elevata volatilità dei prezzi energetici.

Questa evoluzione ha assunto particolare rilevanza durante la recente crisi energetica. L'aumento dei prezzi del gas naturale ha infatti rafforzato il ruolo delle rinnovabili non solo come strumento di mitigazione climatica, ma anche come fattore di sicurezza energetica e stabilizzazione dei costi, riducendo l'esposizione ai mercati internazionali dei combustibili fossili (IEA, 2024).

Nel contesto italiano, la diffusione delle rinnovabili ha registrato una ripresa significativa negli ultimi anni, ma rimane inferiore rispetto al ritmo richiesto per il raggiungimento degli obiettivi al 2030. Nel 2024 sono stati installati circa 7,5 GW di nuova capacità, ma nel 2025 si osserva un rallentamento rispetto all'anno precedente, con una riduzione delle nuove installazioni pari a circa l'8% (Fondazione Sviluppo Sostenibile, 2025).

Dal punto di vista tecnologico, le principali fonti rinnovabili presentano caratteristiche operative profondamente diverse, che ne influenzano il ruolo nei sistemi energetici. Il solare fotovoltaico è una tecnologia modulare, scalabile e caratterizzata da tempi di installazione relativamente brevi, ma presenta fattori di capacità relativamente contenuti, generalmente compresi tra il 15% e il 25% a seconda delle condizioni geografiche. L'eolico, in particolare quello onshore, offre fattori di capacità più elevati, tipicamente tra il 25% e il 40%, mentre l'eolico offshore può superare il 45%, grazie a condizioni di vento più stabili (IEA, 2024).

Un elemento centrale è rappresentato dal miglioramento delle prestazioni tecnologiche. Negli ultimi anni si è assistito a un incremento significativo dell'efficienza dei moduli fotovoltaici, con valori commerciali che hanno superato il 20%, e a un aumento delle dimensioni e della potenza unitaria delle turbine eoliche, che oggi possono superare i 10-15 MW per unità nel caso dell'offshore. Questi progressi hanno contribuito a ridurre i costi per unità di energia prodotta e a migliorare la competitività delle tecnologie rinnovabili.

Dal punto di vista tecnologico, una delle principali criticità delle rinnovabili è rappresentata dalla loro intermittenza. La produzione da fonti come solare ed eolico dipende infatti da condizioni meteorologiche variabili, rendendo necessario lo sviluppo di sistemi di flessibilità, tra cui accumuli elettrochimici, reti intelligenti e gestione della domanda. Secondo l'IEA, la capacità globale di accumulo tramite batterie è cresciuta rapidamente negli ultimi anni, superando i 90 GW nel 2023, ma rimane ancora

insufficiente rispetto ai livelli necessari per supportare una penetrazione molto elevata delle rinnovabili (IEA, 2024).

Un ulteriore elemento di fragilità riguarda la distribuzione settoriale delle rinnovabili. Mentre il settore elettrico mostra una dinamica di crescita sostenuta, la diffusione nei consumi termici e nei trasporti è più lenta. In Italia, la quota di rinnovabili nei trasporti si attesta intorno al 10,3% dei consumi energetici, un valore ancora distante dagli obiettivi europei al 2030 (Eurostat, 2024). Questo riflette limiti tecnologici e infrastrutturali, in particolare nella diffusione di soluzioni alternative ai combustibili fossili nei segmenti più difficili da elettrificare.

Dal punto di vista tecnologico, l'elettrificazione si fonda su un insieme di soluzioni mature e già disponibili su larga scala. I motori elettrici, ad esempio, convertono in lavoro utile circa il 70% dell'energia in ingresso, rispetto al 30% dei motori a combustione interna, evidenziando un vantaggio sostanziale in termini di efficienza (IEA, 2023). Analogamente, le pompe di calore utilizzate negli edifici operano con coefficienti di prestazione (COP, ossia il rapporto tra energia termica prodotta ed energia elettrica consumata) tipicamente superiori a 3, producendo cioè più di tre unità di calore per ogni unità di elettricità impiegata. Questo rende l'elettrificazione una tecnologia non solo sostitutiva, ma anche intrinsecamente più efficiente.

A livello sistemico, l'elettrificazione sta già modificando la struttura dei consumi energetici. Nell'Unione europea, l'elettricità rappresenta oggi circa il 23% dei consumi finali di energia, una quota destinata ad aumentare significativamente nei prossimi decenni (Eurostat, 2024). Secondo scenari della European Commission e della International Renewable Energy Agency, tale quota potrebbe superare il 50% entro il 2050 in traiettorie compatibili con la neutralità climatica (European Commission, 2023; IREA, 2023). Questo riflette una progressiva sostituzione dei combustibili fossili nei principali settori di consumo. Nel settore dei trasporti, i veicoli elettrici rappresentano la principale applicazione di questa trasformazione tecnologica. A livello globale, il consumo di elettricità associato alla mobilità elettrica ha raggiunto circa 180 TWh nel 2024, registrando un aumento del 60% rispetto all'anno precedente (IEA, 2025). Questo sviluppo evidenzia un fenomeno rilevante: pur in presenza di una crescita della domanda di mobilità, il consumo energetico complessivo del settore può stabilizzarsi o crescere più lentamente, grazie alla maggiore efficienza dei veicoli elettrici rispetto a quelli tradizionali. Nel settore degli edifici, la diffusione delle pompe di calore rappresenta una delle principali traiettorie di elettrificazione. Analogamente, nel settore industriale, una quota rilevante dei processi a bassa e media temperatura può essere elettrificata attraverso tecnologie già disponibili, come forni elettrici e sistemi di riscaldamento industriale avanzati (IREA, 2025).

Nonostante il suo elevato potenziale, l'elettrificazione presenta alcune criticità tecniche. In primo luogo, comporta un aumento significativo della domanda di

elettricità, che richiede un'espansione coordinata della capacità di generazione e delle infrastrutture di rete. In secondo luogo, la sua efficacia dipende in modo diretto dal grado di decarbonizzazione del mix elettrico: senza un'elevata quota di produzione da fonti rinnovabili, i benefici in termini di emissioni risultano parziali. Questo aspetto è evidenziato anche dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change*, che sottolinea come l'elettrificazione sia particolarmente efficace solo se accompagnata da una parallela decarbonizzazione della produzione elettrica (IPCC, 2022).

Box 5.2: Aviazione sostenibile e carburanti alternativi (SAF)

Il settore dell'aviazione è tra i più difficili da decarbonizzare, a causa dell'elevata densità energetica richiesta e dei limiti dell'elettrificazione per i voli a medio-lungo raggio. In questo contesto, i Sustainable Aviation Fuels (SAF) rappresentano la principale soluzione tecnologica nel breve e medio periodo. I SAF sono carburanti liquidi compatibili con i motori e le infrastrutture esistenti (drop-in fuels), prodotti da biomasse, rifiuti o, in prospettiva, da idrogeno verde e CO₂ (e-fuels). Possono ridurre le emissioni lungo il ciclo di vita fino all'80%, a seconda delle materie prime e dei processi utilizzati (ICAO, 2023). Nonostante il potenziale, la diffusione è ancora marginale: nel 2023 la produzione globale si è attestata intorno a 0,5 milioni di tonnellate, pari a meno dello 0,1% del fabbisogno del settore. Il principale limite resta economico, con costi attualmente pari a circa 4 volte quelli del cherosene convenzionale (EASA, 2025).

Oltre ai vincoli tecnologici e di scala, un elemento rilevante riguarda il contesto regolatorio. Come evidenziato da Mai (2021) e Sharma et al. (2021), sebbene strumenti come il sistema ETS europeo abbiano contribuito a incentivare la riduzione delle emissioni nel settore, i meccanismi globali come CORSIA si concentrano principalmente sulla compensazione delle emissioni anziché sulla loro riduzione diretta. Questo rafforza il ruolo dei SAF come tecnologia necessaria per una decarbonizzazione effettiva del settore, al di là dei soli strumenti di mercato.

5.2.3 Idrogeno verde

Accanto alle tecnologie per la decarbonizzazione di uso cosiddetto tradizionale, ce ne sono di emergenti che dovrebbero andare a concorrere per la mitigazione del rischio climatico. L'idrogeno verde rappresenta una delle principali tecnologie emergenti, in particolare nei settori *hard-to-abate*, nei quali l'elettrificazione diretta risulta tecnicamente o economicamente complessa. Il suo ruolo deriva dalla possibilità di produrre un vettore energetico a basse emissioni, utilizzabile in processi industriali ad alta intensità energetica e in segmenti del trasporto difficilmente elettrificabili.

Dal punto di vista tecnologico, l'idrogeno verde è prodotto attraverso elettrolisi dell'acqua. Le tecnologie di elettrolisi attualmente più diffuse (alcalina e PEM) presentano un'efficienza tipica compresa tra circa 62% e 70% (LHV), a seconda delle condizioni operative e della tecnologia utilizzata (IEA, 2023). Considerando anche le fasi successive di compressione, trasporto e conversione finale, l'efficienza complessiva della catena energetica risulta significativamente inferiore rispetto all'uso diretto dell'elettricità, limitando l'applicazione dell'idrogeno ai contesti in cui non esistono alternative più efficienti.

A livello globale, la produzione di idrogeno ha raggiunto circa 95 milioni di tonnellate nel 2022, di cui oltre il 99% derivante da fonti fossili (IEA, 2023). Nello scenario Net Zero, la domanda totale è stimata in circa 530 milioni di tonnellate al 2050, con una quota prevalente coperta da idrogeno a basse emissioni (IEA, 2023). Questo implica un'espansione molto significativa della capacità produttiva nei prossimi decenni. La diffusione dell'idrogeno verde è tuttavia ancora limitata. Secondo International Renewable Energy Agency, la capacità globale installata di elettrolizzatori ha raggiunto circa 1,4 GW nel 2023, a fronte di obiettivi che prevedono centinaia di gigawatt entro il 2030 negli scenari di transizione energetica (IREA, 2023). Questo evidenzia un forte divario tra stato attuale e traiettoria necessaria.

Un elemento centrale riguarda i costi. Sempre in accordo con quanto suggerito dalla International Energy Agency, nel 2023 il costo di produzione dell'idrogeno verde si colloca tipicamente tra 3,5 e 6 USD/kg, mentre l'idrogeno prodotto da gas naturale senza cattura della CO₂ (idrogeno grigio) presenta costi generalmente compresi tra 1 e 2 USD/kg, a seconda del prezzo del gas (IEA, 2023). Il differenziale di costo rappresenta una delle principali barriere alla diffusione, anche se è atteso un progressivo calo legato alla riduzione dei costi delle rinnovabili e all'aumento della scala produttiva degli elettrolizzatori. Dal punto di vista applicativo, l'idrogeno è particolarmente rilevante per alcuni settori industriali. Nella produzione di acciaio, ad esempio, può essere utilizzato nei processi DRI (Direct Reduced Iron) in sostituzione del carbone, mentre nella chimica rappresenta già oggi una materia prima fondamentale. Anche nel trasporto pesante e in alcuni segmenti della mobilità a lunga distanza, l'idrogeno e i suoi derivati (come ammoniaca e combustibili sintetici) costituiscono una delle poche opzioni tecnologiche disponibili.

Permangono tuttavia rilevanti criticità infrastrutturali. La diffusione su larga scala dell'idrogeno richiede lo sviluppo di reti dedicate o l'adattamento di infrastrutture esistenti, sistemi di stoccaggio e nuove filiere industriali. Questi elementi comportano tempi di realizzazione lunghi e investimenti elevati, che rallentano l'adozione della tecnologia.

5.2.4 Cattura, utilizzo e stoccaggio della CO₂ (CCUS)

Le tecnologie di cattura, utilizzo e stoccaggio della CO₂ (CCUS) rappresentano una componente rilevante dei percorsi di decarbonizzazione, in particolare nei settori industriali ad alte emissioni e nei processi in cui le emissioni derivano direttamente da reazioni chimiche, oltre che dalla combustione. Il loro ruolo consiste nel ridurre o eliminare le emissioni di CO₂ catturandole alla fonte o direttamente dall'atmosfera, per poi riutilizzarle o immagazzinarle in modo permanente.

Dal punto di vista tecnologico, il CCUS si articola in tre fasi principali: cattura della CO₂, trasporto e stoccaggio. La cattura può avvenire attraverso diverse tecnologie, tra cui processi post-combustione, pre-combustione e ossicombustione, con livelli di efficienza che possono raggiungere fino al 95% delle emissioni catturate negli impianti più avanzati (IEA, 2023). Tuttavia, questi processi sono associati a un significativo consumo energetico aggiuntivo (energy penalty), che può aumentare il fabbisogno energetico complessivo degli impianti tra il 10% e il 40%, a seconda della tecnologia e del contesto applicativo (IPCC, 2022).

A livello globale, la diffusione del CCUS rimane ancora limitata. Secondo la International Energy Agency, nel 2023 la capacità operativa di cattura della CO₂ si attestava intorno a 45 milioni di tonnellate di CO₂ all'anno (MtCO₂/anno), a fronte di emissioni globali di oltre 36 miliardi di tonnellate (IEA, 2023). Questo evidenzia un contributo attuale ancora marginale rispetto al fabbisogno complessivo di riduzione delle emissioni. Negli scenari di neutralità climatica, tuttavia, il ruolo del CCUS cresce in modo significativo. Nella Net Zero Roadmap, la capacità globale di cattura della CO₂ è stimata in circa 1,2 miliardi di tonnellate all'anno entro il 2030 e oltre 7,6 miliardi di tonnellate entro il 2050 (IEA, 2023). Questo implica un'espansione di oltre due ordini di grandezza rispetto ai livelli attuali, rendendo il CCUS una delle tecnologie con il maggiore gap tra stato attuale e traiettoria necessaria.

Dal punto di vista economico, i costi del CCUS variano significativamente in funzione della concentrazione di CO₂ nei flussi da trattare e della tipologia di impianto. Secondo l'IEA, i costi di cattura possono variare da circa 15 USD/tCO₂ per flussi ad alta concentrazione (come nel trattamento del gas naturale) fino a 130 USD/tCO₂ per applicazioni più complesse, come centrali elettriche o impianti industriali diffusi (IEA, 2024). Questi costi rappresentano una delle principali barriere alla diffusione su larga scala della tecnologia.

Il CCUS trova applicazione soprattutto nei settori industriali ad alte emissioni, come la produzione di cemento, acciaio e chimica, dove una parte significativa delle emissioni deriva da processi intrinseci e non può essere eliminata attraverso l'elettificazione. In questi contesti, la cattura della CO₂ rappresenta una delle poche opzioni tecnologiche disponibili per ridurre le emissioni residue.

Un esempio rilevante nel contesto italiano è rappresentato dal progetto di cattura e stoccaggio della CO₂ sviluppato da Eni nell'area di Ravenna. Il progetto prevede l'utilizzo di giacimenti di gas esauriti nell'Adriatico per lo stoccaggio geologico della CO₂, sfruttando infrastrutture esistenti e competenze sviluppate nel settore upstream. Nella sua prima fase, il progetto è destinato a raggiungere una capacità di stoccaggio di circa 4 milioni di tonnellate di CO₂ all'anno, con un potenziale di espansione fino a 16 milioni di tonnellate all'anno nelle fasi successive (Eni, 2023).

Il progetto rappresenta uno dei principali hub di stoccaggio della CO₂ in Europa meridionale e evidenzia il ruolo delle infrastrutture esistenti nella riduzione dei costi di implementazione del CCUS. Allo stesso tempo, mette in luce alcune delle principali condizioni necessarie per lo sviluppo della tecnologia, incluse la disponibilità di siti geologici idonei, la prossimità a fonti emmissive rilevanti, e l'integrazione con reti di trasporto della CO₂.

Un ulteriore ambito di sviluppo riguarda la cattura diretta dall'aria (Direct Air Capture, DAC), una tecnologia che aspira aria ambiente e ne estrae l'anidride carbonica mediante processi chimici, consentendo di rimuovere CO₂ già presente in atmosfera. Tuttavia, questa tecnologia è ancora in fase iniziale e presenta costi significativamente più elevati, generalmente superiori a 200 USD/tCO₂, limitandone l'adozione nel breve periodo (A IEA, 2023). Dal punto di vista infrastrutturale, il CCUS richiede la realizzazione di reti di trasporto della CO₂ e lo sviluppo di siti di stoccaggio geologico sicuro, come giacimenti esauriti di petrolio e gas o acquiferi salini profondi. La disponibilità e l'accettabilità di tali siti rappresentano una delle principali criticità per la scalabilità della tecnologia.

Mentre le tecnologie finora analizzate sono finalizzate alla mitigazione delle emissioni, esistono altre soluzioni che si collocano nell'ambito dell'adattamento al cambiamento climatico. Di seguito ne citiamo due categorie rilevanti attualmente dibattute a livello scientifico.

5.2.5 Nature-based solutions

Le nature-based solutions (NBS) rappresentano un insieme di interventi che utilizzano i processi naturali per ridurre la vulnerabilità ai cambiamenti climatici, rafforzando al contempo la resilienza degli ecosistemi e dei sistemi socio-economici. In questo ambito, l'attenzione si sposta dalla costruzione di infrastrutture artificiali alla valorizzazione delle funzioni ecologiche esistenti, che possono contribuire in modo efficace ad attenuare gli impatti fisici del cambiamento climatico, come alluvioni, ondate di calore ed erosione costiera. Dal punto di vista tecnico, queste soluzioni comprendono interventi quali la riforestazione, la rinaturalizzazione dei corsi d'acqua, il ripristino delle zone umide, la gestione sostenibile dei suoli agricoli e lo sviluppo di

infrastrutture verdi urbane. Il loro funzionamento si basa su meccanismi biofisici ben noti, tra cui l'infiltrazione e la ritenzione dell'acqua nei suoli, l'evapotraspirazione della vegetazione e la stabilizzazione dei sedimenti, che contribuiscono a ridurre l'esposizione ai rischi climatici.

Un ruolo particolarmente rilevante è svolto dalla riforestazione, sia in contesti urbani sia extraurbani. Nelle città, la presenza di alberi e superfici vegetate consente di attenuare l'effetto isola di calore attraverso processi di ombreggiamento ed evapotraspirazione. Secondo l'Intergovernmental Panel on Climate Change, tali interventi possono determinare riduzioni localmente significative delle temperature superficiali urbane, contribuendo a mitigare gli effetti delle ondate di calore (IPCC, 2022). Allo stesso tempo, la vegetazione urbana aumenta la capacità di assorbimento delle acque meteoriche, riducendo il deflusso superficiale e il rischio di allagamenti. Al di fuori dei contesti urbani, la copertura forestale contribuisce alla regolazione del ciclo idrologico e alla stabilizzazione dei suoli. La presenza di vegetazione favorisce l'infiltrazione dell'acqua e riduce l'erosione, contribuendo a limitare il rischio di frane e fenomeni di dissesto idrogeologico, particolarmente rilevanti in territori fragili come quello italiano.

Accanto agli ecosistemi terrestri, crescente attenzione è rivolta agli ecosistemi costieri e marini, spesso indicati come blue carbon (carbonio blu, ossia il carbonio catturato e immagazzinato dagli ecosistemi oceanici e costieri). In questo ambito, il contesto mediterraneo offre esempi particolarmente significativi. Le praterie di Posidonia oceanica, diffuse lungo le coste italiane, svolgono una funzione fondamentale sia per l'adattamento sia per la regolazione climatica. Da un lato, contribuiscono a dissipare l'energia delle onde e a stabilizzare i sedimenti, riducendo l'erosione costiera; dall'altro, sono in grado di immagazzinare carbonio nei sedimenti marini per lunghi periodi, rappresentando uno dei principali serbatoi naturali di carbonio negli ecosistemi costieri del Mediterraneo (EEA, 2021). La loro degradazione comporta quindi una perdita significativa sia in termini di protezione fisica delle coste sia di capacità di regolazione climatica.

Un elemento distintivo delle NBS è la loro capacità di generare benefici multipli (OECD, 2020). Oltre a ridurre la vulnerabilità agli impatti climatici, contribuiscono alla conservazione della biodiversità, al miglioramento della qualità dell'aria e alla gestione sostenibile delle risorse idriche. Come evidenziato dall'European Environment Agency, questa multifunzionalità le rende particolarmente efficaci nei contesti urbani e periurbani, dove i rischi climatici e le pressioni antropiche tendono a sovrapporsi (EEA, 2021). Al tempo stesso, è necessario riconoscerne i limiti. L'efficacia delle NBS dipende fortemente dalle condizioni locali e dalla scala degli interventi, e richiede tempi relativamente lunghi per manifestarsi pienamente. Inoltre, in presenza di eventi estremi di elevata intensità, queste soluzioni difficilmente possono sostituire completamente le infrastrutture ingegneristiche tradizionali. Per questo motivo, il loro ruolo è sempre più

interpretato in chiave complementare, all'interno di strategie integrate che combinano soluzioni naturali e interventi infrastrutturali.

5.2.6 Infrastrutture resilienti

Accanto alle soluzioni basate sulla natura, le infrastrutture resilienti rappresentano una categoria tecnologica fondamentale per l'adattamento al cambiamento climatico. In questo ambito, l'attenzione è rivolta allo sviluppo e all'adeguamento di sistemi ingegneristici progettati per resistere a condizioni climatiche estreme, garantendo la continuità dei servizi essenziali e la protezione dei territori.

Dal punto di vista tecnologico, queste infrastrutture comprendono sistemi di difesa idraulica, opere di regolazione dei flussi, reti di drenaggio urbano avanzate e sistemi di protezione costiera. Un esempio rilevante è rappresentato dal sistema MOSE, costituito da barriere mobili che isolano temporaneamente la laguna di Venezia dal mare in condizioni di alta marea. Dal punto di vista tecnico, il sistema si basa su paratoie elettromeccaniche installate sui fondali marini, in grado di sollevarsi attraverso l'immissione di aria compressa. L'infrastruttura è progettata per proteggere la città da eventi estremi superiori ai 110 cm di marea, con un livello di progetto fino a circa 3 metri sul livello medio del mare (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2026). Questo tipo di soluzione rappresenta un esempio di adattamento "hard", basato su ingegneria avanzata e controllo attivo delle condizioni idrauliche.

Un secondo ambito tecnologico riguarda i sistemi di gestione delle acque interne, tra cui casse di espansione, bacini di laminazione e reti di drenaggio urbano. Queste infrastrutture sono progettate per ridurre i picchi di portata durante eventi meteorici intensi, aumentando la capacità di assorbimento e rallentando il deflusso delle acque. In Italia, tali sistemi sono particolarmente rilevanti in un contesto in cui circa il 94% dei comuni è esposto a rischio idrogeologico (ISPRA, 2021). Dal punto di vista tecnico, l'efficacia di queste infrastrutture dipende dalla capacità di dimensionamento rispetto a eventi estremi sempre più intensi e frequenti, che richiedono aggiornamenti dei parametri progettuali tradizionali.

Un ulteriore ambito tecnologico è rappresentato dalle infrastrutture costiere, tra cui barriere soffolte, sistemi di ripascimento e opere di difesa rigida. Secondo ISPRA, circa il 23% delle coste italiane è soggetto a fenomeni di erosione, rendendo necessari interventi strutturali per la protezione del territorio (ISPRA, 2024). In questo contesto, le tecnologie di difesa costiera devono essere progettate tenendo conto dell'innalzamento del livello del mare e dell'aumento dell'intensità degli eventi estremi.

Nonostante il loro ruolo fondamentale, le infrastrutture resilienti presentano alcune criticità tecnologiche. In primo luogo, richiedono investimenti iniziali elevati e tempi di realizzazione lunghi. In secondo luogo, sono spesso progettate sulla base di condizioni

climatiche storiche, che potrebbero non essere rappresentative degli scenari futuri, rendendo necessario un aggiornamento continuo dei criteri di progettazione. Infine, la loro rigidità può limitarne l'adattabilità nel lungo periodo, soprattutto in contesti caratterizzati da elevata incertezza climatica.

5.3 Investimenti e costi di mitigazione e adattamento

Il raggiungimento degli obiettivi di neutralità climatica richiede un aumento significativo degli investimenti nel sistema energetico. Nello scenario Net Zero, gli investimenti globali annuali solo in energia pulita dovrebbero superare i 4.000 miliardi di dollari entro il 2030, con un raddoppio rispetto ai livelli del 2024 (IEA, 2024). L'incremento riflette la necessità di accelerare la diffusione delle tecnologie già mature, come rinnovabili ed elettrificazione, e di sostenere lo sviluppo di soluzioni emergenti.

A livello europeo, la Commissione stima che il conseguimento degli obiettivi climatici al 2030 richieda investimenti aggiuntivi pari a circa 520 miliardi di euro all'anno rispetto al decennio precedente (European Commission, 2023). Nel Rapporto Draghi, la stima è differente, attestandosi attorno ai 450 miliardi di euro all'anno in più. In entrambi i casi, una quota significativa di tali risorse è destinata al settore energetico, ma investimenti rilevanti sono necessari anche nei trasporti, negli edifici e nelle infrastrutture. La transizione climatica implica dunque una riallocazione di capitale su larga scala, ma nel caso italiano la possibilità di quantificarne il fabbisogno varia sensibilmente tra mitigazione e adattamento.

5.3.1 Investimenti per la mitigazione

Per la mitigazione, il riferimento più robusto è il Piano Nazionale Integrato Energia e Clima aggiornato nel 2024, che stima, per il **periodo 2024-2030, 824,7 miliardi di euro di investimenti cumulati nello scenario coerente con gli obiettivi del Piano**, a fronte di **650,3 miliardi nello scenario a politiche correnti**. Ne deriva un fabbisogno aggiuntivo di 174,4 miliardi di euro, pari a un incremento del 27% rispetto allo scenario di riferimento. Lo stesso documento mostra che la voce più rilevante è costituita dai trasporti, con 528,8 miliardi di euro di investimenti cumulati, seguiti da residenziale (93,6 miliardi), settore elettrico (81,8 miliardi), terziario (62,3 miliardi), reti elettriche (30 miliardi), sistemi di accumulo (12 miliardi) ed elettrolizzatori (3 miliardi)⁴.

All'interno di questo fabbisogno, una quota particolarmente rilevante riguarda la trasformazione del sistema elettrico. Sempre secondo il PNIEC, gli investimenti cumulati 2024-2030 per la sola generazione elettrica passano da 46,1 a 81,8 miliardi di euro, con un incremento di 35,7 miliardi rispetto allo scenario a politiche correnti. Di questi, **45,9 miliardi riguardano il fotovoltaico, 24,1 miliardi l'eolico onshore e 5,5**

miliardi l'eolico offshore. Alle tecnologie di generazione si aggiungono gli investimenti nelle infrastrutture abilitanti: circa 15 miliardi per la rete di trasmissione, 15 miliardi per le reti di distribuzione e 12 miliardi per i sistemi di accumulo, con la stessa stima PNIEC che segnala un possibile fabbisogno aggiuntivo di ulteriori 5 miliardi qualora la nuova capacità rinnovabile risultasse particolarmente concentrata nel Mezzogiorno.

5.3.2 Investimenti per l'adattamento

A differenza della mitigazione, la quantificazione degli investimenti per l'adattamento risulta più complessa, in quanto fortemente dipendente dal contesto territoriale, dalla natura dei rischi climatici e dalla tipologia degli interventi.

A livello globale, il United Nations Environment Programme stima che gli investimenti per i costi dell'adattamento possano raggiungere tra 160 e 340 miliardi di dollari annui entro il 2030 (UNEP, 2023). Sebbene tali valori non siano direttamente trasferibili al contesto italiano, essi confermano l'ordine di grandezza degli investimenti necessari e la crescente rilevanza economica dell'adattamento.

A livello continentale, rendere resilienti ai cambiamenti climatici i settori di agricoltura, energia e trasporti dovrebbe richiedere, secondo l'European Environment Agency (2025), investimenti compresi tra 53 e 137 miliardi di euro l'anno entro il 2050, cifra che potrebbe salire fino a 173 miliardi annui entro il 2100. Attualmente, tuttavia, i finanziamenti destinati all'adattamento climatico si attestano soltanto intorno ai 15-16 miliardi di euro annui, evidenziando un significativo funding gap europeo.

Nel caso italiano, il Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC) non fornisce una stima aggregata del fabbisogno nazionale, ma diverse evidenze settoriali consentono di delineare un ordine di grandezza degli investimenti necessari.

Un primo riferimento riguarda il dissesto idrogeologico, che rappresenta una delle principali aree di intervento. Secondo ISPRA, il 94% dei comuni italiani è considerato a rischio idrogeologico, mentre il fabbisogno complessivo per la **messa in sicurezza del territorio è stimato tra i 26 e i 30 miliardi di euro**, necessari per eseguire interventi urgenti e programmati. A questo vanno aggiunti **oltre 60 miliardi di euro di investimenti nelle infrastrutture idriche**, al fine di ridurre le perdite di rete superiori al 40%. Anche la protezione costiera rappresenta un ambito rilevante, considerando che circa il 23% delle coste italiane è soggetto a erosione (ISPRA, 2022), con programmi di intervento che mobilitano risorse pubbliche su scala pluriennale.

La Commissione Europea ha recentemente stimato i costi di adattamento per ciascun Stato Membro, rendendoli pubblici nel gennaio 2026 nel documento "*Assessment of EU and Member States Adaptation Investment Needs*". Il documento evidenzia che l'Unione europea e gli Stati membri dovranno aumentare significativamente gli

investimenti per l'adattamento climatico, stimati in circa **70 miliardi di euro annui fino al 2050**, al fine di ridurre la vulnerabilità economica e infrastrutturale agli eventi climatici estremi. Lo studio sottolinea inoltre come i costi dell'inazione sarebbero nettamente superiori rispetto agli investimenti preventivi, soprattutto nei settori delle infrastrutture, della gestione idrica, della salute e della sicurezza alimentare (European Commission, 2026).

Nell'assessment europeo, l'Italia è identificata come uno dei paesi dell'Unione Europea con i maggiori fabbisogni di investimento, con un costo annuale stimato di **10,08 miliardi di euro, che rappresenta lo 0,400% del PIL nazionale**. In termini assoluti, l'Italia occupa il secondo posto nell'Unione Europea, superata solo dalla Francia (10,64 miliardi di euro) e poco sopra la Germania (9,59 miliardi di euro), anche se il peso percentuale sull'economia nazionale posiziona l'Italia in una situazione più moderata rispetto ai paesi più vulnerabili: laddove la media UE è dello 0,459% del PIL, alcuni paesi, come Estonia e Lettonia, dovranno affrontare oneri proporzionalmente molto più pesanti, superando l'1,2% del loro PIL (Commissione Europea, 2026).

In Italia, il settore dell'infrastruttura è quello che richiederà l'impegno economico più gravoso, con una spesa annua di 4,53 miliardi di euro (pari a circa il 45% del totale nazionale). Il dato è trainato in particolare dalla necessità di riqualificazione degli edifici esistenti per far fronte a ondate di calore ed eventi estremi; in questo ambito specifico, l'Italia presenta uno dei fabbisogni più elevati in UE, stimato in 33 miliardi di euro in valore attuale netto fino al 2050. Seguono per importanza economica i costi di adattamento per la protezione degli ecosistemi (~2,13 miliardi di euro all'anno) e della filiera del cibo (~1,85 miliardi di euro all'anno). Tali costi riflettono l'elevata vulnerabilità del territorio italiano ai rischi emersi in questo rapporto, e classificati dalla Commissione come critici o catastrofici, tra cui la siccità, la scarsità idrica e gli incendi boschivi, fenomeni tipici delle regioni del Sud Europa identificate come "hotspot" climatici.

Se letti congiuntamente, questi dati suggeriscono un fabbisogno di investimento per l'adattamento in Italia dell'ordine di decine di miliardi di euro nel breve-medio periodo, con valori plausibilmente superiori ai 100 miliardi di euro su orizzonti più lunghi, pur in assenza di una quantificazione ufficiale unitaria. All'interno di questo fabbisogno, una distinzione rilevante riguarda quella tra nature-based solutions e infrastrutture resilienti, che presentano strutture di costo e profili di investimento differenti.

Le nature-based solutions si caratterizzano generalmente per costi iniziali più contenuti e per una maggiore flessibilità. Secondo la Banca Mondiale, interventi come riforestazione, ripristino di zone umide e infrastrutture verdi possono risultare fino a 5 volte più convenienti rispetto alle alternative puramente ingegneristiche nella gestione del rischio idrogeologico (World Bank, 2019). Analogamente, l'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo evidenzia che queste soluzioni presentano costi di

investimento e di manutenzione relativamente inferiori, pur richiedendo tempi più lunghi per esprimere i benefici (OECD, 2024). Tuttavia, la loro efficacia dipende dalla scala di applicazione e dalle condizioni locali, e difficilmente può sostituire interventi strutturali nei contesti ad alta esposizione.

Le infrastrutture resilienti, al contrario, comportano costi di investimento iniziali più elevati, ma garantiscono livelli di protezione più immediati e prevedibili. Secondo la European Investment Bank, interventi come sistemi di difesa dalle alluvioni e opere di protezione costiera presentano un elevato rapporto costi/benefici nel lungo periodo, in quanto consentono di evitare perdite economiche rilevanti (EIB, 2021). In questo senso, il loro valore economico è strettamente legato alla capacità di prevenire danni futuri.

Tabella 5.1 - Investimenti in mitigazione e adattamento per l'Italia (in miliardi di Euro)

Ambito	Settore / Intervento	Investimenti stimati (mld €)	Orizzonte temporale
Mitigazione	Trasporti	528,8	2024–2030
Mitigazione	Residenziale	93,6	2024–2030
Mitigazione	Settore elettrico	81,8	2024–2030
Mitigazione	Terziario	62,3	2024–2030
Mitigazione	Reti elettriche	30,0	2024–2030
Mitigazione	Sistemi di accumulo	12,0	2024–2030
Mitigazione	Elettrolizzatori	3,0	2024–2030
Mitigazione	Totale investimenti scenario PNIEC	824,7	2024–2030
Mitigazione	Scenario a politiche correnti	650,3	2024–2030
Mitigazione	Fabbisogno aggiuntivo	174,4	2024–2030
Adattamento	Infrastrutture (protezione inondazioni, reti trasporti, retrofitting edifici)	4,533	Annuale
Adattamento	Ecosistemi (ripristino del suolo, prevenzione incendi, gestione costiera)	2,128	Annuale
Adattamento	Cibo (agricoltura climate-smart, zootecnia e pesca)	1,846	Annuale

Adattamento	Salute (stress termico, trattamento acque reflue)	1,430	Annuale
Adattamento	Economia e finanza (reti idriche, turismo invernale)	0,146	Annuale
Adattamento	Misure trasversali (ricerca, innovazione, educazione)	0,023	Annuale
	Totale adattamento scenario EC (2026)	10,106	Annuale

Nel complesso, il quadro degli investimenti delineato evidenzia come la transizione climatica dell'Italia richieda uno sforzo finanziario significativo e prolungato, stimato in circa 824,7 miliardi di euro per la mitigazione nel periodo 2024–2030 e in oltre 10 miliardi di euro annui per l'adattamento. Mobilitare tali risorse in modo efficace attraverso una combinazione di fondi pubblici, investimenti privati e strumenti finanziari innovativi rappresenta una delle sfide strategiche più rilevanti per garantire una traiettoria di sviluppo resiliente e coerente con gli obiettivi climatici europei.

Glossario

Scenari e modelli climatici

Scenario climatico. Rappresentazione coerente e plausibile di come il clima potrebbe evolvere in futuro, costruita a partire da ipotesi su emissioni di gas serra, sviluppo economico e politiche ambientali. Non è una previsione (“accadrà così”), ma una proiezione condizionale (“se le emissioni seguissero questa traiettoria, il clima risponderebbe così”). Il rapporto utilizza più scenari in parallelo per delimitare un intervallo di futuri possibili e valutarne le conseguenze economiche e finanziarie.

SSP (Shared Socioeconomic Pathways). Scenari socioeconomici sviluppati dalla comunità scientifica internazionale nell’ambito dell’IPCC, che descrivono possibili traiettorie future della società globale in termini di crescita demografica, sviluppo economico, disuguaglianze e politiche ambientali. Nel rapporto si utilizzano principalmente: SSP2 (sviluppo intermedio, con una crescita in linea con le tendenze storiche di lungo periodo) e SSP3 (mondo frammentato, con conflitti regionali, bassa cooperazione internazionale e crescita disomogenea). Sono inoltre menzionati SSP1 (scenario virtuoso, con forti politiche climatiche e rapida transizione energetica) e SSP5 (crescita economica sostenuta da un utilizzo massiccio di fonti fossili). Ciascun SSP viene poi accoppiato a un RCP per costruire scenari integrati (vedi voce Combinazione SSP-RCP).

RCP (Representative Concentration Pathways). Scenari che descrivono il livello di concentrazione di gas serra nell'atmosfera al 2100, espressi come forzante radiativa in W/m^2 (la quantità aggiuntiva di energia trattenuta dal sistema climatico). I principali sono: RCP2.6 (ca. 1,5-2 °C di riscaldamento globale rispetto all'era preindustriale), RCP4.5 (ca. 2-3 °C), RCP7.0 (ca. 3-4 °C) e RCP8.5 (ca. 4-5 °C). Ogni RCP corrisponde a una traiettoria diversa di emissioni e viene accoppiato a uno SSP per costruire scenari integrati (vedi voce successiva).

Combinazione SSP-RCP. Gli SSP e gli RCP sono costruiti per essere accoppiati: gli SSP forniscono le ipotesi socioeconomiche (crescita, popolazione, politiche) che determinano un certo livello di emissioni, e l'RCP quantifica la conseguente concentrazione di gas serra e il riscaldamento risultante. In questo rapporto si utilizzano due combinazioni: SSP2-RCP4.5 (sviluppo intermedio, riscaldamento globale atteso di circa 2,4 °C a fine secolo) e SSP3-RCP7.0 (scenario ad alte emissioni ma plausibile nel medio termine, mondo frammentato, riscaldamento atteso di circa 3,4 °C a fine secolo). Il Capitolo 1 analizza anche SSP1-RCP2.6 (scenario virtuoso) e SSP5-RCP8.5 (scenario di massimo rischio), utilizzati nella letteratura come estremi dell'intervallo.

Baseline (riferimento). Il termine compare nel rapporto con due accezioni. (1) Baseline climatica: intervallo storico usato come termine di confronto per le proiezioni climatiche; nel rapporto si utilizzano i periodi 1981–2000 (per i dati ISIMIP) e 1985–2014 (per le proiezioni ENEA e CMCC), a seconda della fonte. (2) Baseline economica: scenario controfattuale senza impatti climatici, rispetto al quale si misurano le perdite di PIL (Capitolo 4). In entrambi i casi, la baseline non è una previsione: è il punto di partenza rispetto al quale si calcola la differenza.

Ensemble multi-modello. Insieme di simulazioni prodotte da più modelli climatici indipendenti. Combinando i risultati si ottiene una stima più robusta del cambiamento atteso e una misura dell'incertezza tra i modelli. Il rapporto utilizza ensemble di 10 modelli.

Indicatori climatici e impatti fisici

SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index). Indice di siccità che combina il deficit di precipitazione con la domanda evapotraspirativa dovuta al riscaldamento. Valori negativi indicano condizioni siccitose; quanto più negativi, tanto più severa è la siccità. È considerato più informativo dell'SPI perché cattura anche l'effetto dell'aumento delle temperature.

SPI (Standardized Precipitation Index). Indice di siccità basato esclusivamente sulle precipitazioni cumulate. Misura lo scostamento della pioggia osservata rispetto alla distribuzione storica. Non tiene conto dell'evapotraspirazione e può quindi sottostimare la severità idrica in un clima più caldo.

TVAR (Temperature Variability). Indicatore della variabilità giornaliera della temperatura, ossia dell'ampiezza delle oscillazioni termiche da un giorno all'altro. Valori in calo segnalano una distribuzione più stretta delle temperature giornaliere (oscillazioni meno marcate), valori in aumento una distribuzione più dispersa. Va letto insieme alla variazione della temperatura media: un TVAR stabile o in calo accompagnato da temperature medie più alte indica che l'intera distribuzione si sposta verso valori più elevati senza allargarsi.

Ondate di calore. Periodi prolungati di temperature massime anomale. Nel rapporto, sono definite come almeno 5 giorni consecutivi con temperatura massima superiore al 90° percentile locale e sopra i 30 °C.

Aridificazione. Processo di progressivo inaridimento di un territorio, causato dalla combinazione di minori precipitazioni ordinarie e maggiore evaporazione dovuta all'aumento delle temperature. Nel rapporto indica la transizione strutturale del clima mediterraneo verso condizioni più secche.

Evapotraspirazione. Quantità d'acqua che passa dall'insieme suolo-vegetazione all'atmosfera per evaporazione e traspirazione delle piante. Con temperature più alte, la

domanda evapotraspirativa aumenta, aggravando lo stress idrico anche a parità di precipitazioni.

Economia climatica e finanza

Funzione di danno climatico. Relazione matematica che stima la perdita di PIL o di produttività economica in funzione dell'aumento della temperatura. Le diverse funzioni di danno producono stime anche molto differenti.

Stress test climatico. Esercizio di simulazione che valuta la capacità di un'istituzione finanziaria, di un portafoglio o di un bilancio pubblico di resistere a scenari climatici avversi, sia fisici (eventi estremi, riscaldamento) sia di transizione (cambiamenti normativi, tecnologici o di mercato).

Spread climatico. Differenziale aggiuntivo di rendimento sui titoli di Stato o obbligazionari richiesto dagli investitori per compensare il rischio climatico percepito di un Paese o emittente. In questo rapporto riflette la vulnerabilità fisica.

Spazio fiscale. Margine di manovra di un governo per aumentare la spesa pubblica o ridurre le entrate senza compromettere la sostenibilità del debito. Il cambiamento climatico può erodere lo spazio fiscale attraverso perdite di gettito, considerate in questo rapporto, ma anche maggiori costi di adattamento e ricostruzione post-disastro.

Saldo primario. Differenza tra entrate e uscite dello Stato al netto degli interessi sul debito. Un saldo primario positivo (avanzo) indica che il governo incassa più di quanto spende per le politiche correnti, contribuendo a ridurre il rapporto debito/PIL.

Rapporto debito/PIL. Indicatore fondamentale di sostenibilità fiscale, che esprime il debito pubblico come percentuale del prodotto interno lordo. Nel rapporto si analizza come gli impatti climatici possano peggiorare questo rapporto attraverso minore crescita e maggiori spese.

Normativa e politiche europee

Green Deal europeo. Pacchetto strategico dell'Unione Europea che mira a rendere l'economia europea climaticamente neutra entro il 2050. Comprende obiettivi di riduzione delle emissioni, efficienza energetica, energie rinnovabili, economia circolare e tutela della biodiversità.

Tassonomia UE. Sistema di classificazione europeo che definisce quali attività economiche possono essere considerate ambientalmente sostenibili. Serve come riferimento per investitori, imprese e istituzioni finanziarie per orientare i capitali verso attività allineate agli obiettivi climatici e ambientali.

CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive). Direttiva europea che impone alle grandi imprese e alle società quotate di pubblicare informazioni dettagliate sui rischi e sugli impatti ambientali, sociali e di governance (ESG) della propria attività, secondo standard di rendicontazione armonizzati.

SFDR (Sustainable Finance Disclosure Regulation). Regolamento europeo che impone agli operatori dei mercati finanziari di comunicare come integrano i rischi di sostenibilità nelle proprie decisioni di investimento e nei prodotti finanziari offerti.

EU ETS (European Union Emissions Trading System). Sistema europeo di scambio delle quote di emissione. Le imprese dei settori coperti devono detenere permessi per ogni tonnellata di CO₂ emessa; il numero totale di permessi diminuisce nel tempo, incentivando la decarbonizzazione. È il principale strumento di mercato dell'UE per la riduzione delle emissioni.

Tecnologie e soluzioni per la transizione

CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage). Insieme di tecnologie per la cattura della CO₂ dai processi industriali o dalla produzione energetica, il suo eventuale riutilizzo e lo stoccaggio geologico permanente. Considerata una soluzione complementare per i settori difficili da decarbonizzare.

Hard-to-abate (settori difficili da decarbonizzare). Comparti industriali (come acciaio, cemento, chimica di base e trasporto marittimo e aereo) in cui le emissioni di CO₂ sono particolarmente difficili da eliminare con le tecnologie attuali, richiedendo soluzioni specifiche come CCUS, idrogeno verde o elettrificazione avanzata.

Idrogeno verde. Idrogeno prodotto per elettrolisi dell'acqua utilizzando esclusivamente energia da fonti rinnovabili. Non genera emissioni di CO₂ nel processo produttivo ed è considerato un vettore energetico chiave per la decarbonizzazione dell'industria pesante e dei trasporti.

LCOE (Levelized Cost of Energy). Costo medio dell'energia prodotta da un impianto lungo l'intera vita utile, espresso in €/MWh. Permette di confrontare la competitività economica di fonti energetiche diverse (solare, eolico, gas, nucleare) su base omogenea.

NBS (Nature-Based Solutions / Soluzioni basate sulla natura). Interventi che utilizzano o imitano i processi naturali per affrontare sfide ambientali e sociali: ad esempio, il ripristino di zone umide per la gestione delle inondazioni, la riforestazione urbana per mitigare le isole di calore, o la tutela degli ecosistemi costieri per la protezione dalle mareggiate.

Riferimenti bibliografici

- Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l’Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile. Rapporto Annuale sull’Efficienza Energetica 2024, ENEA 2024. <https://www.ufficienzaenergetica.enea.it/pubblicazioni/raee-rapporto-annuale-sull-efficienza-energetica>
- Amaranto, Alessandro, Leonardo Mancusi, Francesca Viterbo, Riccardo Bonanno, Giovanni Braca, and Elisabetta Garofalo. ‘Unravelling the Uncertainties in the Climate-Water-Energy Interplay: A Distributed Analysis of the Italian Territory’. *Renewable Energy* 246 (June 2025): 122857. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122857>.
- Arabadzhyan, Anastasia, Paolo Figini, Carmen García, Matías M. González, Yen E. Lam-González, and Carmelo J. León. ‘Climate Change, Coastal Tourism, and Impact Chains – a Literature Review’. *Current Issues in Tourism* 24, no. 16 (2021): 2233–68. <https://doi.org/10.1080/13683500.2020.1825351>.
- Ballester, Joan, Marcos Quijal-Zamorano, Raúl Fernando Méndez Turrubiates, et al. ‘Heat-Related Mortality in Europe during the Summer of 2022’. *Nature Medicine* 29, no. 7 (2023): 1857–66. <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02419-z>.
- Banca d’Italia. Relazione annuale sul 2024. Banca d’Italia, 2025. <https://www.bancaditalia.it/pubblicazioni/relazione-annuale/2024/index.html>
- Baronetti, Alice, Vincent Dubreuil, Antonello Provenzale, and Simona Fratianni. ‘Future Droughts in Northern Italy: High-Resolution Projections Using EURO-CORDEX and MED-CORDEX Ensembles’. *Climatic Change* 172, no. 3 (2022): 22. <https://doi.org/10.1007/s10584-022-03370-7>.
- Bartolini, Alice, Valentina Di Gennaro*, Vittoria Reas, et al. ‘Ecosystem Accounting for Marine-Based Tourism Provided by Posidonia Oceanica in Italy’. *One Ecosystem* 9 (September 2024): e129751. <https://doi.org/10.3897/oneeco.9.e129751>.
- Bevilacqua, Piero, Domenico Mazzeo, Roberto Bruno, and Natale Arcuri. ‘Surface Temperature Analysis of an Extensive Green Roof for the Mitigation of Urban Heat Island in Southern Mediterranean Climate’. *Energy and Buildings* 150 (September 2017): 318–27. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.081>.
- Bilal, Adrien, and Diego R. Känzig. ‘The Macroeconomic Impact of Climate Change: Global Versus Local Temperature*’. *The Quarterly Journal of Economics* 141, no. 2 (2026): 889–944. <https://doi.org/10.1093/qje/qjag011>.
- Boldrini, Simone, Andrej Ceglar, Chiara Lelli, Laura Parisi, and Irene Heemskerk. ‘Living in a World of Disappearing Nature: Physical Risk and the Implications for Financial Stability’. *SSRN Electronic Journal*, ahead of print, 2023. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4630721>.

- Bonanomi, Giuliano, Mara Gherardelli, Sabrina Spigno, and Mohamed Idbella. 'Winter Is Coming for Ski Resorts: Insights from the Apennines (Italy)'. *Journal of Mountain Science* 21, no. 11 (2024): 3847–58. <https://doi.org/10.1007/s11629-023-8539-y>.
- Borghesi, Simone, and Jacopo Cammeo. Analisi dati e raccomandazioni della normativa ETS 2 per il prossimo Social Climate Plan del Governo italiano. Legambiente, 2025. <https://www.legambiente.it/wp-content/uploads/2025/06/Raport-normativa-EU-ETS-2.pdf>
- Bosello, Francesco, Shouro Dasgupta, and Massimo Tavoni. *Relazione Sullo Stato Della Green Economy*. Fondazione per lo sviluppo sostenibile, 2019. https://italyforclimate.org/wp-content/uploads/2019/12/Relazione_sullo_stato_della_green_economy_2019.pdf.
- Bozzola, Martina, Emanuele Massetti, Robert Mendelsohn, and Fabian Capitanio. 'A Ricardian Analysis of the Impact of Climate Change on Italian Agriculture'. *European Review of Agricultural Economics* 45, no. 1 (2018): 57–79. <https://doi.org/10.1093/erae/jbx023>.
- Buttinelli, Rebecca, Edmondo Di Giuseppe, Sara Quaresima, Arianna Di Paola, and Raffaele Cortignani. 'Drought and Irrigation Requirements: Adaptation Strategies and Economic Impacts on Italian Arable Farms under Different First-Pillar CAP Scenarios'. *Agricultural Water Management* 323 (February 2026): 110049. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.110049>.
- Calcaterra, Matteo, Andrea Consiglio, Vincenzo Martorana, Massimo Tavoni, and Stavros A. Zenios. 'Sovereigns on Thinning Ice: Debt Sustainability, Climate Impacts, and Adaptation'. Preprint, SSRN, 2025. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5074531>.
- Carleton, Tamma, Amir Jina, Michael Delgado, et al. 'Valuing the Global Mortality Consequences of Climate Change Accounting for Adaptation Costs and Benefits'. *The Quarterly Journal of Economics* 137, no. 4 (2022): 2037–105. <https://doi.org/10.1093/qje/qjac020>.
- Carraro, Carlo. *Cambiamenti climatici e strategie di adattamento in Italia. Una valutazione economica*. Il Mulino, 2009.
- Carraro, Carlo. *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità. Soluzioni e strategie per investimenti sostenibili*. Società Editrice il Mulino spa, 2022. <https://iris.unive.it/handle/10278/5014222>.
- Ceglar, Andrej, Francesca Danieli, Irene Heemskerk, Mark Jwaideh, and Nicola Ranger. 'The European Economy Is Not Drought-Proof'. *The ECB Blog*, 23 May 2025. <https://www.ecb.europa.eu/press/blog/date/2025/html/ecb.blog20250523~d39e3a7933.en.html>.

- Celata, Filippo, and Eleonora Gioia. 'Resist or Retreat? Beach Erosion and the Climate Crisis in Italy: Scenarios, Impacts and Challenges'. *Applied Geography* 169 (August 2024): 103335. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2024.103335>.
- Cheval, Sorin, Alexandru Dumitrescu, and Marius-Victor Birsan. 'Variability of the Aridity in the South-Eastern Europe over 1961–2050'. *CATENA* 151 (April 2017): 74–86. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.029>.
- Ciccarelli, Matteo, Friderike Kuik, and Catalina Martínez Hernández. 'The Asymmetric Effects of Temperature Shocks on Inflation in the Largest Euro Area Countries'. *European Economic Review* 168 (September 2024): 104805. <https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2024.104805>.
- Cirrincione, Laura, Antonino Marvuglia, and Gianluca Scaccianoce. 'Assessing the Effectiveness of Green Roofs in Enhancing the Energy and Indoor Comfort Resilience of Urban Buildings to Climate Change: Methodology Proposal and Application'. *Building and Environment*, ahead of print, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108198>.
- Colombo, Nicola, Mauro Valt, Emanuele Romano, et al. 'Long-Term Trend of Snow Water Equivalent in the Italian Alps'. *Journal of Hydrology* 614 (November 2022): 128532. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128532>.
- Consiglio, Andrea, Angelo Carollo, and Stavros A. Zenios. 'A Parsimonious Model for Generating Arbitrage-Free Scenario Trees'. *Quantitative Finance* 16, no. 2 (2016): 201–12. <https://doi.org/10.1080/14697688.2015.1114359>.
- Conway, Elaine. 'Engaging Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs) in the Low Carbon Agenda'. *Energy, Sustainability and Society* 5, no. 1 (2015): 32. <https://doi.org/10.1186/s13705-015-0060-x>.
- Corbari, Chiara, Imen Ben Charfi, and Marco Mancini. 'Optimizing Irrigation Water Use Efficiency for Tomato and Maize Fields across Italy Combining Remote Sensing Data and the AquaCrop Model'. *Hydrology* 8, no. 1 (2021). <https://doi.org/10.3390/hydrology8010039>.
- Coricelli, Fabrizio, and Riccardo Fiorito. 'Myths and Facts about Fiscal Discretion: A New Measure of Discretionary Expenditure'. *Working Papers LuissLab*, Working Papers LuissLab, 2013, 13106. <https://ideas.repec.org/p/luil/leewp/13106.html>.
- Corte dei Conti. Deliberazione n. 16/2023/G: Superbonus 110%. Corte dei Conti - Sezione centrale di controllo sulla gestione delle Amministrazioni dello Stato, 2023. <https://www.senato.it/service/PDF/PDFServer/DF/437343.pdf>
- Cortignani, Raffaele, Davide Dell'Unto, and Gabriele Dono. 'Paths of Adaptation to Climate Change in Major Italian Agricultural Areas: Effectiveness and Limits in Supporting the Profitability of Farms'. *Agricultural Water Management* 244 (February 2021): 106433. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106433>.

- Coughlan, Giacomo, Paolo Nota, Daniele Cavicchioli, and Alessandro Olper. 'Weather Impacts and Input Adaptation: Farm-Level Evidence on Corn and Wheat Yields in Italy'. *Q Open* 6, no. 1 (2026): qoag009. <https://doi.org/10.1093/qopen/qoag009>.
- De Winne, Jasmien, and Gert Peersman. 'The Adverse Consequences of Global Harvest and Weather Disruptions on Economic Activity'. *Nature Climate Change* 11, no. 8 (2021): 665–72. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01102-w>.
- DeAndreis, Luca. 'Rapporto Ambiente SNPA. Edizione 2025'. *SNPA - Sistema nazionale protezione ambiente*, 28 October 2025. <https://www.snpambiente.it/notizie/temi/report-intertematici/stato-ambiente/rapporto-ambiente-snpa-edizione-2025/>.
- Demiroglu, O. Cenk, F. Sibel Saygili-Araci, Aytac Pacal, C. Michael Hall, and M. Levent Kurnaz. 'Future Holiday Climate Index (HCI) Performance of Urban and Beach Destinations in the Mediterranean'. *Atmosphere* 11, no. 9 (2020). <https://doi.org/10.3390/atmos11090911>.
- Di Paola, Arianna, Edmondo Di Giuseppe, Andrew Paul Gutierrez, Luigi Ponti, and Massimiliano Pasqui. 'Climate Stressors Modulate Interannual Olive Yield at Province Level in Italy: A Composite Index Approach to Support Crop Management'. *Journal of Agronomy and Crop Science* 209, no. 4 (2023): 475–88. <https://doi.org/10.1111/jac.12636>.
- EASA. ReFuel Aviation: Annual Technical Roadmap. European Union Aviation Safety Agency, 2025. <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/refueleu-aviation-annual-technical-report-2025>
- EBA. Guidelines on loan origination and monitoring (EBA/GL/2020/06). European Banking Authority, 2020. <https://www.eba.europa.eu/activities/single-rulebook/regulatory-activities/credit-risk/guidelines-loan-origination-and-monitoring>
- EBA. Report on management and supervision of ESG risks for credit institutions and investment firms (EBA/REP/2021/18). European Banking Authority, 2021. https://eba.europa.eu/sites/default/files/document_library/Publications/Reports/2021/1015656/EBA%20Report%20on%20ESG%20risks%20management%20and%20supervision.pdf
- ECB. Analytical indicators on physical risks. European Central Bank, 2026. https://www.ecb.europa.eu/stats/all-key-statistics/horizontal-indicators/sustainability-indicators/data/html/ecb.climate_indicators_physical_risks.en.html
- ECB. Financial Stability Review, November 2025. European Central Bank, 2025. <https://www.ecb.europa.eu/press/financial-stability-publications/fsr/html/ecb.fsr202511~263b5810d4.en.html>
- ECB. Guide on climate-related and environmental risks. Supervisory expectations relating to risk management and disclosure. European Central

Bank, 2020.

<https://www.bankingsupervision.europa.eu/ecb/pub/pdf/ssm.202011finalguideonclimate-relatedandenvironmentalrisks~58213f6564.en.pdf>

- ECMWF. 'Copernicus Data Stores Applications'. Copernicus Data Stores Applications, 2024. <https://apps.climate.copernicus.eu>.
- EEA. Economic Losses from Weather- and Climate-Related Extremes in Europe. European Environment Agency, 2025. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/economic-losses-from-climate-related>
- EEA. European Climate Risk Assessment. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/european-climate-risk-assessment>
- EEA. Nature-based solutions in Europe: Policy, knowledge and practice for climate change adaptation and disaster risk reduction. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/nature-based-solutions-in-europe>
- EEA. Trends and projections in Europe 2023. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/trends-and-projections-in-europe-2023>
- EEA. Trends and projections in Europe 2024. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/trends-and-projections-in-europe-2024>
- EEA. Trends and projections in Europe 2025. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2025. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/trends-and-projections-in-europe-2025>
- EIOPA. Application guidance on climate change materiality assessments and climate change scenarios in ORSA. European Insurance and Occupational Pensions Authority, 2022. https://www.eiopa.europa.eu/publications/application-guidance-climate-change-materiality-assessments-and-climate-change-scenarios-orsa_en
- EIOPA. Dashboard on insurance protection gap for natural catastrophes. European Insurance and Occupational Pensions Authority, 2025. https://www.eiopa.europa.eu/tools-and-data/dashboard-insurance-protection-gap-natural-catastrophes_en
- EIOPA. Stress test relation 2022. European Insurance and Occupational Pensions Authority, 2022. <https://www.eiopa.europa.eu/browse/financial->

[stability/occupational-pensions-stress-test/climate-stress-test-occupational-pensions-sector-2022_en](#)

- Eliwa, Yasser, Ahmed Aboud, and Ahmed Saleh. 'ESG Practices and the Cost of Debt: Evidence from EU Countries'. *Critical Perspectives on Accounting* 79 (2021): art. 102097. <https://doi.org/10.1016/j.cpa.2019.102097>.
- Ellena, Marta, Roberta Padulano, and Paola Mercogliano. 'Influence of Climate Change on Irrigation Demand: Insights from One of the Most Agricultural Regions in Italy (Puglia)'. *Natural Hazards* 121, no. 9 (2025): 10043–58. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07233-z>.
- Emmerling, Johannes, Pietro Andreoni, and Massimo Tavoni. 'Global Inequality Consequences of Climate Policies When Accounting for Avoided Climate Impacts'. *Cell Reports Sustainability* 1, no. 1 (26 January 2024). <https://doi.org/10.1016/j.crsus.2023.100008>.
- Eni - Snam. Our activities in Ravenna. Eni S.p.A., 2023. <https://ravennaccs.com/en-IT/project/ravenna-hub>
- European Commission. Action plan: financing sustainable growth (COM/2018/97). European Commission, 2018. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=COM:2018:97:FIN>
- European Commission. Commission Delegated Regulation (EU) 2019/856 of 26 February 2019 supplementing Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council with regard to the operation of the Innovation Fund. European Commission, L 140, 2019, pp. 6–17. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2019/856/2023-11-21/eng
- European Commission. Communication on the European Green Deal: Delivering on the Fit for 55 Package (COM/2021/550 final). European Commission, 2021. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0550>
- European Commission. EU Taxonomy Navigator. European Commission, 2025. <https://ec.europa.eu/sustainable-finance-taxonomy>
- European Commission. European Green Deal (COM/2019/640). European Commission, 2019. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52019DC0640>
- European Commission. Forging a climate-resilient Europe - the new EU Strategy on Adaptation to Climate Change (COM/2021/82). European Commission, 2021. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0082>
- European Commission. Public Consultation on the EU ETS and MSR: results and stakeholder views. European Commission, 2025. https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/14549-EU-emissions-trading-system-for-maritime-aviation-and-stationary-installations-and-market-stability-reserve-review/public-consultation_en

- European Commission. Securing our future Europe's 2040 climate target and path to climate neutrality by 2050 building a sustainable, just and prosperous society (COM/2024/63 final). European Commission, 2024. <https://eur-lex.europa.eu/eli/C/2024/4667/oj/eng>
- European Commission. EU Emissions Trading System: Evaluation Report. European Commission, 2024. https://climate.ec.europa.eu/document/download/92ec0ab3-24cf-4814-ad59-81c15e310bea_en?filename=2024_carbon_market_report_en.pdf
- European Commission. EU Climate Action Progress Report 2025. Strengthening competitiveness on the road to climate neutrality. European Commission, 2025. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/progress-climate-action/eu-climate-action-progress-report-2025_en European Commission, Directorate-General for Climate Action. *Assessment of EU and Member States' Adaptation Investment Needs and Financing Strategies*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2026. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d2039eac-f742-11f0-b9bc-01aa75ed71a1/language-en>
- European Environment Agency (EEA). Making Agriculture, Energy and Transport Climate Resilient: How Much Money Is Required and What Will It Deliver? European Environment Agency, 2025. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/costs-and-benefits-of-adaptation-actions-in-europe?activeTab=def89e87-9459-4a15-a9e0-dc6030d0c497>
- European Environment Agency. 'Economic Losses from Weather and Climate-Related Extremes in Europe'. 14 October 2025. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/economic-losses-from-climate-related>.
- European Environment Agency. *European Climate Risk Assessment: Executive Summary*. Publications Office, 2024. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/204249>.
- European Union. Commission Delegated Regulation (EU) 2019/856 of 26 February 2019 supplementing Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council with regard to the functioning of the Innovation Fund. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:32019R0856>
- European Union. Directive (EU) 2018/410 of the European Parliament and of the Council of 14 March 2018 amending Directive 2003/87/EC to enhance cost-effective emission reductions and low-carbon investments. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/410/oj/eng>
- European Union. Directive (EU) 2022/2464 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 amending Regulation (EU) No 537/2014, Directive 2004/109/EC, Directive 2006/43/EC and Directive 2013/34/EU, as regards

corporate sustainability reporting. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/NIM/?uri=oj%3AJOL_2022_322_R_0002

- European Union. Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955 (recast). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32023L1791>
- European Union. Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources and repealing Council Directive (EU) 2015/652. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/ALL/?uri=CELEX:32023L2413#>
- European Union. Directive (EU) 2023/959 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 amending Directive 2003/87/EC establishing a system for greenhouse gas emission allowance trading within the Union and Decision (EU) 2015/1814 concerning the establishment and operation of a market stability reserve for the Union greenhouse gas emission trading system. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/959/oj/eng>
- European Union. Directive (EU) 2025/2 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 amending Directive 2009/138/EC as regards proportionality, quality of supervision, reporting, long-term guarantee measures, macro-prudential tools, sustainability risks and group and cross-border supervision, and amending Directives 2002/87/EC and 2013/34/EU. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2025/2/oj/eng>
- European Union. Directive (UE) 2026/470 of the European Parliament and of the Council of 27 February 2026 amending Directives 2006/43/EC, 2013/34/EU, (EU) 2022/2464 and (EU) 2024/1760 as regards certain corporate sustainability reporting requirements and certain corporate sustainability due diligence requirements. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32026L0470>
- European Union. Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003 establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=celex%3A32003L0087>
- European Union. Directive 2009/138/EC of the European Parliament and of the Council of 25 November 2009 on the taking-up and pursuit of the business of Insurance and Reinsurance (Solvency II). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex:32009L0138>
- European Union. Directive 2013/36/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on access to the activity of credit institutions and the prudential supervision of credit institutions and investment firms, amending

Directive 2002/87/EC and repealing Directives 2006/48/EC and 2006/49/EC.

<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/36/oj/eng>

- European Union. Regulation (EU) 2019/2088 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2019 on sustainability-related disclosures in the financial services sector. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32019R2088>
- European Union. Regulation (EU) 2020/852 of the European Parliament and of the Council of 18 June 2020 on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment, and amending Regulation (EU) 2019/2088. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32020R0852>
- European Union. Regulation (EU) 2021/1056 of the European Parliament and of the Council of 24 June 2021 establishing the Just Transition Fund. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_.2021.231.01.0001.01.ITA&toc=OJ%3AL%3A2021%3A231%3AFULL
- European Union. Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law'). <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj/eng>
- European Union. Regulation (EU) 2021/241 of the European Parliament and of the Council of 12 February 2021 establishing the Recovery and Resilience Facility. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2021/241/oj/ita?eliuri=eli%3Areg%3A2021%3A241%3Aoj&locale=en>
- European Union. Regulation (EU) 2023/435 of the European Parliament and of the Council of 27 February 2023 amending Regulation (EU) 2021/241 as regards the inclusion of REPowerEU chapters in recovery and resilience plans. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/435/oj/ita?eliuri=eli%3Areg%3A2023%3A435%3Aoj&locale=en>
- European Union. Regulation (EU) 2023/851 of the European Parliament and of the Council of 19 April 2023 amending Regulation (EU) 2019/631 as regards strengthening CO2 emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles in line with the Union's increased climate ambition. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:32023R0851>
- European Union. Regulation (EU) 2023/955 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a Social Climate Fund and amending Regulation (EU) 2021/1060. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/ALL/?uri=CELEX:32023R0955>

- European Union. Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/956/oj/eng>
- European Union. Regulation (EU) 2026/667 of the European Parliament and of the Council of 11 March 2026 amending Regulation (EU) 2021/1119 as regards setting a Union intermediate climate target for 2040. <https://op.europa.eu/it/publication-detail/-/publication/ea8d6d86-226e-11f1-8c3a-01aa75ed71a1/>
- European Union. Regulation (EU) 575/2013 of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on prudential requirements for credit institutions and investment firms and amending Regulation (EU) 648/2012. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2013/575/oj?eliuri=eli%3Areg%3A2013%3A575%3Aoj&locale=en>
- European Commission. EU Emissions Trading System: Evaluation Report. European Commission, 2024. https://climate.ec.europa.eu/document/download/92ec0ab3-24cf-4814-ad59-81c15e310bea_en?filename=2024_carbon_market_report_en.pdf
- Eurostat. Renewable Energy Statistics. Eurostat, 2025. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20250319-1>
- Faggian, Paola. 'Future Precipitation Scenarios over Italy'. *Water* 13, no. 10 (2021). <https://doi.org/10.3390/w13101335>.
- Falk, Martin, and Xiang Lin. 'Sensitivity of Winter Tourism to Temperature Increases over the Last Decades'. *Economic Modelling* 71 (April 2018): 174–83. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2017.12.011>.
- Fondazione Sviluppo Sostenibile. Relazione sullo stato della green economy 2025. Fondazione per lo Sviluppo Sostenibile, 2025. <https://www.fondazionevilupposostenibile.org/presentata-relazione-stato-green-economy-2025-salute-green-economy-in-italia/>
- Forzieri, Giovanni, Francesco Bosello, Edward Byers, and R. Buizza, et al. 'Climate Risks to Critical Infrastructures'. Preprint, 2025.
- Friede, Gunnar, Timo Busch, and Alexander Bassen. 'ESG and Financial Performance: Aggregated Evidence from More than 2000 Empirical Studies'. *Journal of Sustainable Finance & Investment* 5, no. 4 (2015): 210–233. <https://doi.org/10.1080/20430795.2015.1118917>.
- Gagliardi, Nicola. *The Macroeconomic and Fiscal Impact of Climate Change in the EU*. European Economy. Discussion Paper. Publications Office of the European Union, 2025. <https://doi.org/10.2765/3311889>.
- García-León, David, Ana Casanueva, Gabriele Standardi, Annkatrin Burgstall, Andreas D. Flouris, and Lars Nybo. 'Current and Projected Regional Economic

- Impacts of Heatwaves in Europe'. *Nature Communications* 12, no. 1 (2021): 5807. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26050-z>.
- Gariazzo, Claudio, Luca Taiano, Michela Bonafede, et al. 'Association between Extreme Temperature Exposure and Occupational Injuries among Construction Workers in Italy: An Analysis of Risk Factors'. *Environment International* 171 (January 2023): 107677. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107677>.
 - Garofalo, P., M. Riccardi, P. Di Tommasi, A. Tedeschi, M. Rinaldi, and F. De Lorenzi. 'AquaCrop Model to Optimize Water Supply for a Sustainable Processing Tomato Cultivation in the Mediterranean Area: A Multi-Objective Approach'. *Agricultural Systems* 223 (February 2025): 104198. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2024.104198>.
 - Gasparrini, Antonio, Yuming Guo, Masahiro Hashizume, et al. 'Mortality Risk Attributable to High and Low Ambient Temperature: A Multicountry Observational Study'. *The Lancet*, ahead of print, 2015. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)62114-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0).
 - Gazzotti, Paolo, Johannes Emmerling, Giacomo Marangoni, et al. 'Persistent Inequality in Economically Optimal Climate Policies'. *Nature Communications* 12, no. 1 (2021): 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23613-y>.
 - Gilli, Martino, Matteo Calcaterra, Johannes Emmerling, and Francesco Granella. 'Climate Change Impacts on the Within-Country Income Distributions'. *Journal of Environmental Economics and Management* 127 (1 September 2024): 103012. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2024.103012>.
 - Gössling, Stefan, and Daniel Scott. 'Tourist Demand and Destination Development under Climate Change: Complexities and Perspectives'. *Journal of Sustainable Tourism* 0, no. 0 (2025): 1–31. <https://doi.org/10.1080/09669582.2025.2543953>.
 - Howard, Peter H., and Thomas Sterner. 'Methodology Matters: A Careful Meta-Analysis of Climate Damages'. *Environmental and Resource Economics* 88, no. 12 (2025): 3289–327. <https://doi.org/10.1007/s10640-025-01016-7>.
 - ICAO. Sustainable Aviation Fuels (SAF): Global Framework and Production Pathways. International Civil Aviation Organization, 2023. <https://www.icao.int/environmental-protection/global-framework-saf-lcaf-cleaner-energies>
 - ICAP. Emissions Trading Worldwide: ICAP Status Report 2025. International Carbon Action Partnership, 2025. <https://icapcarbonaction.com/en/publications/emissions-trading-worldwide-icap-status-report-2025>
 - IEA. Energy Efficiency 2022. International Energy Agency, 2022. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2022>
 - IEA. Global EV Outlook 2025. International Energy Agency, 2025. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>

- IEA. Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach (update 2023). International Energy Agency, 2023. <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-c-goal-in-reach>
- IEA. World Energy Outlook 2024. International Energy Agency, 2024. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
- Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipc). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 1st edn. Cambridge University Press, 2023. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- Intraligi, Valerio, and Marco Biagetti. ‘Occupational Heat Stress and Employment Dynamics in Italy’. *Environmental and Resource Economics* 89, no. 2 (2026): 17. <https://doi.org/10.1007/s10640-026-01071-8>.
- IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2022. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- IREA. Renewable Power Generation Costs in 2024. International Renewable Energy Agency, 2025. <https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024>
- IREA. World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway. International Renewable Energy Agency, 2023. <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>
- ISPRA. Ambiente in Italia: uno sguardo d’insieme. Annuario dei dati ambientali 2025. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, 2025. <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/stato-dellambiente/ambiente-in-italia-uno-sguardo-dinsieme-annuario-dei-dati-ambientali-2025>
- ISPRA. Andamento delle temperature in Italia, inferiori e superiori alla media (1961–2024). Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, 2025. <https://indicatoriambientali.isprambiente.it/it/clima/temperatura-media>
- ISPRA. Dissesto idrogeologico in Italia. Report ambientali SNPA n. 44/2025. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, 2025. https://www.isprambiente.gov.it/files2025/pubblicazioni/rapporti/rapporto_ispra_dissesto_idrogeologico_ed2024_web.pdf
- ISPRA. Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio. Rapporto 2021. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, 2021. <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/dissesto-idrogeologico-in-italia-pericolosita-e-indicatori-di-rischio-edizione-2021>

- ISPRA. Italian Greenhouse Gas Inventory 1990–2024. National Inventory Report 2026. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, 2026. <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/national-inventory-document-2026-italian-greenhouse-gas-inventory-1990-2024>
- ISPRA. *Il Clima Nei Capoluoghi Delle Regioni Italiane*. Stato Dell’Ambiente No. 103/2026. ISPRA, 2026. <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/stato-dellambiente/il-clima-nei-capoluoghi-delle-regioni-italiane>.
- IVASS. Relazione annuale 2023. Istituto per la Vigilanza sulle Assicurazioni, 2024. <https://www.ivass.it/pubblicazioni-e-statistiche/pubblicazioni/relazione-annuale/2024/index.html>
- IVASS. Relazione annuale 2024. Istituto per la Vigilanza sulle Assicurazioni, 2025. <https://www.ivass.it/pubblicazioni-e-statistiche/pubblicazioni/relazione-annuale/2025/index.html>
- Joint Research Centre (European Commission). *Analysis of Risks Europe Is Facing: An Analysis of Current and Emerging Risks*. Publications Office of the European Union, 2025. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/0176850>.
- Kalantzis, Fotzios, Salma Khalid, Alexandra Solovyeva, and Marcin Wolski. ‘The Green Transition and Firm Performance’. *Firms’ Response to Climate Regulations - Empirical Investigations Based on the European Emissions Trading System*. IMF Working Paper No. 24/135. <https://www.imf.org/-/media/files/publications/wp/2024/english/wpiea2024135-print-pdf.pdf>
- Kalkuhl, Matthias and Leonie Wenz ‘The impact of climate conditions on economic production. Evidence from a global panel of regions’ *Journal of Environmental Economics and Management*, Volume 103, September 2020, 102360
- Köberl, Judith, Franz Prettenhaler, and David Neil Bird. ‘Modelling Climate Change Impacts on Tourism Demand: A Comparative Study from Sardinia (Italy) and Cap Bon (Tunisia)’. *The Science of the Total Environment* 543, no. Pt B (2016): 1039–53. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.099>.
- Kotz, Maximilian, Friderike Kuik, Eliza Lis, and Christiane Nickel. ‘Global Warming and Heat Extremes to Enhance Inflationary Pressures’. *Communications Earth & Environment* 5, no. 1 (2024): 116. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01173-x>.
- Lam-González, Yen E., Carmen García Galindo, Matías M. González Hernández, and Carmelo J. León. ‘Understanding the Heterogeneity of Tourists’ Choices under Climate Change Risks: A Segmentation Analysis’. *Atmosphere* 12, no. 1 (2020). <https://doi.org/10.3390/atmos12010022>.
- Mai, Duong Thi Thuy. ‘Revising the EU ETS and CORSIA in Times of the COVID-19 Pandemic: Challenges for Reducing Global Aviation Emissions’. *Climate Policy* 21, no. 10 (2021): 1357–1367. <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.1966358>.

- Marinaccio, Alessandro, Matteo Scortichini, Claudio Gariazzo, et al. 'Nationwide Epidemiological Study for Estimating the Effect of Extreme Outdoor Temperature on Occupational Injuries in Italy'. *Environment International* 133 (December 2019): 105176. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105176>.
- Martínez-Solanas, Érica, Marcos Quijal-Zamorano, Hicham Achebak, et al. 'Projections of Temperature-Attributable Mortality in Europe: A Time Series Analysis of 147 Contiguous Regions in 16 Countries.' *The Lancet Planetary Health*, ahead of print, 2021. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00150-9](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00150-9).
- MASE. Piano nazionale di adattamento ai cambiamenti climatici (PNACC). Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, 2023. https://www.mase.gov.it/portale/documents/d/guest/pnacc_documento_di_piano-pdf
- MASE. *Piano Nazionale Di Adattamento Ai Cambiamenti Climatici*. Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE), 2023. <https://www.mase.gov.it/portale/web/guest/piano-nazionale-di-adattamento-ai-cambiamenti-climatici>.
- Masia, Sara, Antonio Trabucco, Donatella Spano, Richard L. Snyder, Janez Sušnik, and Serena Marras. 'A Modelling Platform for Climate Change Impact on Local and Regional Crop Water Requirements'. *Agricultural Water Management* 255 (September 2021): 107005. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107005>.
- Masselot, Pierre, Malcolm N. Mistry, Shilpa Rao, et al. 'Estimating Future Heat-Related and Cold-Related Mortality under Climate Change, Demographic and Adaptation Scenarios in 854 European Cities'. *Nature Medicine* 31, no. 4 (2025): 1294–302. <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03452-2>.
- MATTM. Strategia nazionale di adattamento ai cambiamenti climatici (SNAC). Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015. https://www.mase.gov.it/portale/documents/d/guest/documento_snac-pdf
- Mauderer, Sabine, and Livio Stracca. 'Climate Risks: No Longer the Tragedy of the Horizon'. *The ECB Blog*, 9 July 2025. <https://www.ecb.europa.eu/press/blog/date/2025/html/ecb.blog20250709~aed804c955.en.html>.
- Mazarano, Matteo, Giulia Galluccio, and Simone Borghesi. 'Italian Urban Tourism Predictions Using the Holiday Climate Index'. *Tourism Economics* 31, no. 4 (2025): 631–50. <https://doi.org/10.1177/13548166241277858>.
- McCallum, S., T. Dworak, A. Prutsch, et al. *Support to the Development of the EU Strategy for Adaptation to Climate Change: Background Report to the Impact Assessment, Part I – Problem Definition, Policy Context and Assessment of Policy Options*. Environment Agency Austria, 2013. https://climate.ec.europa.eu/system/files/2016-11/background_report_part1_en.pdf.

- Mercogliano, Paola, Alfredo Reder, and Jonathan Spinoni. 'Trame Di Resilienza: Infrastrutture per l'Italia Del 2050'. *Ecosistema Futuro*, 2026.
- Mereu, Simone, Janez Sušnik, Antonio Trabucco, et al. 'Operational Resilience of Reservoirs to Climate Change, Agricultural Demand, and Tourism: A Case Study from Sardinia'. *Science of The Total Environment*, Special Issue on Climate Change, Water and Security in the Mediterranean, vol. 543 (February 2016): 1028–38. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.066>.
- MIMI. Regolamento recante modalità attuative e operative degli schemi di assicurazione dei rischi catastrofali ai sensi dell'articolo 1, comma 105, della legge 30 dicembre 2023, n. 213 (Legge di bilancio 2024). Ministero delle Imprese e del Made in Italy. <https://www.mimit.gov.it/it/normativa/decreti-interministeriali/decreto-interministeriale-30-gennaio-2025-n-18-obbligatorio-assicurativo-per-le-imprese-contro-i-danni-catastrofali>
- MIT. Progetto MOSE – Il sistema di dighe mobili per la difesa di Venezia. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2026. <https://mosevenezia.eu/>
- Mnguni, Zandizoloyiso, and Jennifer M. Fitchett. 'Hot Nights on Holiday: Advocating for Caution When Excluding Night-Time Thermal Comfort from Tourism Climate Indices'. *Current Issues in Tourism*, 29 May 2025, 1–14. <https://doi.org/10.1080/13683500.2025.2512396>.
- Molina, María Ofelia, Enrique Sánchez, and Claudia Gutiérrez. 'Future Heat Waves over the Mediterranean from an Euro-CORDEX Regional Climate Model Ensemble'. *Scientific Reports*, ahead of print, 2020. <https://doi.org/10.1038/S41598-020-65663-0>.
- Mongelli, Ignazio, Avila-Urbe, Antonio, Maes, Joachim, Durán, Jorge, Feyen, Luc, and Ciscar, Juan-Carlos. *Regional Economic Climate Risks in Europe: Early Insights from a Spatial Growth Model*. Publications Office of the European Union, 2025. <https://data.europa.eu/doi/10.2776/9583538>.
- Nam, Christine, Ludwig Lierhammer, Lars Bunttemeyer, Prosper Evadzi, David Cabana, and Louis Celliers. 'Changes in Universal Thermal Climate Index from Regional Climate Model Projections over European Beaches'. *Climate Services* 34 (April 2024): 100447. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2024.100447>.
- Naumann, Gustavo, Carmelo Cammalleri, Lorenzo Mentaschi, and Luc Feyen. 'Increased Economic Drought Impacts in Europe with Anthropogenic Warming'. *Nature Climate Change* 11, no. 6 (2021): 485–91. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01044-3>.
- NGFS. Short-term Climate Scenarios for central banks and supervisors. Network for Greening the Financial System, 2025. <https://www.ngfs.net/en/publications-and-statistics/publications/ngfs-short-term-climate-scenarios-central-banks-and-supervisors>
- OECD. Climate Adaptation Investment Framework. Organisation for Economic Co-operation and Development, 2024.

https://www.oecd.org/en/publications/climate-adaptation-investment-framework_8686fc27-en.html

- OECD. Nature-Based Solutions for Adapting to Water-Related Climate Risks. OECD Environment Policy Papers No. 21. Organisation for Economic Co-operation and Development, 2020. <https://doi.org/10.1787/2257873d-en>
- Orlandi, Fabio, Jesús Rojo, Antonio Picornell, Jose Oteros, Rosa Pérez-Badia, and Marco Fornaciari. 'Impact of Climate Change on Olive Crop Production in Italy'. *Atmosphere* 11, no. 6 (2020). <https://doi.org/10.3390/atmos11060595>.
- Parete, Giuseppe, Maria Francesca Bruno, Pietro Calabrese, et al. 'Climate Impacts and Adaptation Strategies for Coastal Erosion, Aquaculture, and Tourism along the Adriatic Side of Apulia Region'. *Frontiers in Climate* 6 (April 2024). <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1378253>.
- Patro, Epari Ritesh, Carlo De Michele, Gianluca Granata, and Chiara Biagini. 'Assessment of Current Reservoir Sedimentation Rate and Storage Capacity Loss: An Italian Overview'. *Journal of Environmental Management* 320 (October 2022): 115826. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115826>.
- Pavan, Valentina, Gabriele Antolini, Roberto Barbiero, et al. 'High Resolution Climate Precipitation Analysis for North-Central Italy, 1961–2015'. *Climate Dynamics* 52, no. 5 (2019): 3435–53. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4337-6>.
- Pietrapertosa, Filomena, Monica Salvia, Sonia De Gregorio Hurtado, Davide Geneletti, Valentina D'Alonzo, and Diana Reckien. 'Multi-Level Climate Change Planning: An Analysis of the Italian Case'. *Journal of Environmental Management* 289 (July 2021): 112469. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112469>.
- Polo López, Cristina S, Tsionis, Georgios, Athanasopoulou, Adamantia, et al. *Climate Change Adaptation for the Built Environment: Developments and Needs for Structural Design Standards*. Publications Office of the European Union, 2025. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/3620533>.
- Raffa, Mario, Marianna Adinolfi, Alfredo Reder, et al. 'Very High Resolution Projections over Italy under Different CMIP5 IPCC Scenarios'. *Scientific Data* 10, no. 1 (2023): 238. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02144-9>.
- Raude, Marie, Lea Heinrich, Albert Ferrari, and Simone Borghesi. 'Decarbonising Manufacturing Firms in the European Union's Emissions Trading System'. European University Institute, Florence School of Regulation, 2025. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/e0e1d607-1109-11f0-b1a3-01aa75ed71a1/language-en>
- Ricart, Sandra, Rubén Villar-Navascués, María Reyes, et al. 'Water–Tourism Nexus Research in the Mediterranean in the Past Two Decades: A Systematic Literature Review'. *International Journal of Water Resources Development* 40, no. 1 (2024): 57–83. <https://doi.org/10.1080/07900627.2023.2207686>.

- Robine, Jean-Marie, Siu Lan K. Cheung, Sophie Le Roy, et al. 'Death Toll Exceeded 70,000 in Europe during the Summer of 2003'. *Comptes Rendus Biologies*, Dossier : Nouveautés en cancérogenèse / New developments in carcinogenesis, vol. 331, no. 2 (2008): 171–78. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2007.12.001>.
- Rogge, Karoline, and Kristin Reichardt. 'Policy Mixes for Sustainability Transitions: An Extended Concept and Framework for Analysis'. *Research Policy* 45, no. 8 (2016): 1620–1635. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2016.04.004>.
- Scott, Daniel, Michelle Ruddy, Bas Amelung, and Mantao Tang. 'An Inter-Comparison of the Holiday Climate Index (HCI) and the Tourism Climate Index (TCI) in Europe'. *Atmosphere* 7, no. 6 (2016). <https://doi.org/10.3390/atmos7060080>.
- Secci, Daniele, Maria Giovanna Tanda, Marco D'Oria, Valeria Todaro, and Camilla Fagandini. 'Impacts of Climate Change on Groundwater Droughts by Means of Standardized Indices and Regional Climate Models'. *Journal of Hydrology* 603 (December 2021): 127154. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127154>.
- Serra, Emanuele, Marta Debolini, Giuseppe Giuliano, et al. 'Land Suitability for Viticulture under Present and Future Climate Conditions: Sardinia as a Regional Case Study'. *Italian Journal of Agronomy* 20, no. 4 (2025): 100068. <https://doi.org/10.1016/j.ijagro.2025.100068>.
- Settanta, Giulio, Piero Frascchetti, Francesca Lena, Walter Perconti, and Emanuela Piervitali. 'Recent Tendencies of Extreme Heat Events in Italy'. *Theoretical and Applied Climatology* 155, no. 8 (2024): 7335–48. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05063-w>.
- Sharma, Ankit, Suresh Kumar Jakhar, and Tsang-Ming Choi. 'Would CORSIA Implementation Bring Carbon Neutral Growth in Aviation? A Case of US Full-Service Carriers'. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 97 (2021): art. 102839. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102839>.
- Spano, D., V. Mereu, V. Bacciu, et al. *ANALISI DEL RISCHIO. I cambiamenti climatici in sei città italiane*. Fondazione CMCC - Centro Euro-mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, 2021. https://doi.org/10.25424/CMCC/ANALISI_DEL_RISCHIO_2021.
- Spano, Donatella, Valentina Mereu, Valentina Bacciu, Serena Marras, and Antonio Trabucco. *Analisi del Rischio - I cambiamenti climatici in Italia*. Fondazione CMCC - Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, 2020. https://doi.org/10.25424/CMCC/ANALISI_DEL_RISCHIO.
- Steiger, Robert, and Johann Stötter. 'Climate Change Impact Assessment of Ski Tourism in Tyrol'. *Tourism Geographies* 15, no. 4 (2013): 577–600. <https://doi.org/10.1080/14616688.2012.762539>.

- Straffelini, Eugenio, and Paolo Tarolli. 'Climate Change-Induced Aridity Is Affecting Agriculture in Northeast Italy'. *Agricultural Systems* 208 (May 2023): 103647. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103647>.
- Struglia, Maria Vittoria, Alessandro Anav, Marta Antonelli, et al. 'Impact of Spatial Resolution on Multi-Scenario WRF-ARW Simulations Driven by the CMIP6 MPI-ESM1-2-HR Global Model: A Focus on Precipitation Distribution over Italy'. *Geoscientific Model Development* 18, no. 18 (2025): 6095–116. <https://doi.org/10.5194/gmd-18-6095-2025>.
- Suarez-Gutierrez, Laura, Wolfgang A. Müller, and Jochem Marotzke. 'Extreme Heat and Drought Typical of an End-of-Century Climate Could Occur over Europe Soon and Repeatedly'. *Communications Earth & Environment* 4, no. 1 (2023): 415. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01075-y>.
- Szewczyk, Wojciech, Ignazio Mongelli, and Juan-Carlos Ciscar. 'Heat Stress, Labour Productivity and Adaptation in Europe—a Regional and Occupational Analysis'. *Environmental Research Letters* 16, no. 10 (2021): 105002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac24cf>.
- Tariq, Mohsin, A. N. Rohith, R. Cibir, Eleonora Aruffo, Gamal AbdElNasser Allam Abouzied, and Piero Di Carlo. 'Understanding Future Hydrologic Challenges: Modelling the Impact of Climate Change on River Runoff in Central Italy'. *Environmental Challenges* 15 (April 2024): 100899. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100899>.
- Terhaar, Jens, Friedrich A. Burger, Linus Vogt, Thomas L. Frölicher, and Thomas F. Stocker. 'Record Sea Surface Temperature Jump in 2023–2024 Unlikely but Not Unexpected'. *Nature* 639, no. 8056 (2025): 942–46. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08674-z>.
- Ufficio studi della CGIA. Povertà energetica in Italia: stime e scenari. CGIA, 2026. <https://www.cgiamestre.com/oltre-5-milioni-di-italiani-sono-in-poverta-energetica/>
- UNEP. Adaptation Gap Report 2023: Underfinanced. Underprepared. United Nations Environment Programme, 2023. <https://www.unep.org/resources/adaptation-gap-report-2023>
- Van Passel, Steven, Emanuele Massetti, and Robert Mendelsohn. 'A Ricardian Analysis of the Impact of Climate Change on European Agriculture'. *Environmental and Resource Economics* 67, no. 4 (2017): 725–60. <https://doi.org/10.1007/s10640-016-0001-y>.
- Velea, Liliana, Zenaida Chițu, and Roxana Bojariu. 'Thermal Stress Information as a Tourism-Oriented Climate Product: Performance Analysis for Selected Urban Destinations in Romania and Italy'. *Heliyon* 10, no. 2 (2024): e24682. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24682>.
- Vorkauf, Maria, Robert Steiger, Bruno Abegg, and Erika Hiltbrunner. 'Snowmaking in a Warmer Climate: An in-Depth Analysis of Future Water Demands for the Ski

Resort Andermatt-Sedrun-Disentis (Switzerland) in the Twenty-First Century'. *International Journal of Biometeorology* 68, no. 3 (2024): 565–79.
<https://doi.org/10.1007/s00484-022-02394-z>.

- Weitzel, Matthias, and Camille Van der Vorst. Uneven Progress in Reducing Emissions in the EU ETS. Joint Research Centre, European Commission, 2024.
<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC138215>
- WMO. *State of the Global Climate 2025*. 2025th edn. World Meteorological Organization, 2025. <https://doi.org/10.59327/WMO/S/CRI/SOC/1>.
- World Bank. *Lifelines: The Resilient Infrastructure Opportunity*. World Bank, 2019. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/775891600098079887>
- World Travel and Tourism Council. *Global Economic Trends and Impact*. World Travel and Tourism Council, 2021.
<https://wttc.org/Portals/0/Documents/Reports/2021/Global%20Economic%20Impact%20and%20Trends%202021.pdf>.
- Zenios, Stavros A., Andrea Consiglio, Marialena Athanasopoulou, Edmund Moshammer, Angel Gavilan, and Aitor Erce. 'Risk Management for Sustainable Sovereign Debt Financing'. *Operations Research* 69, no. 3 (2021): 755–73.
<https://doi.org/10.1287/opre.2020.2055>.
- Zetsche, Dirk A., and Linn Anker-Sørensen. 'Regulating Sustainable Finance in the Dark'. *European Business Organization Law Review* 23, no. 1 (2022): 47–85.
<https://doi.org/10.1007/s40804-021-00237-9>.