

Oggetto: L'impatto dei cambiamenti climatici sul settore energetico e sulle infrastrutture.

Sommario

1. Introduzione.....	3
2. I cambiamenti climatici: una sintetica descrizione del fenomeno	4
2.1. Cambiamenti climatici ed effetto antropico	6
3. Scenari climatici futuri	8
4. Effetti dei cambiamenti climatici sui consumi energetici.....	13
4.1. Aumento della domanda di climatizzazione estiva e riduzione del riscaldamento invernale	14
4.2. Effetti specifici sulla domanda di climatizzazione	15
4.3. Impatti sui consumi finali e sui picchi di domanda	16
4.4. Conseguenze economiche e di mercato	17
4.5. Impatti sui consumi residenziali e industriali	18
5. L'impatto del cambiamento climatico sulla produzione energetica.....	19
5.1. Fonti rinnovabili	19
5.1.1. Variazioni della risorsa eolica e idrica	19
5.2 Fonti convenzionali. Termoelettrico e nucleare: efficienza decrescente per temperature elevate.	25
6. Rischi climatici per le infrastrutture energetiche e resilienza della rete	25
6.1. Eventi estremi: ondate di calore, inondazioni, siccità, incendi, tempeste ...	26
6.1.1. Ondate di calore.....	26
6.1.2. Inondazioni e precipitazioni intense	26
6.1.3. Siccità prolungate	26
6.1.4. Incendi boschivi	27
6.1.5. Tempeste e vento forte.....	27
6.2 Vulnerabilità delle reti e rischio blackout	27
6.3 Danni fisici e interruzioni di supply-chain	30
7. Infrastrutture e trasporti come cause e vittime dei cambiamenti climatici	33
7.1. Riferimenti strategici e normativi.....	35
8. Pericoli meteo-climatici e vulnerabilità dei sistemi infrastrutturali in Italia.....	37
8.1. Principali pericoli climatici per le infrastrutture	38
8.3. Distribuzione spaziale e differenze territoriali.....	40
8.4. Impatti trasversali su economia e società.....	41
9. Impatto dei cambiamenti climatici sui sistemi di trasporto e sulla mobilità	42
9.1. Trasporto stradale e autostradale	42
9.2. Sistema ferroviario	43
9.3. Porti, trasporto marittimo e vie navigabili interne	44
9.4. Aeroporti e trasporto aereo.....	44
9.5. Mobilità urbana e metropolitana.....	45
9.6. Logistica, catene del valore e intermodalità	45

10. Interdipendenze tra infrastrutture: acqua, digitale e servizi essenziali	46
10.1. Infrastrutture idriche e difesa del suolo	46
10.1.1. Adduzione, distribuzione, invasi, sistemi di laminazione	47
10.1.2. Interazioni con infrastrutture di trasporto e insediamenti urbani	47
10.2. Infrastrutture digitali e ICT (Information and Communication Technology)	48
10.2.1. Data center, reti di telecomunicazione e sensori.....	48
10.2.2. Ruolo delle infrastrutture digitali per la gestione del rischio climatico	49
10.3. Effetti a cascata e rischio sistemico	49
10.3.1. Blackout, interruzioni di servizio, blocchi logistici	49
10.3.2. Impatti su sanità, istruzione, servizi urbani e coesione sociale.....	50
11. Valutazione economica degli impatti e dei fabbisogni di adattamento delle infrastrutture.....	51
11.1. Danni attesi alle infrastrutture e all'economia	51
11.2. Fabbisogni di investimento in adattamento.....	52
11.2.1. Stime aggregate per l'Italia	52
11.3. Costi e benefici delle misure di resilienza	53
12. La prospettiva dell'adattamento e della mitigazione per settore energetico e infrastrutture (cenni).....	53

1. Introduzione

La produzione e il consumo di energia sono fortemente legati alle condizioni ambientali e, in particolare, a quelle meteo-climatiche. I recenti e rapidi cambiamenti del clima hanno pertanto un impatto evidente sul settore energetico, influenzando non solo la capacità di produrre energia, tanto da fonti rinnovabili quanto da fonti convenzionali, ma anche i consumi (e quindi la domanda di energia), la sicurezza degli impianti e, più in generale, l'equilibrio complessivo del sistema energetico. Pertanto, se da una parte il settore energetico, soprattutto attraverso le emissioni di gas climalteranti (in primo luogo anidride carbonica, protossido d'azoto e metano), è senz'altro tra i maggiori responsabili del recente cambiamento climatico, dall'altra è anche fortemente esposto alle conseguenze di tale fenomeno. Inoltre, il cambiamento climatico mostra un impatto notevole anche sulle infrastrutture e sui sistemi di mobilità.

Il concetto di accessibilità assume, in questo quadro, un rilievo centrale. Non rappresenta soltanto la possibilità di spostarsi da un punto all'altro del territorio, ma la capacità del sistema infrastrutturale di garantire, anche in condizioni climatiche mutate o estreme, l'accesso al lavoro e alle attività produttive, all'istruzione e alla formazione, ai servizi sanitari e sociali nonché alle reti logistiche e ai mercati. Peraltro, la documentazione analizzata¹ evidenzia come infrastrutture e mobilità costituiscano un fattore determinante per la crescita economica, la competitività e la coesione territoriale, in particolare in un Paese caratterizzato da forti divari tra aree urbane e aree interne, tra Nord e Sud, tra regioni dotate di reti moderne e territori con ritardi infrastrutturali e carenze manutentive.

Tra gli eventi meteo-climatici che possono maggiormente incidere sulla produzione e sulla distribuzione di energia, oltre che sulle stesse infrastrutture energetiche e sui sistemi di mobilità e comunicazione, vi sono in particolare il caldo intenso, la siccità e le piogge violente: tutti fenomeni di cui, a causa dei cambiamenti climatici in atto, stanno aumentando sia la frequenza che l'intensità. Inoltre, anche alcune delle principali conseguenze dei cambiamenti climatici sull'ambiente, tra cui l'innalzamento del livello del mare, il riscaldamento delle superfici liquide e la fusione dei ghiacciai, possono influenzare in modo significativo il settore energetico e le infrastrutture presenti sul territorio.

Lo scopo del presente contributo è quindi quello di analizzare i principali effetti dei cambiamenti climatici sul settore energetico e sulle infrastrutture, soprattutto in ottica futura, considerando le più autorevoli e credibili proiezioni sull'andamento climatico nel breve e nel medio termine. Nel presente contributo, in coerenza con gli studi più recenti, per infrastrutture si intenderanno non solo le reti materiali di trasporto (strade, ferrovie, porti, aeroporti), ma anche quelle che assicurano l'accesso a risorse e servizi fondamentali, generando accessibilità fisica e funzionale ai luoghi, ai servizi e alle opportunità².

Saranno, inoltre, prese in esame le politiche di adattamento e gli strumenti disponibili a livello europeo e nazionale, al fine di rendere il settore energetico e le infrastrutture resilienti

¹ Commissione "Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità sostenibili" (presidente: Carlo Carraro), *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità. Soluzioni e strategie per gli investimenti infrastrutturali in un contesto di adattamento ai cambiamenti climatici e di mitigazione delle emissioni di gas-serra*, Roma, Ministero delle infrastrutture e della mobilità sostenibili, 2022, p. 312. Documento disponibile all'indirizzo istituzionale: https://www.mit.gov.it/nfsmitgov/files/media/notizia/2022-02/Rapporto_Carraro_Mims.pdf

² Commissione "Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili", *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 42.

ai cambiamenti climatici, considerando anche le opportunità offerte dall'innovazione tecnologica e dalla pianificazione integrata.

2. I cambiamenti climatici: una sintetica descrizione del fenomeno

L'analisi dei dati raccolti a livello globale dalle stazioni meteo ufficiali dimostra che, dalla metà del XIX secolo in poi, le temperature medie planetarie sono rapidamente aumentate: è il fenomeno noto come *Global Warming*. In base a quanto descritto nell'ultimo Rapporto IPCC (AR6 - Assessment Report 6), nel decennio scorso (periodo 2011-2020) le temperature medie planetarie sono risultate di 1,09 °C più alte rispetto alla media della seconda metà del XIX secolo³. A confermare che il pianeta si sta rapidamente riscaldando, vi è anche la graduatoria delle annate più calde, a scala globale, dalla metà del 1800 a oggi: le temperature medie in assoluto più alte degli ultimi 175 anni sono, infatti, state registrate nel 2024, con il 2023 al secondo posto e il 2016 al terzo. Più in generale, le ultime undici annate sono anche le undici più calde dell'era moderna. L'ultimo decennio risulta, quindi, essere sensibilmente più caldo di tutti quelli che lo hanno preceduto dalla metà del XIX secolo in poi.

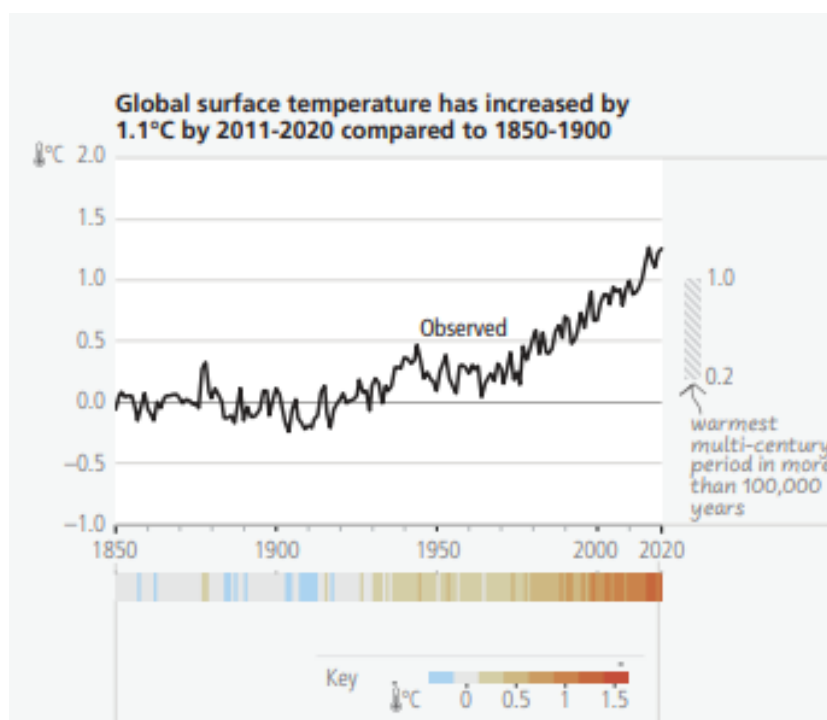


Figura 1: andamento delle temperature medie planetarie dalla metà del 1800 al 2024. La banda colorata sotto il grafico indica le anomalie delle temperature medie annuali rispetto alla media del XX secolo: le tonalità calde (giallo/rosso) indicano annate con temperature superiori alla media di lungo periodo, quelle dalle tonalità fredde (celeste/azzurro) annate con temperature inferiori alla media di lungo periodo. (IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report).

³ IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

L'aumento delle temperature medie planetarie non è stato né costante né geograficamente uniforme: questo significa che ci sono stati periodi in cui le temperature sono salite poco o addirittura per niente e altri, come l'ultimo decennio, in cui l'incremento è stato rapido, ma soprattutto implica che vi sono regioni del Pianeta che si sono riscaldate più di altre. In particolare, l'area mediterranea, e di conseguenza anche l'Italia, è considerata un *hot spot* dei cambiamenti climatici, cioè una di quelle aree del Globo in cui l'aumento delle temperature medie è stato più marcato. I dati raccolti sul nostro territorio, del resto, confermano che in Italia le temperature medie sono salite in misura maggiore rispetto alla media planetaria, con il 2024 che risulta essere, per il nostro Paese, l'anno più caldo degli ultimi due secoli, seguito nell'ordine dal 2022 e dal 2023⁴.

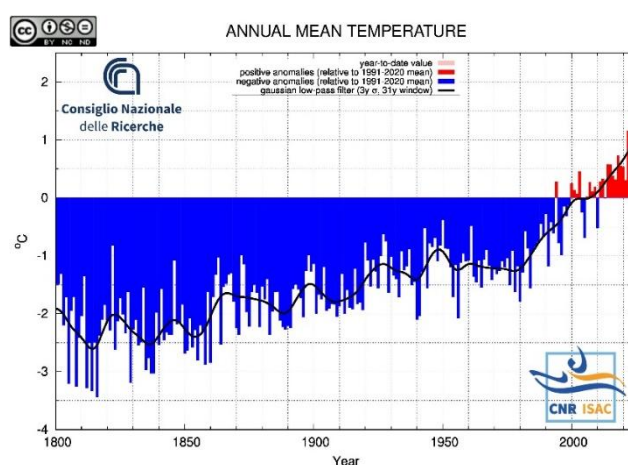


Figura 2: andamento delle temperature medie in Italia dal 1800 al 2024 descritta in termini di anomalia rispetto alla media climatica (periodo 1991-2020): in blu le annate caratterizzate da temperature inferiori alla media trentennale di riferimento, in rosso le annate con temperature superiori. (ISAC-CNR).

Le osservazioni raccolte negli ultimi decenni mostrano, come conseguenza dell'aumento delle temperature medie planetarie, importanti cambiamenti anche in diverse altre caratteristiche del sistema climatico: in particolare, in base a quanto riportato nell'ultimo rapporto dell'IPCC, si può affermare che è *probabile* che la frequenza e l'intensità degli eventi di pioggia forte e dei periodi di siccità siano aumentati nella maggior parte del Pianeta. Nel frattempo, pressoché in tutti i continenti è stato osservato un *trend* in crescita per quel che riguarda i periodi di siccità idrologica (scarsità di risorse idriche nel suolo), soprattutto a causa del maggior tasso di evapotraspirazione (evaporazione diretta e traspirazione attraverso le piante) indotto dalle più alte temperature. In effetti, in base a un recente studio⁵, l'ultimo decennio appare caratterizzato da quella che si potrebbe definire una *siccità idrologica planetaria*: le riserve di acqua disponibile sui continenti del Pianeta, nel periodo 2015-2023, sarebbero, infatti, rimaste costantemente al di sotto dei valori medi del periodo 2002-2014, per cui

⁴ CNR, Istituto di scienze dell'atmosfera e del clima (ISAC). Climate Monitoring for Italy: https://www.isac.cnr.it/climstor/climate_news.html#long-term.

⁵ M. Rodell: An Abrupt Decline in Global Terrestrial Water Storage and its Relationship with Sea Level Change. Surveys in Geophysics, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10712-024-09860-w>.

mediamente nelle terre emerse mancherebbero nel complesso circa 1200 chilometri cubi d'acqua.

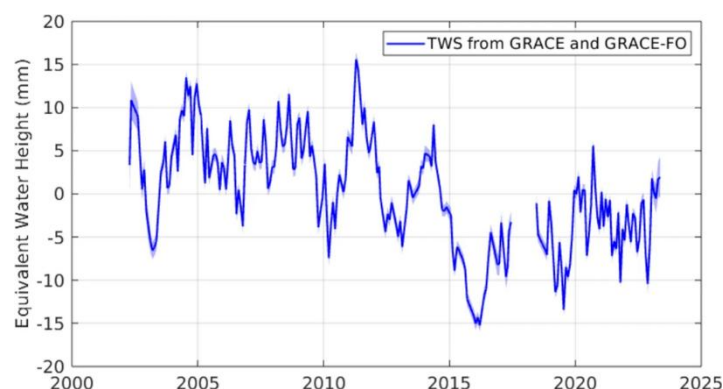


Figura 3: anomalia della quantità media d'acqua immagazzinata sulle terre emerse a scala globale rispetto al valore medio del periodo 2003-2020. (Rodell, M., Barnoud, A., Robertson, F.R. et al. Surveys in Geophysics).

Nello specifico, alcuni studi⁶ confermano che in Italia, tra la fine del '800 e gli inizi di questo secolo, considerando il trend di lungo periodo, nell'alternarsi di fasi più umide e altre più asciutte, le precipitazioni medie sono rimaste quasi invariate e si osserva solo una leggera e poco significativa tendenza alla diminuzione. Tuttavia, durante il medesimo arco temporale, si è registrata una sensibile diminuzione dei giorni piovosi: ne deriva che le precipitazioni tendono a concentrarsi in meno eventi, durante i quali inevitabilmente risultano più intense (stessa quantità di pioggia concentrata in meno eventi piovosi), e al tempo stesso sono diventati più frequenti i lunghi periodi caratterizzati da assenza di precipitazioni, con conseguente aumento del numero e della severità delle fasi di siccità. L'analisi dei dati meteo degli ultimi decenni mostra, inoltre, un aumento della variabilità inter-stagionale e inter-annuale, per cui con sempre maggior frequenza nel nostro Paese si alternano, ad esempio, annate insolitamente umide ad altre caratterizzate da forte siccità. Al contempo, l'aumento delle temperature medie ha causato una rapida ritirata dei ghiacciai alpini⁷, con un evidente impoverimento della risorsa idrica immagazzinata sulle nostre montagne: si stima che in circa 50 anni, dai primi anni '60 al 2014, in Italia la superficie dei ghiacciai si sia ridotta di circa il 30%.

2.1. Cambiamenti climatici ed effetto antropico

In base alle attuali conoscenze scientifiche, è virtualmente certo che la maggior parte dell'aumento delle temperature medie planetarie dell'ultimo periodo sia da attribuire alle emissioni di *gas climalteranti* (principalmente anidride carbonica, metano, protossido d'azoto

⁶ SNPA, 2023: Il clima in Italia nel 2022. Report SNPA n. 36/2023. ISBN: 978-88-448-1168-6. Disponibile online all'indirizzo: <https://bit.ly/3RFpkLy>; T. Nanni, M. Brunetti e M. Maugeri, Variazioni nella frequenza e nell'intensità delle precipitazioni giornaliere in Italia negli ultimi 120 anni. In: Clima e cambiamenti climatici: le attività di ricerca del CNR, a cura di B. Carli, G. Cavaretta, M. Colacino, S. Fuzzi. CNR, 2007.

⁷ C. Smiraglia e G. Diolaiuti, Il Nuovo Catasto dei Ghiacciai Italiani. Revisione 2016. Disponibile online all'indirizzo: https://sites.unimi.it/glaciol/wp-content/uploads/2019/02/catasto_unito.pdf.

e gas fluorurati) di origine antropica, specie per quel che riguarda il periodo successivo al 1950, nel quale le emissioni sono notevolmente aumentate.

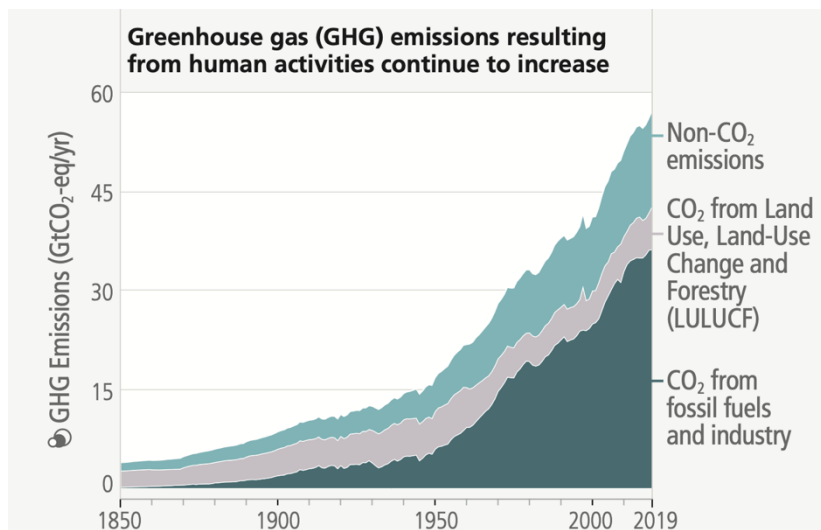


Figura 4: emissioni antropiche di gas serra dal 1850 al 2019. In verde scuro le emissioni di CO₂ da consumo di combustibili fossili e attività industriali; in rosa le emissioni di CO₂ da deforestazione e sfruttamento del suolo; in verde chiaro le emissioni di gas climalteranti diversi dalla CO₂. Fonte: IPCC, *Climate Change 2023: Synthesis Report*, 2023, figura 2.1(a), p. 44. Documento disponibile all'indirizzo istituzionale: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf

Queste sostanze, note anche come *gas serra*, sono naturalmente presenti nell'atmosfera e contribuiscono a parte del c.d. “effetto serra”, che garantisce al nostro Pianeta una temperatura “abitabile”. Tuttavia, le emissioni originate dalle attività umane stanno causando un aumento delle concentrazioni atmosferiche di questi gas e, di conseguenza, anche un incremento delle temperature causato dalla maggior quantità di calore trattenuta nell'atmosfera (aumento dell'effetto serra). In realtà le emissioni antropiche di gas climalteranti sono rimaste relativamente contenute fino alla metà del secolo scorso, per poi aumentare rapidamente a partire dagli anni '50, quando di conseguenza anche le loro concentrazioni atmosferiche hanno fatto registrare un'impennata.

Per il periodo precedente al 1950 si può attribuire, in effetti, gran parte dei cambiamenti climatici osservati a normali cicli naturali, tra cui le periodiche variazioni dell'attività solare e il vulcanismo. Al contrario, quanto avvenuto a partire dalla metà del secolo passato non è spiegabile con i cicli naturali, e solo considerando il contributo dei gas climalteranti emessi dalle attività umane si riesce a dar conto del rapido riscaldamento planetario degli ultimi decenni. Utilizzando i modelli climatici per ricostruire il clima del passato, emerge, infatti, che, se si considerano i soli cicli naturali, le simulazioni numeriche riproducono con sufficiente fedeltà quanto avvenuto fino al 1950, ma divergono sensibilmente da quanto osservato per il periodo successivo. Viceversa, se viene introdotto

nelle elaborazioni anche il contributo delle emissioni a effetto serra le proiezioni riescono a descrivere piuttosto bene anche i cambiamenti climatici più recenti⁸.

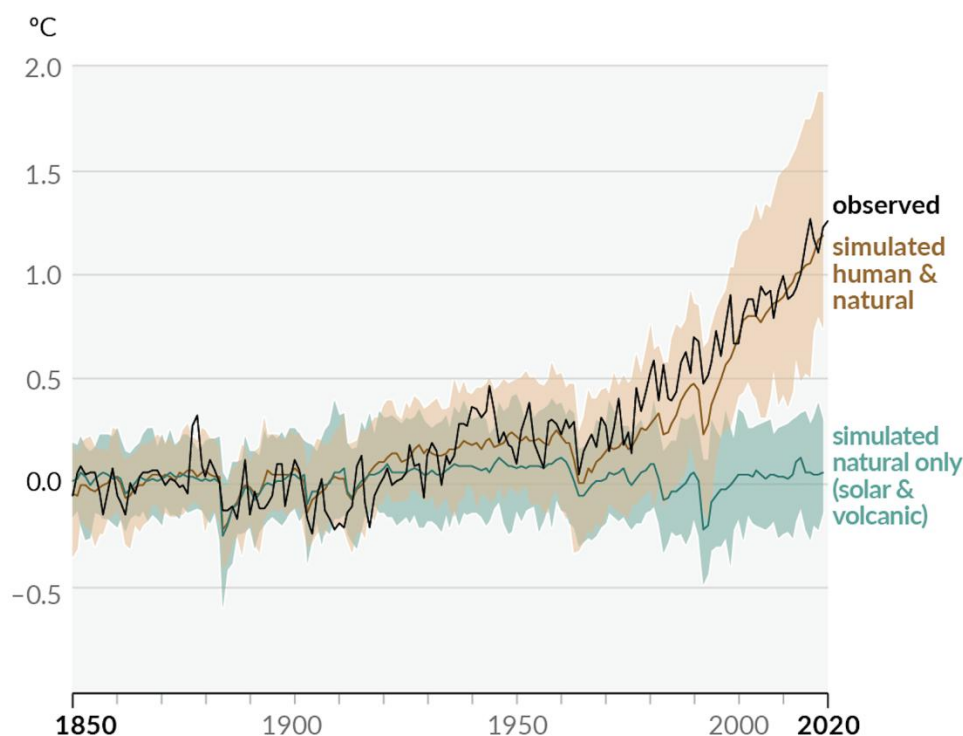


Figura 5: variazioni delle temperature medie planetarie osservate (linea nera), simulate dai modelli climatici considerando solo i cicli naturali (linea verde) e simulate dai modelli considerando sia cicli naturali sia emissioni antropiche (linea marrone). Fonte: IPCC, 2021, “Summary for Policymakers”, in *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, a cura di V. Masson-Delmotte et al., Cambridge (Regno Unito) e New York (USA), Cambridge University Press, figura SPM.1(b), p. 6. Documento disponibile all’indirizzo istituzionale: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf

3. Scenari climatici futuri

La metodologia prevalentemente utilizzata per individuare gli scenari climatici futuri è quella che prevede l'utilizzo di modelli fisico-matematici in grado di simulare il comportamento dell'atmosfera: si tratta, quindi, di un metodo numerico caratterizzato da un inevitabile grado di incertezza e, in considerazione dell'importante ruolo delle emissioni di sostanze climalteranti (*gas a effetto serra*) nell'indirizzare il *trend* climatico, fortemente dipendente dagli scenari di emissione considerati.

Gli scenari proposti sono, quindi, i più probabili tra i tanti possibili, e il valore assoluto delle variazioni indicate ha, pertanto, un peso relativo: l'utilità di tali proiezioni sta perciò soprattutto nella tendenza indicata che, come dimostrato anche dalle analisi e dalle

⁸ Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report. IPCC, 2021.

valutazioni sulle prestazioni delle proiezioni climatiche degli ultimi decenni, mostra una buona attendibilità⁹.

Poiché la letteratura scientifica indica come molto probabile che la causa principale del cambiamento climatico recente (responsabile di oltre il 50% del medesimo) siano le emissioni di gas clima-alteranti (o gas serra), l'andamento climatico futuro dipende chiaramente dal *trend* di tali emissioni e, quindi, inevitabilmente dallo scenario socio-economico considerato¹⁰, da cui le emissioni dipendono. In questa analisi vengono descritte le proiezioni climatiche ottenute considerando lo scenario socio-economico più probabile e che meglio rappresenta l'attuale contesto climatico e geopolitico (SSP2-4.5), ovvero uno sviluppo intermedio tra quello più ottimista (SSP1-2.6), che tiene conto di un rapido raggiungimento della neutralità climatica (cioè un bilancio nullo tra le sostanze inquinanti emesse e quelle rimosse dall'atmosfera) già nei prossimi decenni, e quello peggiore (SSP3-8.5), che invece ipotizza un ulteriore costante aumento delle emissioni. Più nel dettaglio, lo scenario SSP2-4.5 utilizza l'ipotesi di emissione RCP4.5¹¹, che vede una stabilizzazione delle emissioni di gas serra entro il 2050, con una loro successiva graduale riduzione, fino ad arrivare alla fine del secolo con concentrazioni in atmosfera di circa il 25-30% superiori a quelle attuali.

Le proiezioni elaborate dai modelli del programma CMIP6¹², per il breve termine (entro l'anno 2040), descrivono un aumento delle temperature medie a scala planetaria, qualsiasi sia lo scenario di emissione considerato: a influenzare il clima, infatti, non saranno tanto le emissioni dei prossimi anni, quanto piuttosto il notevole *surplus* di gas serra già presente in atmosfera e destinato a essere riassorbito solo su tempi molto lunghi, almeno per la scala temporale umana. Nell'arco dei prossimi 15 anni è, quindi, molto probabile un ulteriore riscaldamento a scala globale, la cui entità è stimata in circa 0,4-0,5 °C entro il 2040¹³, indipendentemente dalle emissioni prodotte. Insomma, nel breve termine l'andamento delle emissioni avrà un impatto poco significativo sul *trend* climatico ed è praticamente scontato attendersi un ulteriore aumento delle temperature medie.

Su periodi più lunghi, invece, l'andamento delle emissioni avrà un impatto decisamente più importante sulle concentrazioni atmosferiche di gas serra e, quindi, sul cambiamento climatico, tanto che per la fine del secolo la differenza di riscaldamento

⁹ Hausfather, Z., Drake, F., Abbott, T., Schmidt, G.: Evaluating the Performance of Past Climate Model Projections. *Geophysical Research Letters*, 2019; Carvalho, D., Rafael, S., Monteiro, A. et al. How well have CMIP3, CMIP5 and CMIP6 future climate projections portrayed the recently observed warming. *Sci Rep* 12, 11983 (2022).

¹⁰ Per le proiezioni climatiche nell'ambito del programma CMIP6 vengono utilizzati gli SSPs, Shared Socio-economic Pathways, appunto scenari che tengono conto di differenti percorsi di sviluppo e, quindi, anche di emissione.

¹¹ Gli RCPs (Representative Concentration Pathways) descrivono i possibili futuri scenari di emissione di gas serra. In particolare, in base a quanto ipotizzato dallo scenario RCP4.5, per fine secolo le concentrazioni atmosferiche di gas serra potrebbero essere di circa 538 ppm.

¹² Il CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) è un programma mondiale di coordinamento delle simulazioni climatiche, a cui collaborano i maggiori centri di ricerca a livello internazionale, promosso per migliorare la comprensione dei cambiamenti climatici e fornire, quindi, delle proiezioni il più possibile attendibili. La fase 6 di tale programma (CMIP6), iniziata nel 2015, ha prodotto scenari climatici futuri ancor più precisi e attendibili.

¹³ AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. IPCC 2021.

planetario tra lo scenario con le emissioni minori e quello con le emissioni più alte potrebbe essere anche di oltre 2 °C.

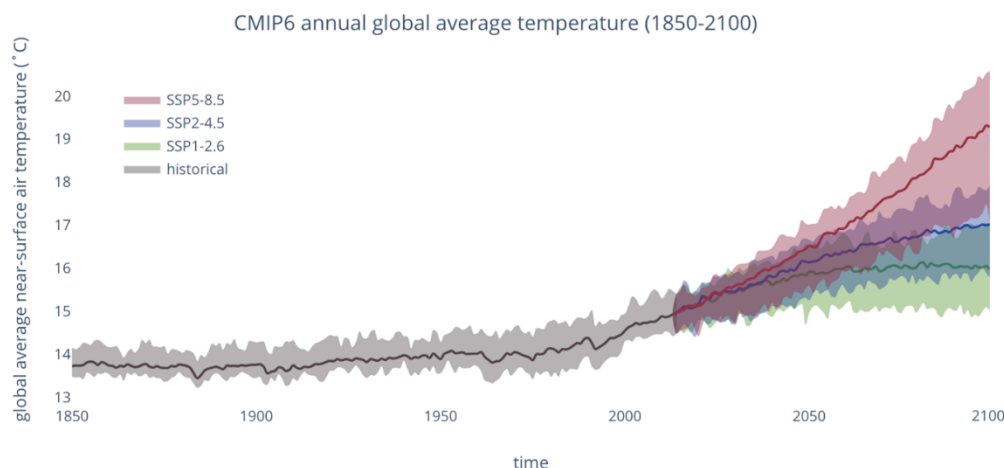


Figura 6: andamento delle temperature medie planetarie, come osservato in base ai dati strumentali (linea nera) e come previsto dai modelli del Programma CMIP6 in base ai diversi scenari di emissione (linee colorate). La linea blu, relativa a uno scenario intermedio, descrive l'andamento considerato più realistico. (Copernicus Climate Change Service/ECMWF).

Considerando lo scenario di emissione intermedio (SSP2-4.5), ovvero quello più probabile, nel medio termine, cioè per la parte centrale del secolo, rispetto ai valori attuali è previsto un aumento delle temperature medie planetarie compreso tra 0,5 °C e 1,4 °C (con la stima più attendibile di 0,9 °C). Inoltre, in base alle proiezioni del programma CMIP6 contenute nell'ultimo rapporto del IPCC¹⁴, per ogni 0,5 °C di incremento delle temperature medie si osserverà un aumento evidente degli episodi di caldo estremo, delle precipitazioni particolarmente intense e dei periodi di siccità, sebbene con distribuzione non uniforme sulla superficie del Globo. In particolare, il ciclo idrologico continuerà a intensificarsi man mano che le temperature medie saliranno, e ciò comporterà una maggior variabilità delle precipitazioni, sia da un anno all'altro che da una stagione alla successiva.

Sempre in base alle proiezioni del programma CMIP6, contenute nell'ultimo rapporto del IPCC, le precipitazioni complessive sono destinate ad aumentare alle alte latitudini, sul Pacifico Equatoriale e nelle regioni interessate dai monsoni, mentre sono previste in diminuzione in alcune regioni dei Tropici, in molte zone sub-tropicali e nell'area mediterranea. Anche l'intensità e la frequenza dei periodi di siccità varieranno sensibilmente da una regione all'altra del Globo, ma le zone in cui aumenteranno saranno comunque maggiori di quelle in cui diminuiranno, mentre si stima che gli eventi caratterizzati da precipitazioni estreme, a livello globale, aumenteranno in misura di circa il 7% per ogni grado in più di temperatura media.

Le proiezioni mostrano, comunque, che la rapidità con cui il clima cambierà varierà da una regione all'altra del Pianeta, con alcune zone, dette anche *hot spot*, in cui i cambiamenti climatici risulteranno più intensi e con impatto sull'ambiente più evidente: tra queste – come

¹⁴ AR6, Sixth Assessment Report. IPCC, 2021.

già si accennava più sopra – vi è anche la regione del Mediterraneo e, di conseguenza, l'Italia. Alcuni recenti studi¹⁵ confermano, in particolare, che nell'area mediterranea nei prossimi decenni è previsto un aumento della durata e dell'intensità delle ondate di calore, nonché un incremento sia degli episodi di siccità che degli eventi piovosi estremi.

Per meglio descrivere gli scenari climatici futuri per il nostro Paese, è possibile utilizzare le proiezioni dei Modelli Climatici Regionali del programma Euro-CORDEX 11¹⁶, che forniscono elaborazioni ad alta risoluzione (dettaglio su box di 12 km di lato) per il settore europeo, compresa l'Italia.

In base alle proiezioni dei modelli Euro-CORDEX 11, considerando uno scenario di emissione intermedio (il più probabile), in Italia per la parte centrale del secolo (periodo 2036-2065) è atteso un ulteriore aumento delle temperature medie, con un riscaldamento che risulterà superiore a quello medio osservabile a scala planetaria; le temperature aumenteranno in tutto il Paese, con l'incremento maggiore al Nord. Ciò significa che gli inverni risulteranno mediamente più miti, mentre le estati risulteranno più torride, con un incremento degli episodi di caldo estremo¹⁷ e delle notti tropicali¹⁸.

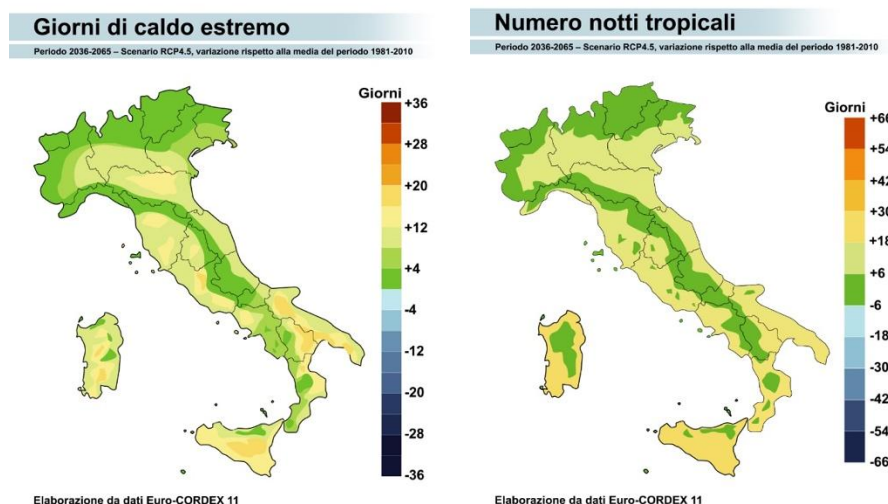


Figura 7: variazione del numero annuo di giorni di caldo estremo e del numero annuo di notti tropicali; proiezioni per la parte centrale del secolo (periodo 2036-2065) rispetto alla media trentennale di riferimento.

¹⁵ V. Todaro et al.: Climate Change over the Mediterranean Region: Local Temperature and Precipitation variations at Five Pilot Sites. Water, 2022.

¹⁶ Il programma CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling EXperiment) prevede l'utilizzo di RCM che, ottenuti da rielaborazioni dei GCM, possano simulare il clima futuro su aree limitate del Globo ma con più alta risoluzione, così da fornire informazioni più dettagliate e precise. Euro-CORDEX 11 è il programma che coordina i modelli Climatici Regionali focalizzati sull'Europa, con un dettaglio spaziale di 0,11 gradi (cioè circa 12 km). Programma Euro-CORDEX: <https://www.euro-cordex.net/index.php/en>.

¹⁷ Si considerano giornate di caldo estremo quelle in cui la temperatura massima (la più alta registrata durante il giorno) raggiunge o supera i 35 °C.

¹⁸ Si considerano notti tropicali quelle durante le quali la temperatura non scende mai al di sotto di 20 °C.

Sempre in base agli scenari descritti dalle proiezioni dei modelli Euro-CORDEX, le **precipitazioni totali annue**, per la parte centrale del secolo, non mostreranno variazioni significative nel Centro-Nord Italia, e anzi nelle regioni alpine tenderanno ad aumentare nella misura del 5-10%; al Sud e Isole, al contrario, è attesa una riduzione delle precipitazioni complessive, comunque in generale in misura non superiore al 10%. In tutto il Paese, come confermato anche da alcune ricerche¹⁹, tenderà però ad aumentare la variabilità inter-annuale e inter-stagionale: aumenteranno, cioè, le differenze tra una stagione e l'altra e tra un anno e l'altro. Con maggior frequenza si alterneranno, quindi, annate particolarmente piovose (con precipitazioni ben al di sopra della norma) ad altre estremamente asciutte (con precipitazioni di molto al di sotto dei valori normali). La crescente irregolarità delle precipitazioni favorirà un aumento degli eventi piovosi estremi, come confermato anche dalle proiezioni riguardanti il numero di **giorni con precipitazioni abbondanti**²⁰, in crescita in gran parte del Paese: i medesimi quantitativi di pioggia arriveranno pertanto concentrati in meno episodi, che risulteranno inevitabilmente più intensi.

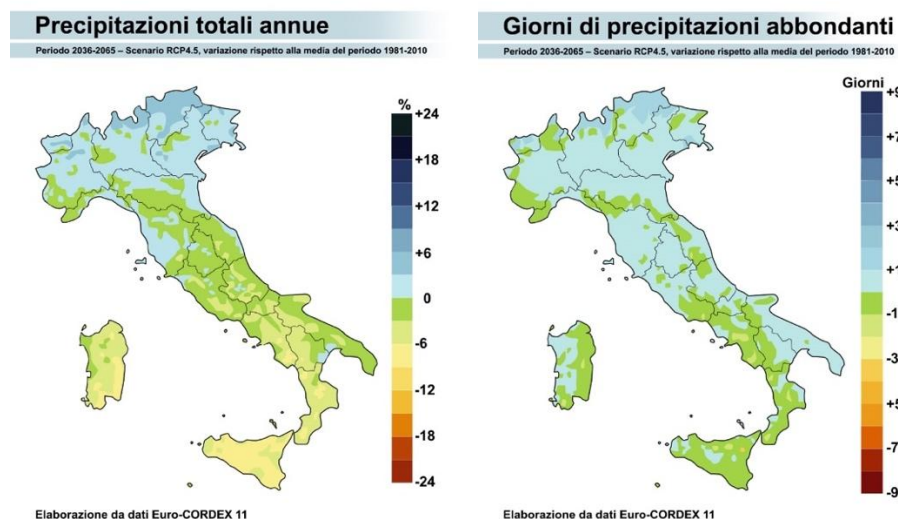


Figura 8: variazione delle precipitazioni totali annue (scarto percentuale) e del numero di giorni caratterizzati da precipitazioni abbondanti (oltre 20 mm); proiezioni per la parte centrale del secolo (periodo 2036-2065) rispetto alla media trentennale di riferimento.

Le proiezioni per la parte centrale del secolo mostrano anche un generale aumento del **più alto numero di giorni asciutti consecutivi**, cioè della durata massima dei periodi asciutti: fatta eccezione per le aree più settentrionali del Paese, le fasi caratterizzate da assenza di precipitazioni tenderanno, quindi, a divenire più prolungate, specie all'estremo Sud e Isole, con un incremento anche di 6-8 giorni in ampi settori della Sicilia. La maggior irregolarità delle precipitazioni favorirà anche un aumento della frequenza dei periodi di siccità e, soprattutto, della probabilità di incorrere in fasi di **siccità estrema**. Come confermano le

¹⁹ A.G. Pendergrass et al.: Precipitation variability increases in a warmer climate. Scientific Reports.

²⁰ Si intendono giornate con precipitazioni abbondanti quelle in cui cadono almeno 20 mm di pioggia.

proiezioni riguardanti l'indice SPI-6 e SPI-12²¹, l'occorrenza dei periodi di siccità estrema è prevista in aumento in tutta Italia, con l'incremento più significativo nelle Isole Maggiori.

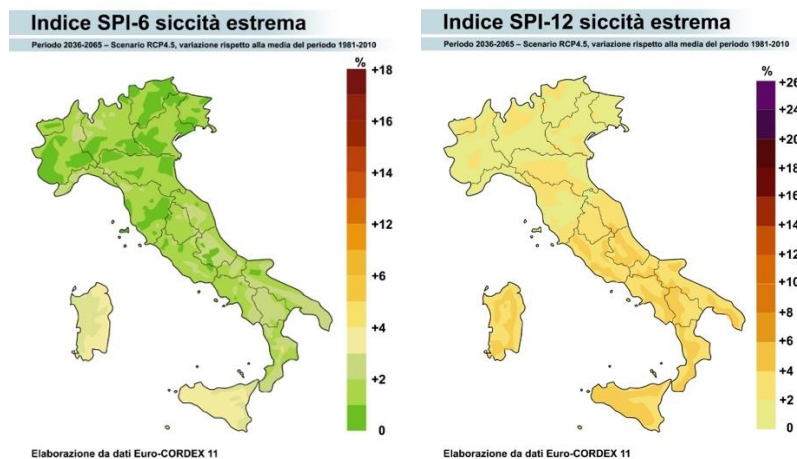


Figura 9: variazione percentuale dell'incidenza di periodi di siccità estrema nell'arco dei 6 e dei 12 mesi; proiezioni per la parte centrale del secolo (periodo 2036-2065) rispetto alla media trentennale di riferimento.

In sintesi, nei prossimi decenni in Italia sono probabili scenari climatici caratterizzati da:

- **Aumento delle temperature medie**, con conseguente incremento del numero, dell'intensità e della durata delle ondate di caldo intenso in estate, maggior frequenza di episodi di caldo fuori stagione in autunno e primavera e diminuzione della durata e dell'intensità dei periodi di freddo durante la stagione invernale;
- **Maggior variabilità delle precipitazioni**: a fronte di quantitativi totali annui delle precipitazioni che, tra alti e bassi, su base decennale mostreranno poche variazioni, aumenteranno le differenze, in termini di quantitativi di precipitazione, tra una stagione e l'altra, tra un anno e l'altro; con maggior facilità si alterneranno periodi molto piovosi ad altri caratterizzati dalla siccità.
- **Estremizzazione delle precipitazioni**: diventeranno più frequenti gli episodi di pioggia particolarmente intensa, per cui le precipitazioni tenderanno a concentrarsi in meno eventi, caratterizzati però da maggior intensità, con un inevitabile aumento del rischio di alluvioni improvvise (*flash floods*).

4. Effetti dei cambiamenti climatici sui consumi energetici

L'evoluzione del clima in Italia, caratterizzata da un aumento delle temperature medie e da una maggiore frequenza di eventi estremi, incide in maniera significativa sui profili di consumo energetico, sia a livello residenziale che industriale. Le dinamiche osservate e proiettate nei prossimi decenni delineano, quindi, uno spostamento strutturale della domanda

²¹ Lo SPI (Standardized Precipitation Index) è un indice che quantifica le anomalie di precipitazioni su diversi archi temporali e risulta molto utile nell'individuare i periodi di siccità, quelli cioè caratterizzati da importanti deficit precipitativi. Lo SPI-12 descrive le anomalie di precipitazione nell'arco dei 12 mesi, lo SPI-6 le anomalie nell'arco di 6 mesi.

di energia, con rilevanti implicazioni per la sicurezza del sistema elettrico e per la pianificazione delle infrastrutture. Il settore energetico rappresenta un sistema intrinsecamente vulnerabile agli effetti dei cambiamenti climatici e, al tempo stesso, è chiamato a garantire la fornitura di servizi che devono soddisfare requisiti di continuità e affidabilità sempre più elevati²².

4.1. Aumento della domanda di climatizzazione estiva e riduzione del riscaldamento invernale

Gli studi condotti da RSE S.p.A.²³ dimostrano come il progressivo aumento delle temperature riduca il numero dei gradi-giorno di riscaldamento (Heating Degree Days, HDD) e causi un aumento dei gradi-giorno di raffrescamento (Cooling Degree Days, CDD)²⁴. Le variazioni di temperatura e precipitazione delineate nello scenario di riferimento si traducono direttamente in un cambiamento dei modelli di consumo energetico. L'impatto più significativo si registra sulla domanda di climatizzazione degli edifici, con una duplice dinamica che influenza sia il riscaldamento invernale sia il raffrescamento estivo. Ciò significa che, da un lato, gli inverni richiederanno minori consumi energetici per il riscaldamento, soprattutto nelle regioni del Centro-Nord mentre, dall'altro, le estati vedranno un aumento consistente della domanda di energia elettrica per alimentare impianti di condizionamento e refrigerazione, soprattutto nelle aree urbane e nel Mezzogiorno²⁵.

Il cambiamento risulta particolarmente marcato nello scenario di medio termine al 2030, quando il fabbisogno di raffrescamento è previsto in forte crescita, anche in conseguenza della maggiore urbanizzazione e della diffusione capillare di apparecchiature di climatizzazione²⁶.

Il rapporto di ricerca elaborato da RSE nel 2015, dal titolo "*Impatti dei cambiamenti climatici sul sistema elettrico al 2030*", rappresenta uno dei primi tentativi sistematici di quantificare gli effetti dei cambiamenti climatici sul sistema energetico italiano in un orizzonte temporale di medio periodo. L'analisi è stata sviluppata integrando scenari climatici e modelli energetici, con l'obiettivo di stimare le ricadute sulla domanda di energia, sulla generazione elettrica e sul funzionamento del mercato.

La ricerca ha utilizzato scenari climatici elaborati nell'ambito dell'attività dell'IPCC (scenario A1B), confrontando un periodo di riferimento (1961–1990) con un periodo futuro (2021–2050). I risultati mostrano un aumento medio delle temperature di +1,5 °C in inverno e +2 °C in estate, accompagnato da una riduzione delle precipitazioni: -5% nei mesi invernali e -10% in quelli estivi. Tali variazioni causano una maggiore frequenza delle ondate di calore, periodi prolungati di siccità e una crescita del rischio associato a eventi meteorologici estremi come piogge torrenziali e improvvise alluvioni²⁷.

²² RSE (2015), Impatti dei cambiamenti climatici sul sistema elettrico al 2030, Rapporto RSE n. 15000205, p. 4.

²³ RSE s.p.a., Ricerca sul Sistema Energetico, è Società controllata dal Ministero dell'economia e delle Finanze attraverso GSE S.p.A. Link al sito della Società: <https://www.rse-web.it/>.

²⁴ RSE (2015), Impatti dei cambiamenti climatici sul sistema elettrico al 2030, Rapporto RSE n. 15000205, p. 10.

²⁵ Ivi, p.11.

²⁶ Ivi, pp. 19-21.

²⁷ Ivi, pp. 6 e 17.

Sul piano metodologico, lo studio ha fatto ricorso al modello multiregionale MONET, sviluppato da RSE per simulare la domanda e l'offerta di energia, e al simulatore del mercato elettrico s-MTSIM, utilizzato per valutare gli effetti sui prezzi e sulla sicurezza del sistema elettrico.

4.2. Effetti specifici sulla domanda di climatizzazione

Uno dei risultati più evidenti riguarda lo spostamento stagionale della domanda energetica. Da un lato, l'aumento delle temperature riduce il fabbisogno di riscaldamento, misurato attraverso gli HDD (Heating Degree Days), con una contrazione stimata intorno all'8% entro il 2030. Questo effetto comporta minori consumi energetici nei mesi invernali, soprattutto al Nord e nelle aree caratterizzate da climi relativamente più rigidi.

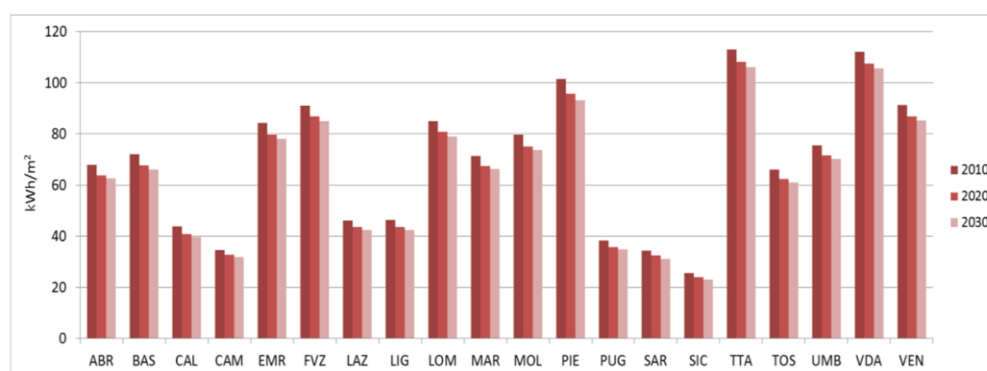


Figura 10. Variazione del fabbisogno unitario di riscaldamento. RSE (2015), *Impatti dei cambiamenti climatici sul sistema elettrico al 2030*, Rapporto RSE n. 15000205, p. 11.

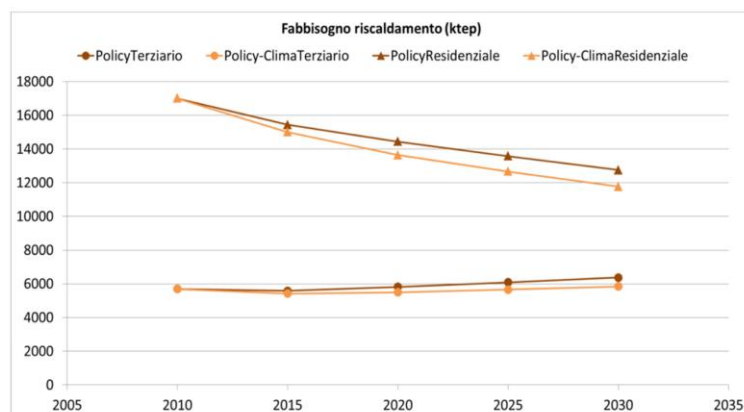


Figura 11. Variazione del fabbisogno di riscaldamento per effetto dei cambiamenti climatici (residenziale e terziario). Lo scenario base rappresenta l'andamento previsionale con le politiche attualmente in atto, mentre lo scenario "Clima" rappresenta un'accelerazione delle policy europee del Green Deal con un maggior sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili nel sistema elettrico e caratterizzato da una rilevante riduzione dei consumi energetici. RSE (2015), *Impatti dei cambiamenti climatici sul sistema elettrico al 2030*, Rapporto RSE n. 15000205, p. 19.

Dall'altro lato, però, si assiste anche a una forte crescita dei CDD (Cooling Degree Days), indice del fabbisogno di raffrescamento. Secondo le stime di RSE, entro il 2030 i consumi elettrici legati alla climatizzazione estiva potrebbero crescere del 40% nel settore

residenziale e del 30% nel terziario, anche a causa della crescente diffusione degli impianti di condizionamento. Questo fenomeno interessa in particolare le aree urbane e metropolitane, dove l'effetto “isola di calore”²⁸ amplifica ulteriormente la domanda di raffrescamento.

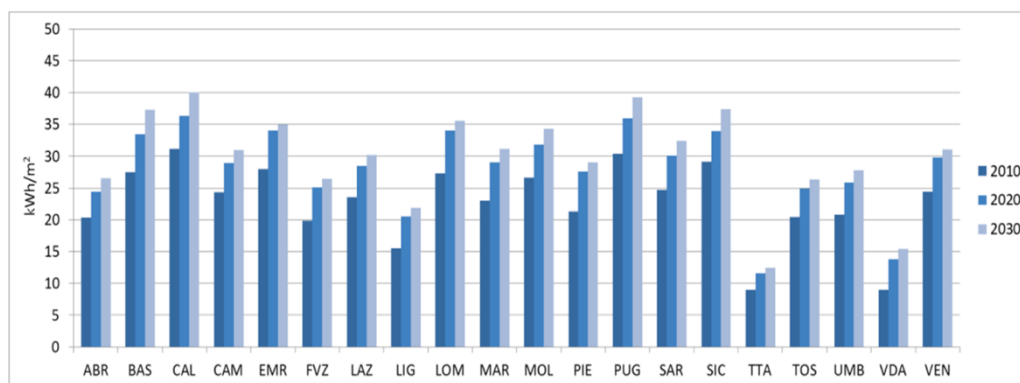


Figura 11. Variazione del fabbisogno termico unitario di raffrescamento. RSE (2015), *Impatti dei cambiamenti climatici sul sistema elettrico al 2030*, Rapporto RSE n. 15000205, p. 16.

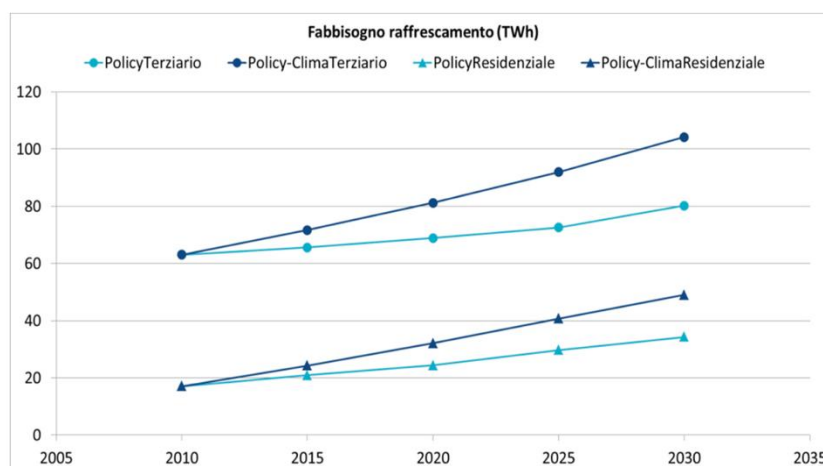


Figura 12. Variazione del fabbisogno di raffrescamento per effetto dei cambiamenti climatici (residenziale e terziario). Lo scenario base rappresenta l'andamento previsionale con le politiche attualmente in atto, mentre lo scenario “Clima” rappresenta un'accelerazione delle policy europee del Green Deal con un maggior sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili nel sistema elettrico e caratterizzato da una rilevante riduzione dei consumi energetici (RSE (2015), *Impatti dei cambiamenti climatici sul sistema elettrico al 2030*, Rapporto RSE n. 15000205, p. 19).

4.3 Impatti sui consumi finali e sui picchi di domanda

Complessivamente, lo studio prevede un incremento dei consumi elettrici finali pari a 14 TWh al 2030 attribuibile direttamente agli effetti del cambiamento climatico. La

²⁸ Nelle grandi aree urbane, caratterizzate da materiali che nell'assorbire la radiazione solare aumentano la loro temperatura assai più rapidamente di campi e aree boschive, gli strati atmosferici più bassi si riscaldano in misura maggiore che nelle zone rurali circostanti, dando vita a quella che è nota come *isola di calore urbana*.

stagionalità tradizionale, che vedeva il picco dei consumi nei mesi invernali, viene progressivamente sostituita da una stagionalità estiva, con un aumento del picco massimo di carico stimato in circa +4 GW²⁹.

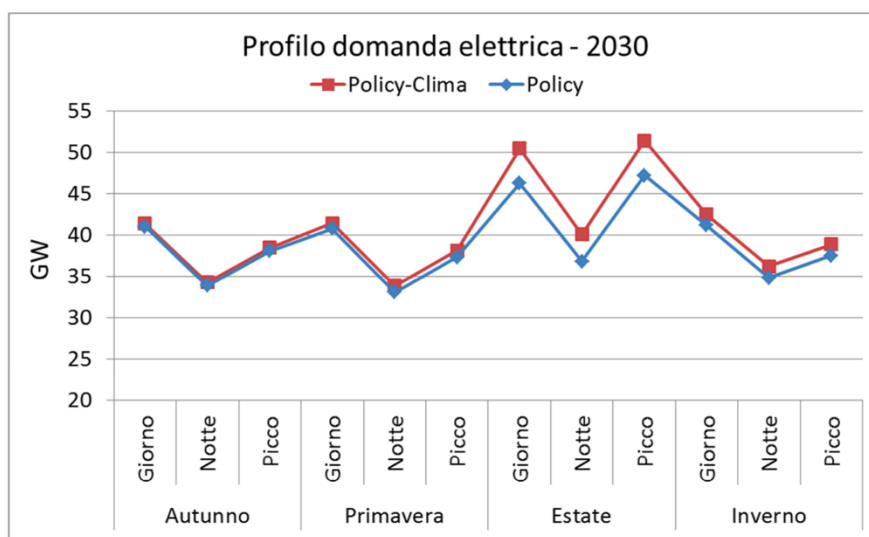


Figura 13. Profilo stagionale della potenza richiesta nel 2030. Lo scenario base rappresenta l'andamento previsionale con le politiche attualmente in atto, mentre lo scenario "Clima" rappresenta un'accelerazione delle policy europee del Green Deal con un maggior sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili nel sistema elettrico e da una rilevante riduzione dei consumi energetici (RSE (2015), *Impatti dei cambiamenti climatici sul sistema elettrico al 2030*, Rapporto RSE n. 15000205, p. 21).

Questa trasformazione comporta implicazioni significative per la gestione del sistema elettrico: la maggiore concentrazione di domanda nelle ore centrali estive, associate alla ridotta efficienza di alcune tecnologie di generazione, aumenta i rischi di congestione della rete e di *stress* infrastrutturale.

4.4. Conseguenze economiche e di mercato

L'aumento della domanda estiva e le difficoltà produttive legate a condizioni climatiche avverse si riflettono anche sui mercati energetici. Secondo il modello sviluppato da RSE, il Prezzo Unico Nazionale (PUN) potrebbe aumentare, a causa dell'aumento della domanda di elettricità, in media di +3 €/MWh al 2030, con punte mensili di +6–7 €/MWh nei mesi di luglio e agosto³⁰.

²⁹ RSE (2015), *Impatti dei cambiamenti climatici sul sistema elettrico al 2030*, Rapporto RSE n. 15000205, p. 20.

³⁰ RSE (2015), *Impatti dei cambiamenti climatici sul sistema elettrico al 2030*, cit., p. 25.

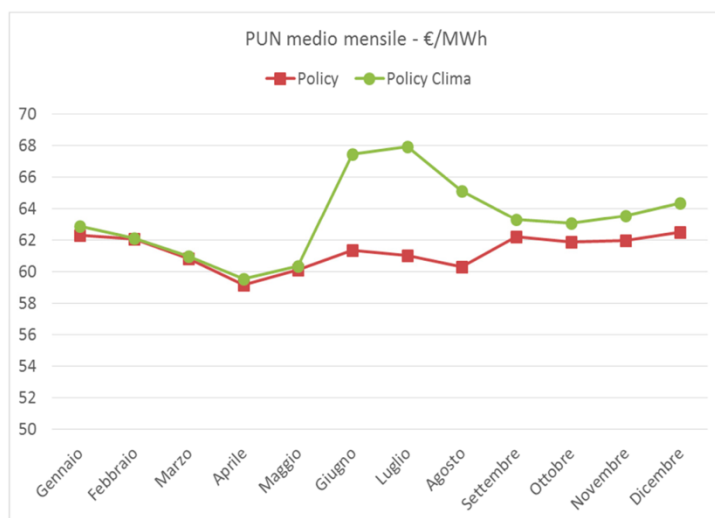


Figura 14. Profilo dei prezzi medi mensili (PUN medio) per il 2030 nei due scenari Policy e Policy Klima. Lo scenario base rappresenta l'andamento previsionale con le politiche attualmente in atto, mentre lo scenario "Clima" rappresenta un'accelerazione delle policy europee del Green Deal con un maggior sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili nel sistema elettrico e da una rilevante riduzione dei consumi energetici (RSE (2015), *Impatti dei cambiamenti climatici sul sistema elettrico al 2030*, Rapporto RSE n. 15000205, p. 25).

Questa dinamica accresce i rischi di povertà energetica estiva, soprattutto nelle fasce più vulnerabili della popolazione, e pone nuove sfide per la competitività del sistema industriale, chiamato a sostenere costi maggiori proprio nei mesi in cui la produttività può essere maggiormente limitata dalle condizioni climatiche.

4.5. Impatti sui consumi residenziali e industriali

La domanda di energia elettrica nel settore residenziale è destinata a essere trainata dall'uso di impianti di raffrescamento, con picchi di prelievo concentrati nelle ore centrali della giornata estiva. Per il settore industriale, oltre all'aumento dei consumi per climatizzazione degli ambienti di lavoro, sono attesi effetti indiretti legati alla necessità di raffreddamento di impianti e processi produttivi, soprattutto nei comparti ad alta intensità energetica.

Secondo Terna³¹, la progressiva elettrificazione dei consumi, connessa anche agli obiettivi del *Green Deal* e del pacchetto *Fit-for-55*, contribuirà ad amplificare questi trend, determinando un incremento complessivo della domanda elettrica nazionale, per la quale si stima una crescita significativa già nel periodo 2023-2030.

³¹ Terna S.p.A. (2025), *Informativa sul cambiamento climatico (2025)* pp. 4-6.

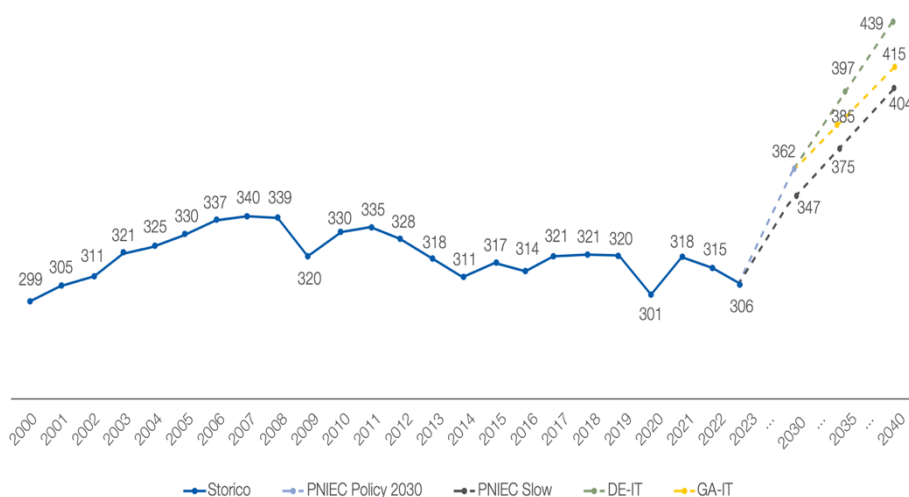


Figura 15. Evoluzione storica e prospettica del fabbisogno elettrico italiano (TWh). Fonte Terna s.p.a.

5. L'impatto del cambiamento climatico sulla produzione energetica

L'impatto dei cambiamenti climatici sul sistema produttivo energetico nazionale è profondo e differenziato per tipologia di fonte. Le proiezioni disponibili indicano una crescente vulnerabilità delle fonti rinnovabili e convenzionali, con ricadute sulla stabilità del sistema e sull'adeguatezza delle risorse³².

5.1. Fonti rinnovabili

5.1.1. Variazioni della risorsa eolica e idrica

La produzione di energia eolica nel nostro Paese è, per sua natura, influenzata dalle variazioni dei regimi atmosferici associate ai cambiamenti climatici. Sulla base dei modelli Euro-CORDEX, RSE ha condotto studi che evidenziano come, nello scenario ritenuto più probabile, la producibilità annua dell'energia eolica sia destinata a diminuire, in particolare nel medio-lungo termine (2050-2100), con effetti più significativi nelle regioni costiere adriatiche e nelle aree meridionali³³.

³² Terna S.p.A. (2025), Informativa sul Cambiamento Climatico. Roma: Terna S.p.A.

³³ Bonanno, R., Viterbo, F., & Braca, G. M. (2023). Climate change impacts on wind power generation for the Italian peninsula. *Regional Environmental Change*, 23:15.

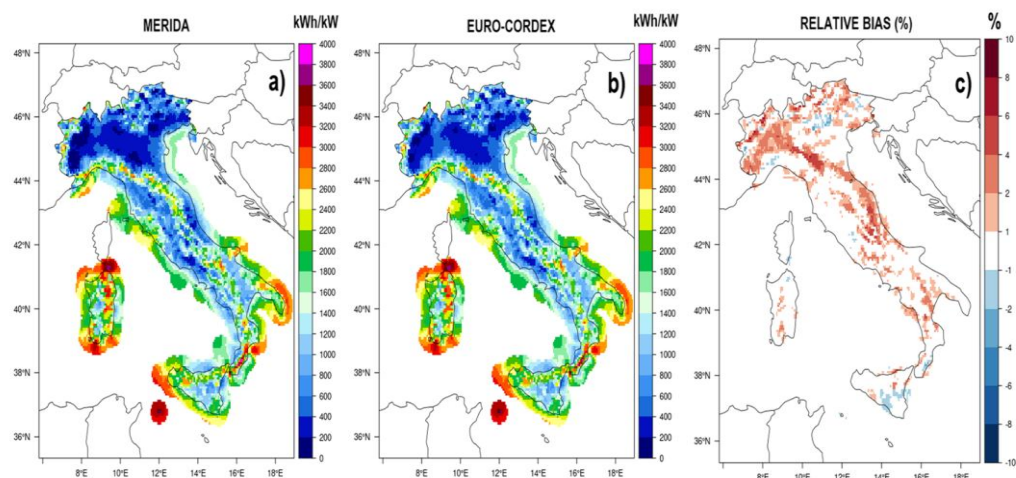


Figura 16. Scenari di Variazione della producibilità eolica nel contesto italiano (Bonanno, R., Viterbo, F., & Braca, G. M. (2023), Climate change impacts on wind power generation for the Italian peninsula. Regional Environmental Change, p. 3).

Al contrario, lo scenario ritenuto meno probabile prospetta impatti più contenuti, con possibili incrementi della ventosità primaverile in aree specifiche. In ogni caso, poiché la variabilità climatica è destinata ad aumentare, si rende necessario un adeguamento delle strategie di pianificazione eolica, con particolare attenzione ai progetti *off-shore*, generalmente considerati più resilienti agli effetti dei cambiamenti climatici³⁴.

Gli studi concernenti il comparto idroelettrico – che attualmente rappresenta circa il 33% della capacità rinnovabile installata a livello nazionale – mostrano una significativa eterogeneità nella risposta ai mutamenti climatici su base territoriale. In particolare, secondo lo scenario più severo, nelle regioni meridionali potrebbero verificarsi diminuzioni fino al 30% del potenziale produttivo. Viceversa, le aree alpine del Nord potrebbero mantenere livelli stabili o registrare lievi incrementi di portata invernale. La crescente complessità del quadro delineato rende indispensabile il rafforzamento delle politiche di gestione integrata delle risorse idriche, nonché lo sviluppo degli impianti di pompaggio idroelettrico, destinati

³⁴ R. Bonanno, F. Viterbo, G. M. Braca (2023), Climate change impacts on wind power generation for the Italian peninsula. Regional Environmental Change.

a svolgere un ruolo chiave nella flessibilità e nella capacità di accumulo del sistema energetico³⁵.

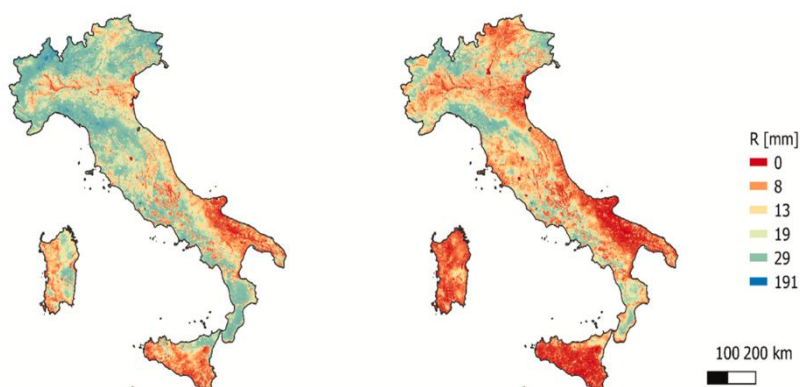


Figura 17. Distribuzione spaziale della risorsa idrica prevista per la fine del secolo. A sinistra lo scenario più piovoso e a destra lo scenario più secco (Amaranto, A., Mancusi, L., Viterbo, F., Bonanno, R., Braca, G., & Garofalo, E. (2025). Unravelling the uncertainties in the climate–water–energy interplay: A distributed analysis of the Italian territory. *Renewable Energy*, 246).

Sia nel nostro Paese sia, più in generale, a livello europeo, uno dei principali fattori di criticità per il settore della produzione di energia da fonte idrica è rappresentato dalla crescente carenza della risorsa. Con particolare riferimento all'anno 2022, la produzione di energia idroelettrica ha, infatti, registrato una significativa contrazione in Europa pari a circa **66 TWh** rispetto al 2021 (-19%), con riduzioni particolarmente accentuate in **Italia, Francia e Spagna**³⁶. Con particolare riguardo al nostro Paese, si è osservata una contrazione **di 17 TWh**, pari al **38%** rispetto all'anno precedente, attestandosi su valori analoghi a quelli registrati negli anni Cinquanta, quando però la capacità installata era circa un terzo di quella attuale. Di conseguenza, nel 2022 l'idroelettrico ha contribuito solamente per circa il 10% alla produzione elettrica complessiva, a fronte di una media storica compresa tra il 15% e il 20%.

L'andamento negativo della produzione di energia da fonte idroelettrica non è tuttavia attribuibile esclusivamente agli episodi di siccità. Vi concorrono, infatti, ulteriori fattori strutturali, tra cui la crescente competizione tra gli usi civili, agricoli ed energetici della risorsa idrica, nonché la progressiva obsolescenza degli impianti, che hanno lavorato mediamente per **1.500 ore/anno**, pari a circa un terzo del potenziale storico. Nonostante i problemi accennati, il settore idroelettrico rimane essenziale ai fini della realizzazione della transizione energetica, in virtù di importanti caratteristiche che lo connotano, quali la **flessibilità e la sicurezza operativa** che consentono di stabilizzare la rete elettrica e di compensare la variabilità di fonti rinnovabili non programmabili, quali l'eolico e il fotovoltaico.

³⁵ Terna S.p.A. (2024). National Resource Adequacy Assessment for Italy 2024. Roma: Terna S.p.A.

³⁶ RSE – Ricerca sul Sistema Energetico (2015). Impatti dei cambiamenti climatici sul sistema elettrico al 2030 (Rapporto n. 15000205). Milano: RSE S.p.A.

Sul punto, è possibile menzionare uno studio realizzato da The European House – Ambrosetti nel 2023³⁷, secondo il quale, valorizzando alcune **linee prioritarie di investimento**, sarebbe possibile contemporaneamente opporsi agli effetti del cambiamento climatico e recuperare fino a **12,5 TWh** di produzione annua. In particolare, si propone un mix di interventi, che vanno dalla realizzazione di nuovi sistemi di **pompaggio idroelettrico** mediante l'utilizzo di invasi esistenti (3,2 GW, 8 miliardi di euro di investimento), alla valorizzazione energetica dei **rilasci irrigui** (350 MW, 850 milioni di euro, incremento +1 TWh), al revamping degli **impianti esistenti** (1,6 GW, 560 milioni di euro, +4 TWh), allo sviluppo di nuovi impianti **mini-idroelettrici** (<3 MW, 700 MW, 2,8 miliardi di euro, +1,8 TWh), nonché alla realizzazione di nuovi **bacini di regolazione** per l'uso energetico delle portate fluviali (+3,7 TWh, 3 miliardi di euro). A completamento dei nodi sui quali ci si è soffermati, si evidenzia la crescente rilevanza della gestione dei flussi idrici e delle infrastrutture di stoccaggio. Con l'aumento degli eventi meteorologici estremi – si pensi al riguardo ad alluvioni e piene improvvise, che mettono a rischio la stabilità strutturale degli impianti e la continuità della produzione – assume un ruolo centrale l'attività di regolazione. In tale contesto, gli invasi alpini, se adeguatamente gestiti, possono svolgere un ruolo cruciale come bacini di regolazione, contribuendo a compensare la minore disponibilità idrica dei mesi estivi.

L'analisi degli scenari climatici evidenzia una marcata diversificazione degli effetti a seconda dei territori considerati. In particolare, le aree settentrionali – nelle quali è localizzata oltre l'80% della capacità idroelettrica installata – risultano caratterizzate da una certa resilienza: in alcuni scenari si prevede persino un lieve incremento della produzione, grazie a un aumento delle precipitazioni invernali e alla più rapida fusione del manto nevoso. Al contrario, il Sud e le Isole presentano una maggiore vulnerabilità, con riduzioni fino al **30% della producibilità idroelettrica entro fine secolo** negli scenari climatici più severi. A livello nazionale la produzione potrebbe mantenersi stabile negli scenari di mitigazione più efficace, mentre lo scenario climatico peggiore³⁸ prefigura una contrazione che potrebbe attestarsi al **-12% entro fine secolo**, con punte di **-30% nei mesi estivi**.

L'esperienza degli ultimi anni conferma in modo concreto tali dinamiche. L'eccezionale siccità che ha interessato il Paese nel 2022 ha, infatti, determinato un marcato ridimensionamento della produzione idroelettrica nazionale, che ha fatto registrare un calo del 36% rispetto al 2021 confermando la forte esposizione del settore ai deficit idrici³⁹.

Discorso a parte merita invece il comparto del solare fotovoltaico che presenta un quadro complesso e articolato. Da un lato gli scenari climatici prospettano un incremento della radiazione solare in alcune aree, dall'altro tale potenziale beneficio risulta in larga parte compensato dagli effetti negativi dell'innalzamento delle temperature sull'efficienza dei moduli. Sul punto appaiono rilevanti le indicazioni reperibili in un recente studio, nel quale

³⁷ The European House – Ambrosetti (2023), *Idroelettrico: un'infrastruttura strategica per l'Italia. Il ruolo strategico dell'idroelettrico per la sicurezza energetica, la transizione ecologica e la gestione sostenibile delle risorse idriche*, Edizione 2023.

³⁸ Amaranto, A., Mancusi, L., Viterbo, F., Bonanno, R., Braca, G., Garofalo, E. (2025). Unravelling the uncertainties in the climate-water-energy interplay: A distributed analysis of the Italian territory. *Renewable Energy*.

³⁹ A. Amaranto, L. Mancusi, F. Viterbo, R. Bonanno, G. Braca, E. Garofalo. (2025). Unravelling the uncertainties in the climate–water–energy interplay: A distributed analysis of the Italian territory. *Renewable Energy*, 246.

– sulla base degli scenari climatici Euro-CORDEX, corretti attraverso dataset satellitari e rianalisi meteorologiche nazionali – si evidenzia la significativa variabilità della produzione energetica derivante dagli effetti congiunti del maggiore irraggiamento solare e dell'incremento delle temperature⁴⁰. La situazione derivante dalle premesse appena illustrate, peraltro, è connotata da una marcata **eterogeneità territoriale**. Nelle regioni alpine le proiezioni climatiche più severe delineano un decremento sostanziale dell'output energetico, che potrebbe giungere fino a circa l'8% entro il 2100. In tali aree la riduzione del manto nevoso e, conseguentemente, della componente riflessa della radiazione solare, unitamente a temperature estive particolarmente elevate, annullerebbe i benefici derivanti dall'incremento dell'irraggiamento. Una situazione differente si osserva lungo l'Appennino e nel Sud Italia, dove l'aumento della radiazione potrebbe in parte compensare gli effetti negativi dell'innalzamento termico, determinando variazioni complessive più contenute e, in alcuni casi, persino lievi incrementi della produzione (+1-2%).

L'analisi condotta con riferimento alle singole stagioni conduce a una conferma dei risultati appena richiamati. Secondo lo scenario più pessimistico, infatti, la produzione di energia da fonte fotovoltaica registrerà una significativa diminuzione in inverno, con una riduzione fino a -5%, a fronte di una situazione estiva nella quale gli effetti del maggiore irraggiamento saranno almeno in parte neutralizzati dal calo di efficienza dei moduli, stimato in circa -0,5% per ogni grado centigrado aggiuntivo. Negli scenari intermedi, gli impatti risultano più limitati e concentrati soprattutto nelle aree alpine, mentre sul resto del territorio nazionale la produzione rimane sostanzialmente stabile.

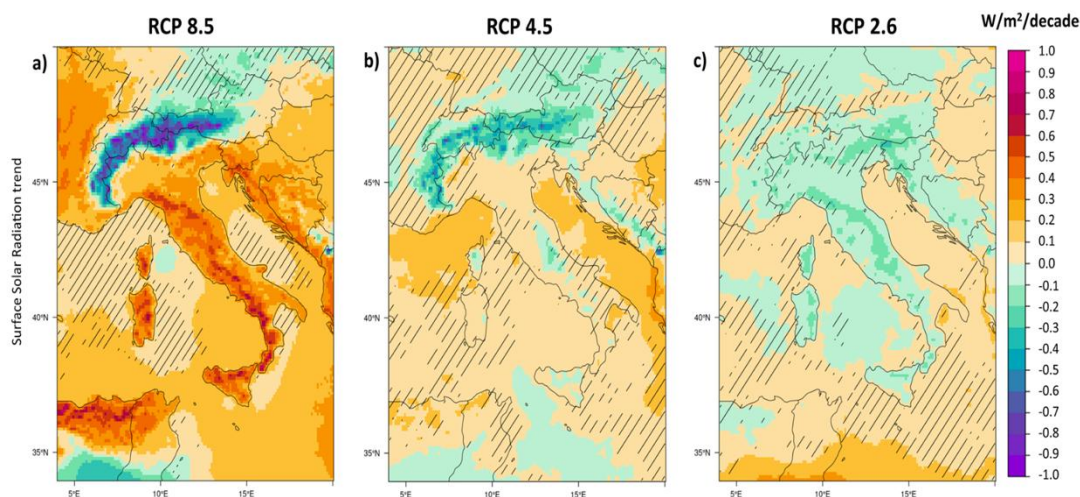


Figura 18. Scenari di produzione di energia solare fotovoltaica in ordine di severità (Bonanno, R., & Collino, E. (2025). Assessing the impact of climate change on solar energy production in Italy. *Regional Environmental Change*, 25:78).

⁴⁰ Bonanno, R., & Collino, E. (2025). Assessing the impact of climate change on solar energy production in Italy. *Regional Environmental Change*.

In un'ottica di pianificazione energetica, gli elementi sopra descritti suggeriscono che, su scala nazionale, il fotovoltaico si conferma tra le fonti rinnovabili relativamente meno vulnerabili agli impatti del cambiamento climatico. In particolare, le sue performance superano significativamente, in termini di resilienza, quelle dell'idroelettrico e dell'eolico. Nel complesso, l'attuale localizzazione della capacità installata non sembra esporre il sistema a rischi significativi per il raggiungimento degli obiettivi di transizione energetica. Persistono tuttavia aree di vulnerabilità, in particolare nelle zone alpine e montane, in cui lo sviluppo di impianti di grande dimensione potrebbe risultare meno sostenibile nel tempo. Ciò dovrebbe dunque essere considerato al momento della pianificazione delle risorse energetiche.

Dallo studio sopracitato emerge come, attualmente, siano disponibili diverse soluzioni tecnologiche in grado di **mitigare gli effetti negativi delle alte temperature**. È possibile menzionare, al riguardo, i **moduli bifacciali**, che sono in grado di incrementare l'efficienza fino al 35% grazie allo sfruttamento della radiazione riflessa, nonché l'impiego di **sistemi di inseguimento solare (*tracking*)**, capaci di aumentare la produzione dal 15 al 50% rispetto ai moduli fissi. A questi si aggiunge la realizzazione di tecniche di **raffreddamento passivo o attivo** dei pannelli, particolarmente efficaci nei climi più caldi.

In sintesi, le evidenze reperibili nel contributo *de quo*, suffragano la tesi secondo la quale, nonostante scenari climatici avversi, il solare fotovoltaico conserva un ruolo strategico nella transizione energetica nazionale, anche in ragione di una resilienza comparativamente maggiore rispetto alle principali alternative, anche se per sfruttarne al massimo le potenzialità bisognerà necessariamente intraprendere la strada dell'innovazione tecnologica, anche in considerazione delle specificità territoriali, così da prevenire riduzioni nelle prestazioni e salvaguardare la stabilità produttiva a lungo termine.

Ancora a parte sono le considerazioni che devono essere proposte con riferimento alle biomasse, le quali sono caratterizzate da una peculiare esposizione agli effetti del mutamento climatico. Per approfondire il tema è possibile riferirsi al già citato studio condotto da RSE nel 2015⁴¹, dal quale emerge che i fenomeni siccitosi particolarmente prolungati (ormai frequenti nell'area mediterranea) sono in grado di avere effetti negativi significativi sulla disponibilità di risorse agricole e forestali. Quando la risorsa idrica è scarsa, infatti, si registra una diminuzione della efficienza produttiva e della biomassa disponibile per utilizzo a fini energetici.

Al riguardo, merita di essere evidenziato come stime aggiornate al 2023 indichino una probabile riduzione media della disponibilità di biomateriali di origine agricola e forestale compresa tra il 5 e l'8% rispetto a uno scenario di clima stabilizzato. In presenza di annate caratterizzate da condizioni di siccità, tali valori potrebbero ulteriormente accentuarsi, raggiungendo una contrazione stimata tra il 10% e il 15%. Con riferimento alle biomasse dedicate, le riduzioni risultano potenzialmente ancora più marcate, fino a valori compresi tra il 20% e il 30% in caso di estati particolarmente secche, soprattutto nelle aree della Pianura Padana e del Mezzogiorno. In situazioni climatiche estreme, caratterizzate da eventi siccitosi e incendi, la diminuzione della disponibilità di biomassa a fini energetici può, inoltre, arrivare localmente fino al 30-40%. A tali dinamiche si affiancano ulteriori elementi di criticità. In particolare, la perdita quantitativa di biomassa è aggravata dall'incremento del rischio di incendi boschivi, fenomeno notoriamente più frequente nei periodi prolungati di siccità e

⁴¹ RSE – Ricerca sul Sistema Energetico (2015). Impatti dei cambiamenti climatici sul sistema elettrico al 2030 (Rapporto n. 15000205). Milano: RSE S.p.A.

alte temperature. Gli incendi, peraltro, non incidono esclusivamente sulla disponibilità della risorsa, ma possono compromettere la sostenibilità ambientale delle filiere bioenergetiche, esercitando un impatto negativo sui bilanci di carbonio a cui tali filiere concorrono.

Gli aspetti problematici riscontrati nello studio di RSE inducono a ritenere che le biomasse, quali fonte di produzione energetica, siano meno stabili rispetto ad altre energie rinnovabili. In tale contesto, secondo la ricerca citata sarà necessario accompagnare la produzione di energia da biomasse con pratiche agricole sostenibili, modelli di gestione del patrimonio forestale improntati alla resilienza e politiche volte alla prevenzione della formazione di incendi.

5.2 Fonti convenzionali. Termoelettrico e nucleare: efficienza decrescente per temperature elevate.

Le centrali termoelettriche a ciclo combinato (CCGT) risultano particolarmente sensibili all'aumento delle temperature estive: la riduzione dell'efficienza può raggiungere l'1-1,5% nei periodi più caldi, compromettendo la capacità produttiva proprio nei momenti di picco della domanda, in quanto i cicli termodinamici hanno bisogno di una sorgente fredda.⁴²

Un ulteriore fattore critico riguarda la disponibilità di acqua per il raffreddamento: le ondate di calore e le siccità compromettono i prelievi idrici, costringendo talvolta alla riduzione o all'interruzione della produzione, come già osservato in impianti europei durante estati particolarmente calde.

Le principali vulnerabilità ai cambiamenti climatici analizzate, che possono manifestarsi in concomitanza dei picchi di consumi elettrici (tipicamente nella stagione estiva), sono:

1. la riduzione della capacità e del rendimento degli impianti termoelettrici (turbogas e cicli combinati) in condizioni di temperature elevate dell'aria;
2. la ridotta disponibilità degli impianti termoelettrici localizzati sui fiumi in situazioni di secca, per carenza di acqua di raffreddamento;
3. la diversa disponibilità delle risorse idriche nei periodi siccitosi.

Il nucleare, sebbene ad oggi non presente in Italia, rappresenta comunque una fonte rilevante nei sistemi energetici europei interconnessi: anch'esso è soggetto alle stesse criticità di raffreddamento e può influenzare l'affidabilità delle importazioni nei periodi estivi.⁴³

6. Rischi climatici per le infrastrutture energetiche e resilienza della rete

Negli ultimi anni, l'evoluzione del clima in Italia e in Europa ha mostrato una tendenza verso un aumento della frequenza, dell'intensità e della durata degli eventi meteorologici estremi, con impatti crescenti sul sistema energetico nazionale. Le condizioni meteo-climatiche estreme non costituiscono più fenomeni isolati o eccezionali, ma rappresentano ormai una componente strutturale del contesto operativo in cui si trova a funzionare la rete elettrica.

In particolare, il sistema elettrico italiano, per la sua configurazione geografica e infrastrutturale, risulta esposto a una pluralità di minacce meteo-climatiche che agiscono con

⁴² RSE – Ricerca sul Sistema Energetico (2015). Impatti dei cambiamenti climatici sul sistema elettrico al 2030 (Rapporto n. 15000205). Milano: RSE S.p.A.

⁴³ Gaudioso, D. (2009). Impatti dei cambiamenti climatici sul settore energetico. EAI – Energia, Ambiente e Innovazione, ISPRA.

modalità e tempistiche differenti, ma che nel complesso contribuiscono a ridurre la sicurezza, la continuità e l'affidabilità dell'approvvigionamento. Gli eventi estremi hanno, infatti, la duplice capacità di incidere sia sul lato della domanda di energia, modificandone i profili stagionali e orari, sia su quello dell'offerta, compromettendo la capacità produttiva e la stabilità delle infrastrutture di trasmissione e distribuzione.

6.1. Eventi estremi: ondate di calore, inondazioni, siccità, incendi, tempeste⁴⁴

Tra i fenomeni più rilevanti per il sistema energetico italiano si collocano le **ondate di calore**, le **siccità prolungate**, le **piogge intense** e le **alluvioni**, gli **incendi boschivi** e le **tempeste di vento**.

6.1.1. Ondate di calore

Le ondate di calore, sempre più frequenti e durature, rappresentano uno degli elementi di maggiore criticità. Esse producono un duplice effetto: da un lato **accrescono in modo significativo il fabbisogno di raffrescamento**, in particolare nel settore residenziale e terziario, generando picchi di domanda elettrica concentrati nelle ore centrali della giornata; dall'altro **riducono l'efficienza e la capacità produttiva** di molte tecnologie di generazione, soprattutto dei cicli combinati e degli impianti termoelettrici, la cui resa decresce sensibilmente con l'aumento delle temperature dell'aria e dell'acqua utilizzata per il raffreddamento.

Nei periodi di caldo intenso, il sistema elettrico è dunque sottoposto a una **pressione simultanea**: mentre la domanda cresce rapidamente, la capacità disponibile tende a diminuire. A ciò si aggiunge la riduzione della **portata dei conduttori elettrici** che, in condizioni di alte temperature può diminuire fino al 7-10% nei mesi estivi, riducendo la capacità di trasmissione delle linee e incrementando il rischio di sovraccarichi.

6.1.2. Inondazioni e precipitazioni intense

All'estremo opposto, eventi meteorologici caratterizzati da precipitazioni violente, alluvioni improvvise e smottamenti possono determinare danni fisici diretti alle infrastrutture energetiche. Le centrali idroelettriche, situate spesso in aree montane o vallive, risultano esposte a fenomeni di piena che possono compromettere le opere di presa, le condotte forzate e i bacini di accumulo. Le linee di trasmissione ad alta tensione e le cabine primarie, quando collocate in zone a rischio idraulico, possono subire allagamenti, interruzioni o crolli strutturali, con effetti a catena sulla continuità del servizio.

Le piogge intense, inoltre, incidono indirettamente sulla stabilità dei terreni e dei versanti, aumentando il rischio di frane e movimenti di massa che possono danneggiare i tracciati delle linee elettriche o rendere inaccessibili interi tratti di rete. Gli operatori, in questi casi, devono affrontare non solo la riparazione del danno fisico, ma anche le difficoltà logistiche legate al raggiungimento dei siti compromessi, con conseguenti ritardi nei tempi di ripristino e un aumento dei costi di manutenzione straordinaria.

6.1.3. Siccità prolungate

La siccità rappresenta una delle minacce più insidiose e strutturali, in quanto agisce nel medio-lungo periodo riducendo progressivamente la disponibilità di risorsa idrica e

⁴⁴ Terna (2025). Informativa sul Cambiamento Climatico 2025.

compromettendo la produzione idroelettrica, che in Italia rappresenta ancora una quota significativa della capacità rinnovabile installata. La scarsità d'acqua non solo riduce i volumi utili per la generazione, ma determina una competizione crescente tra usi civili, agricoli ed energetici, con inevitabili ripercussioni sui tempi di invaso, sulla gestione dei rilasci e sulla sicurezza idraulica dei territori.

Oltre a influire sulla produzione idroelettrica, la siccità incide anche sul funzionamento delle centrali termoelettriche e di altri impianti che impiegano acqua per il raffreddamento, obbligando talvolta a limitazioni o sospensioni temporanee della produzione nei periodi più critici. L'effetto combinato di carenza idrica e alte temperature determina dunque una condizione di vulnerabilità diffusa, che richiede una pianificazione integrata delle risorse idriche e un aggiornamento dei criteri di gestione dei bacini di regolazione.

6.1.4. Incendi boschivi

Gli **incendi boschivi**, la cui frequenza è aumentata sensibilmente nel bacino mediterraneo negli ultimi anni, costituiscono una minaccia diretta alle infrastrutture energetiche. Le alte temperature, la siccità e la ventilazione favoriscono lo sviluppo di roghi estesi che possono coinvolgere **elettrodotti, cabine e sottostazioni**, determinando interruzioni di servizio e danni alle strutture portanti dei tralicci. Gli incendi provocano, inoltre, la perdita di vegetazione, alterando il microclima locale e riducendo la stabilità dei suoli, con ulteriori rischi per la rete.

Oltre al danno immediato, gli incendi comportano **elevati costi di ripristino** e tempi di fermo prolungati, poiché gli operatori devono attendere la messa in sicurezza delle aree prima di intervenire. Le regioni meridionali e insulari (in particolare Sicilia, Sardegna e Calabria) risultano particolarmente vulnerabili a questo tipo di rischio, che tende a sommarsi ad altri fattori di stress climatico come la siccità e le ondate di calore.

6.1.5. Tempeste e vento forte

Le **tempeste di vento, grandine o neve umida** costituiscono un'ulteriore categoria di eventi estremi in grado di compromettere il funzionamento delle infrastrutture di rete. In particolare, le **linee aeree ad alta tensione** e le **pale eoliche** possono subire danni meccanici significativi, con rotture, inclinazioni dei sostegni o cortocircuiti da contatto tra conduttori. Anche la caduta di alberi o detriti sui cavi rappresenta una delle principali cause di interruzione del servizio elettrico.

Gli episodi di vento intenso, in crescita soprattutto nel Nord Italia e lungo le coste della Penisola, comportano, inoltre, rischi per i **cavi sottomarini** e le **interconnessioni offshore**, esposte a sollecitazioni idrodinamiche e marine sempre più violente.

Questi fattori non agiscono isolatamente, ma spesso in combinazione, amplificando gli impatti e determinando vulnerabilità sistemiche.

6.2 Vulnerabilità delle reti e rischio blackout

L'aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi meteorologici estremi, insieme alla trasformazione strutturale del sistema elettrico verso una maggiore penetrazione delle fonti rinnovabili variabili, sta rendendo la rete di trasmissione italiana **sempre più vulnerabile**. La rete, per sua natura estesa e interconnessa, è infatti esposta a molteplici fattori di rischio, che possono incidere in modo simultaneo: il surriscaldamento dei conduttori, l'indisponibilità di alcune centrali durante i picchi di domanda, le interruzioni

dovute a fenomeni idrogeologici o incendi, e infine la difficoltà di ripristino in aree montane o insulari.

Secondo le analisi di Terna e RSE, le reti elettriche italiane mostrano un incremento costante dei casi di stress operativo legati al clima. Come già evidenziato nelle sezioni precedenti, il dato più significativo riguarda l'aumento dei picchi di domanda elettrica nelle ore centrali estive, che ha fatto registrare, nel 2024, valori di carico massimo superiori ai precedenti record in quasi tutte le aree del Paese. Parallelamente, l'aumento delle temperature medie estive riduce la capacità di trasporto delle linee – stimata tra il 7% e il 10% – aggravando il rischio di congestioni e sovraccarichi in corrispondenza delle giornate più calde.

Si aggiungono, come già evidenziato, le criticità sul lato dell'offerta: le alte temperature compromettono l'efficienza delle centrali termoelettriche a ciclo combinato, la disponibilità di acqua per il raffreddamento, mentre la produzione da idroelettrico tende a calare, sia per la scarsità di precipitazioni che per la ridotta portata dei bacini, proprio nei mesi in cui la domanda elettrica raggiunge il picco. L'effetto combinato di questi fattori produce un disallineamento crescente tra domanda e offerta, aumentando la vulnerabilità complessiva del sistema.

La configurazione geografica del territorio italiano amplifica ulteriormente questa fragilità, in particolare quella delle reti aeree ad alta tensione, esposte in aree alpine, appenniniche e insulari a fenomeni meteorologici estremi che possono danneggiare tralicci e conduttori, e generare guasti multipli con effetti a cascata. L'orografia complessa e la frammentazione dei centri abitati rendono, inoltre, più difficili le operazioni di riparazione, prolungando i tempi di ripristino e aumentando i relativi costi di manutenzione straordinaria.

La **Relazione annuale 2025 di ARERA**⁴⁵ fornisce dati concreti su questo trend: nel periodo 2020-2024 circa il **42% dei minuti medi annui di interruzione del servizio** è stato attribuito a cause meteorologiche e climatiche. In altre parole, quasi la metà delle interruzioni della fornitura elettrica in Italia è oggi riconducibile, direttamente o indirettamente, a fenomeni meteo-climatici estremi. Questo dato evidenzia come i cambiamenti climatici non siano più un fattore marginale, ma un elemento strutturale della performance del sistema elettrico nazionale.

L'esperienza europea conferma queste tendenze. Nel 2021, la Penisola Iberica ha registrato un grave episodio di blackout dovuto alla combinazione di ondata di calore eccezionale e incendi boschivi che hanno compromesso più dorsali di trasmissione ad alta tensione, provocando una perdita di sincronismo e interruzioni diffuse in Spagna e Portogallo. L'evento ha spinto gli operatori continentali, riuniti in **ENTSO-E European Network of Transmission System Operators for Electricity**, a rafforzare i meccanismi di coordinamento transfrontaliero e ad aggiornare i **piani regionali di preparazione al rischio** ("Regional Risk Preparedness Plans"), che oggi rappresentano un riferimento anche per l'Italia.

Nel contesto nazionale, Terna ha riconosciuto la necessità di passare da una logica reattiva, basata sull'intervento post-evento, a un approccio sistemico di resilienza preventiva. Questa metodologia consente di individuare le aree più vulnerabili e di programmare interventi di rinforzo, automazione e digitalizzazione capaci di prevenire le interruzioni o ridurne l'impatto.

⁴⁵ <https://www.arera.it/chi-siamo/relazione-annuale/relazione-annuale-2025>.

La crescente concentrazione di picchi estivi determina un mutamento strutturale dei carichi di sistema e, secondo Terna e RSE, aumenta il rischio di congestioni nelle ore di punta, per l'elevata domanda di raffrescamento e la minore disponibilità di generazione idroelettrica nei periodi di siccità. Questa dinamica impone:

- un maggiore ricorso ai sistemi di accumulo (che in Italia hanno superato i 12,9 GWh di capacità installata a fine 2024);
- la digitalizzazione della rete e lo sviluppo delle smart grid;
- un potenziamento delle interconnessioni interne ed estere per compensare gli squilibri locali.

I cambiamenti climatici stanno peraltro incidendo in maniera crescente sulla stabilità e sull'affidabilità della Rete di Trasmissione Nazionale (RTN). Secondo i dati raccolti da Terna⁴⁶, nel solo 2024 sono stati registrati **oltre 350 eventi meteorologici estremi** con impatti diretti sul sistema elettrico, un incremento di circa **+485% rispetto al 2015**. Tali fenomeni – ondate di calore, alluvioni, siccità prolungate, incendi e tempeste – si traducono sia in un aumento dei **picchi di domanda elettrica**, sia in un maggiore **stress sulle infrastrutture di rete**.

Dal punto di vista economico, l'impegno di Terna per la resilienza infrastrutturale è rilevante. Nel **Piano di Sviluppo 2025**⁴⁷, l'azienda ha programmato **21 miliardi di euro di investimenti al 2034**, di cui circa **12 miliardi già nel periodo 2024-2028**, con un *focus* specifico su:

- potenziamento delle interconnessioni (Tyrrhenian Link, SA.CO.I.3, Adriatic Link);
- sviluppo della capacità di accumulo e dell'integrazione delle fonti rinnovabili;
- digitalizzazione della rete e sistemi di automazione per il controllo in tempo reale.

Questi investimenti sono destinati non solo a garantire la sicurezza energetica e l'integrazione delle rinnovabili, ma anche a fronteggiare l'aumento stimato dei **picchi estivi di domanda** (pari a +4 GW al 2030 secondo le proiezioni RSE) e le nuove vulnerabilità derivanti dai cambiamenti climatici.

In prospettiva, il rafforzamento della resilienza della rete rappresenta una condizione imprescindibile per evitare *blackout* e disalimentazioni diffuse. La combinazione tra resilienza fisica delle infrastrutture, gestione intelligente dei flussi energetici e investimenti tempestivi e mirati costituisce la chiave per affrontare la sfida della sicurezza elettrica.

L'obiettivo principale è rendere la rete in grado di assorbire gli *shock* climatici e di ripristinare rapidamente la funzionalità dopo un evento estremo. Gli interventi previsti si articolano in diverse linee di azione, quali:

- il **rafforzamento della magliatura** per distribuire meglio i flussi di energia e ridurre il rischio di congestioni localizzate;
- la **digitalizzazione e sensoristica avanzata**, con sistemi di monitoraggio in tempo reale delle condizioni termiche e meccaniche dei conduttori;
- l'**integrazione di capacità di accumulo** e risorse di flessibilità per compensare i picchi di domanda estiva e l'intermittenza delle fonti rinnovabili;

⁴⁶ Terna (2024). National Resource Adequacy Assessment for Italy 2024.

⁴⁷ <https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/programmazione-territoriale-efficiente/piano-sviluppo-rete>.

- la **sostituzione dei conduttori tradizionali con tecnologie HTLS (High Temperature Low Sag)**, che permettono di mantenere la capacità di trasporto anche in condizioni di alte temperature;
- il **rafforzamento delle dorsali Nord-Sud e delle interconnessioni insulari**, cruciali per ridurre le congestioni e garantire l'equilibrio tra aree di produzione e consumo;
- la **costruzione di nuove stazioni rialzate o protette** nelle zone a rischio idraulico, per mitigare gli effetti delle alluvioni e delle esondazioni.

La combinazione tra **resilienza fisica** e **resilienza digitale** diventa la chiave per garantire l'adeguatezza e la sicurezza del sistema elettrico in un contesto climatico in rapida evoluzione. La figura sottostante illustra, ad esempio, alcuni degli investimenti previsti dal Piano di Sicurezza di TERNA.

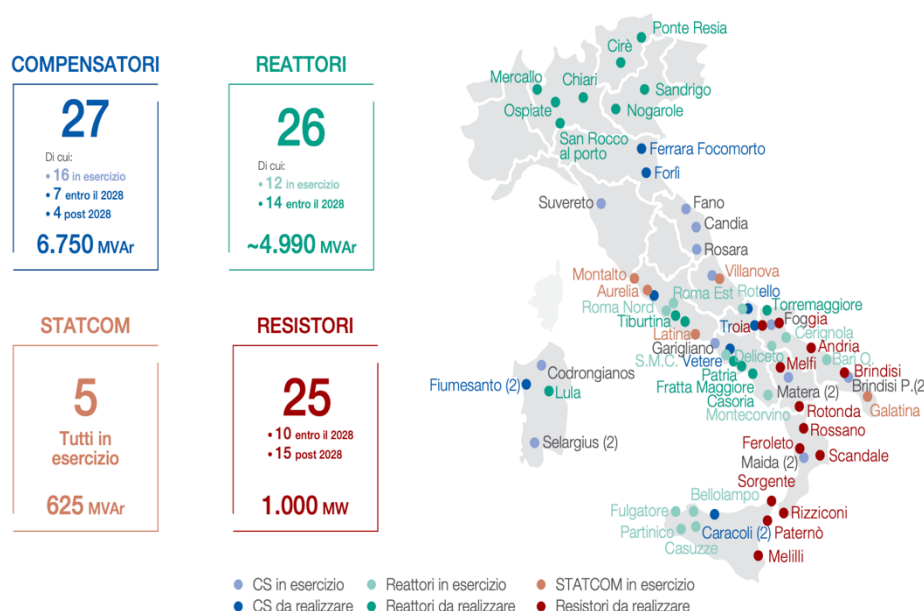


Figura 19. Installazioni previste dal Piano di Sicurezza di Terna (<https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/programmazione-territoriale-efficiente/piano-sviluppo-rete>).

6.3 Danni fisici e interruzioni di supply-chain

Come già richiamato, i cambiamenti climatici possono generare danni fisici rilevanti alle infrastrutture energetiche, accrescendo il rischio sistemico. Le reti italiane, esposte agli eventi meteorologici estremi, possono subire compromissioni a linee, stazioni e centrali, con potenziali ripercussioni sulla sicurezza energetica e sulle utenze critiche.

I danni fisici agli *asset* elettrici comportano spesso **interventi complessi e costosi di riparazione**, con tempi di fermo che variano da pochi giorni a diverse settimane. Le operazioni di ripristino, in diverse occasioni, sono rese più difficili dalla natura dei siti – spesso in aree montane, vallive o costiere – e dalle condizioni meteorologiche post-evento.

L'esperienza recente conferma questa vulnerabilità: negli ultimi anni si sono moltiplicati i casi di **interruzioni prolungate dovute a incendi boschivi o alluvioni**, che hanno danneggiato tratti estesi di linee e isolato intere comunità per giorni.

Principali eventi climatici con impatti sulla RTN negli ultimi 15 anni



Figura 20. Principali eventi climatici con impatti significativi sulla RTE (Terna S.p.A. (2025), Informativa sul Cambiamento Climatico – Terna per il Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici, Roma, marzo 2025, p. 7).

Le regioni del Mezzogiorno e le Isole Maggiori risultano particolarmente esposte, sia per la conformazione territoriale sia per la maggiore frequenza di episodi di siccità e vento caldo.

Secondo le elaborazioni di **RSE⁴⁸**, i **costi medi annuali** associati a interruzioni del servizio causate da eventi estremi nel sistema elettrico italiano sono compresi tra **150 e 180 milioni di euro**, con una tendenza alla crescita. In scenari di riscaldamento globale superiore a **+2°C**, l'impatto economico complessivo potrebbe aumentare fino al **40%**. Allo stesso tempo, gli studi evidenziano che **gli investimenti in prevenzione e resilienza** producono ritorni economici stimati da quattro a sei volte superiori ai danni diretti evitati: una conferma della convenienza, anche finanziaria, delle politiche di adattamento climatico.

Alla luce delle sfide che caratterizzeranno il sistema elettrico in ragione degli scenari energetici previsti e dei cambiamenti climatici in atto, nell'ambito della pianificazione dello

⁴⁸ RSE (2022), Climate change impacts on the Italian power system: assessment of physical risks and economic consequences, Regional Environmental Change.

sviluppo della rete di trasmissione è necessario raggiungere gli obiettivi indicati nell'immagine seguente:



Figura 21. Principali obiettivi per lo sviluppo efficiente della rete (Terna S.p.A. (2025), Informativa sul Cambiamento Climatico – Terna per il Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici, Roma, marzo 2025, p. 29).

Accanto ai danni diretti, il cambiamento climatico genera un insieme di **effetti indiretti** sulle **catene di approvvigionamento e sulla logistica energetica**, che spesso si rivelano altrettanto critici.

Alluvioni, frane o incendi possono interrompere **le vie di comunicazione e i corridoi di accesso** ai siti energetici, rallentando il trasporto di materiali, combustibili e componenti tecnici. In alcuni casi, l'isolamento di una singola area o di un nodo infrastrutturale può bloccare per giorni le attività di manutenzione o di ripristino della rete.

In scenari di emergenza, inoltre, la disponibilità di **componenti tecnologici e ricambi specializzati** (trasformatori, isolatori, cavi, moduli fotovoltaici, batterie, turbine, ecc.) diventa un fattore determinante. Le filiere produttive globali – già stressate da crisi geopolitiche e dalla competizione internazionale sulle materie prime critiche – non sempre riescono a garantire forniture tempestive. La **pandemia, combinata alla crisi climatica**, ha messo in luce la **fragilità della filiera globale dei componenti energetici**, mostrando come eventi climatici in Paesi terzi possano avere ricadute immediate sul sistema italiano: un incendio in un porto, un uragano che colpisce un'area industriale asiatica o una siccità che rallenta la produzione idroelettrica in un Paese esportatore di componenti possono determinare ritardi nelle consegne e costi aggiuntivi significativi.



¹ Di cui +43 GW da connettere su rete AT.

² Considerando tutte le opere incluse nel Piano di Sviluppo anche oltre l'orizzonte decennale.

Figura 22. Principali dati numerici del Piano di Sviluppo della Rete (Terna S.p.A. (2025), Informativa sul Cambiamento Climatico – Terna per il Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici, Roma, marzo 2025, p. 30).

Per contrastare questi fenomeni, il **Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica** e **Terna**, in collaborazione con la **Protezione Civile**, ha avviato un programma nazionale di **mappatura delle infrastrutture critiche vulnerabili**, finalizzato a individuare le aree e gli asset prioritari di intervento. Tale attività si integra con il **sistema europeo di allerta precoce** introdotto dalla **Direttiva (UE) 2022/2557** sulle entità critiche (EU-CER Directive), che impone ai gestori di servizi essenziali – tra cui rientrano i sistemi energetici – di effettuare valutazioni periodiche del rischio climatico e di adottare misure di prevenzione e risposta.

Le strategie di mitigazione oggi in corso si basano su tre direttrici principali:

1. **rafforzamento degli stock strategici di componenti essenziali**, per disporre di ricambi immediatamente disponibili in caso di guasti o eventi estremi;
2. **elaborazione di piani di emergenza intersettoriali**, che coordinano le risposte di operatori di rete, protezione civile e autorità locali;
3. **diversificazione dei fornitori internazionali e regionali**, per ridurre la dipendenza da singole aree geografiche o da produzioni concentrate in Paesi a elevato rischio climatico.

Parallelamente, sono in corso studi per migliorare la **manutenzione predittiva** delle infrastrutture e la **modellizzazione dei rischi fisici e funzionali**. Le analisi di RSE, che combinano dati storici di eventi estremi con modelli probabilistici di guasto, consentono di stimare l'esposizione degli asset e di definire priorità d'investimento più mirate

7. Infrastrutture e trasporti come cause e vittime dei cambiamenti climatici

Dalle analisi che sono state prese in considerazione, alla fine della stesura del presente documento, emerge con chiarezza un punto fondamentale del quale è opportuno rendere conto: come il settore energetico, anche le infrastrutture e i sistemi di mobilità sono al tempo

stesso tra le principali cause del cambiamento climatico e tra gli ambiti più esposti al suo impatto. Il nodo appare dunque, come è evidente, particolarmente delicato.

Del resto il settore dei trasporti è indicato come uno dei principali responsabili delle emissioni nazionali di gas a effetto serra, cioè di quelle sostanze che contribuiscono maggiormente a modificare il clima. I rapporti dedicati a infrastrutture e mobilità⁴⁹, infatti, mostrano che: *a)* il settore dei trasporti contribuisce in modo significativo alle emissioni totali di gas serra; *b)* la quota preponderante delle emissioni del comparto è riconducibile al trasporto stradale; *c)* il trasporto privato su gomma mantiene un ruolo dominante nelle emissioni⁵⁰.

Studi di sintesi⁵¹ sul tema sottolineano come la diffusione capillare dell'automobile privata e l'attuale organizzazione delle catene logistiche – basata sul trasporto stradale e su distanze crescenti – abbiano alimentato un modello di mobilità ad alta intensità di energia fossile, contribuendo così all'accumulo di gas serra in atmosfera. Parallelamente, gli stessi sistemi infrastrutturali e di mobilità risultano tra i più vulnerabili all'impatto del cambiamento climatico, in quanto: *i)* l'estremizzazione delle precipitazioni aumenta il rischio di allagamenti, frane, erosione e dissesto, con danni a strade, ponti, gallerie, ferrovie, porti e aeroporti; *ii)* le ondate di calore intense e prolungate possono compromettere la funzionalità dei materiali, la stabilità di talune opere d'arte, l'efficienza degli impianti e le condizioni di sicurezza per utenti e lavoratori; *iii)* l'innalzamento del livello del mare e l'aumento delle mareggiate mettono sotto pressione, in modo particolare, le infrastrutture costiere, i porti e le aree retroportuali; *iv)* incendi boschivi più frequenti e intensi minacciano tratti di rete stradale e ferroviaria in aree collinari e montane, con possibili interruzioni di servizio e danni alle strutture.

I fattori appena menzionati non comportano solo danni fisici agli asset infrastrutturali, ma generano interruzioni o rallentamenti dei servizi di trasporto, con ripercussioni su passeggeri, merci e attività economiche. I costi di manutenzione straordinaria e di gestione tendono ad aumentare, mentre la ridotta affidabilità delle reti può incidere negativamente sulla competitività dei territori e sulla qualità della vita dei cittadini.

Questo doppio ruolo di “causa e vittima” implica che le politiche per infrastrutture e mobilità debbano muoversi contemporaneamente su due piani. Da un lato, infatti, è necessario procedere all'adozione di strumenti di **mitigazione**, volti a ridurre le emissioni del settore dei trasporti, promuovendo, ad esempio, un riequilibrio modale a favore del trasporto ferroviario e collettivo, la diffusione di sistemi di mobilità a basse o nulle emissioni, la riorganizzazione delle catene logistiche, e la digitalizzazione e l'efficienza dei sistemi di mobilità⁵². D'altra parte, è necessario lavorare sul versante dell'**adattamento**, ripensando infrastrutture e mobilità in modo da ridurre la vulnerabilità al cambiamento climatico, garantendo così nel tempo la continuità dei servizi essenziali, la sicurezza degli utenti, la tenuta delle reti e la salvaguardia degli investimenti pubblici.

⁴⁹ Commissione europea – *EU Climate Action Progress Report 2025* (DG CLIMA).

⁵⁰ Commissione europea, *Fit for 55: delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality*, COM(2021) 550 final, 14 luglio 2021.

⁵¹ EEA – *Sustainability of Europe's mobility systems* (Report 01/2024, 10 Oct 2024); Commissione europea (DG MOVE) – *Transport in the European Union: Current trends and issues* (ed. 2024).

⁵² Commissione europea, *The European Green Deal*, COM(2019) 640 final, 11 dicembre 2019.

Nel quadro degli studi esaminati, l'adattamento è interpretato non come una sequenza di interventi puntuali di messa in sicurezza, ma come un percorso di “resilienza trasformativa”, che considera il cambiamento climatico come una leva per ridisegnare sistemi e reti in senso più sostenibile e robusto, in coerenza con gli obiettivi di decarbonizzazione.

La Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici⁵³ richiama, in questo contesto, il rischio di azioni di **mal-adattamento**: interventi che, se progettati senza tener conto della dimensione sistemica e degli obiettivi di mitigazione, possono aumentare le emissioni o creare nuove vulnerabilità. Da qui l'enfasi su soluzioni “*win-win*” (capaci di generare benefici multipli) e “*no regret*” (che si giustificano anche in presenza di incertezze sugli scenari climatici futuri)⁵⁴.

Ne deriva l'esigenza di integrare stabilmente la dimensione climatica nella **pianificazione** infrastrutturale e della mobilità, superando l'idea che il rischio climatico sia un fattore esterno o residuale rispetto alle scelte di investimento.

7.1. Riferimenti strategici e normativi

Il tema delle relazioni incrociate tra cambiamento climatico, infrastrutture e mobilità si colloca all'interno di un quadro strategico e normativo articolato, definito da indirizzi europei e nazionali, che la bibliografia di riferimento richiama in modo sistematico.

A livello europeo⁵⁵, un primo pilastro è rappresentato dalla Strategia dell'Unione Europea di adattamento ai cambiamenti climatici, che promuove un approccio proattivo alla gestione del rischio climatico, integrando l'adattamento nelle politiche settoriali e nei processi decisionali a tutte le scale di governo. Questa strategia è strettamente connessa non solo al *Green Deal* europeo⁵⁶, che configura un quadro di transizione verso la neutralità climatica, con forte attenzione ai temi dell'energia, della mobilità sostenibile, dell'efficienza delle risorse e della tutela degli ecosistemi, ma anche al pacchetto *Fit for 55*⁵⁷ – che declina l'obiettivo di riduzione delle emissioni nette di gas serra di almeno il 55% entro il 2030, prevedendo misure specifiche per i trasporti (standard emissivi, meccanismi di mercato, fiscalità energetica, carburanti alternativi, infrastrutture per la mobilità a basse emissioni) – e alla c.d. legge europea sul clima⁵⁸, che rende giuridicamente vincolante l'obiettivo della neutralità climatica entro il 2050 e rafforza l'esigenza di integrare il rischio climatico nella programmazione e valutazione degli investimenti.

Su questo quadro europeo si innesta, come è noto, la dimensione nazionale. Al riguardo, deve essere considerata in primo luogo la Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (SNAC) che costituisce il principale documento di indirizzo per l'Italia in materia di adattamento. In particolare, la SNAC, per quel che in questa sede è di maggiore interesse: a) definisce obiettivi generali e principi guida, tra cui criteri basati sulla

⁵³ Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM), *Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (SNAC)*, approvata con Decreto Direttoriale 16 giugno 2015, n. 86.

⁵⁴ Commissione europea, *Plasmare un'Europa resiliente ai cambiamenti climatici – La nuova strategia dell'UE di adattamento ai cambiamenti climatici*, COM(2021) 82 final, 24 febbraio 2021.

⁵⁵ Commissione europea, *Plasmare un'Europa resiliente ai cambiamenti climatici – La nuova strategia dell'UE di adattamento ai cambiamenti climatici*, cit.

⁵⁶ Commissione europea, *The European Green Deal*, COM(2019), cit.

⁵⁷ Commissione europea, *Fit for 55: delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality*, cit.

⁵⁸ Regolamento (UE) 2021/1119 del Parlamento europeo e del Consiglio del 30 giugno 2021.

conoscenza, la complementarità fra adattamento e mitigazione, il principio di precauzione, la sostenibilità, l'approccio intersettoriale e basato sul rischio; *b*) dedica specifici approfondimenti a settori quali trasporti, infrastrutture critiche e aree urbane, evidenziando la necessità di una valutazione sistematica delle vulnerabilità e dell'integrazione dell'adattamento nella pianificazione delle opere; *c*) propone un ampio repertorio di azioni di adattamento (misure regolatorie, strumenti economici, soluzioni basate sulla natura, interventi infrastrutturali tradizionali, azioni trasversali) che costituiscono un primo quadro operativo per l'azione pubblica.

La SNAC richiama anche la necessità di elaborare un Piano nazionale di adattamento ai cambiamenti climatici⁵⁹ (PNACC) quale strumento attuativo in grado di definire priorità, tempistiche e modalità di intervento. In questo ambito i rapporti settoriali dedicati alle infrastrutture e ai trasporti traducono le indicazioni strategiche generali in analisi e proposte specifiche per il sistema infrastrutturale nazionale.

Particolarmente rilevante è il Rapporto su cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità che, elaborato dalla Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili” istituita presso il MIT (allora MIMS)⁶⁰, sarà ampiamente preso in considerazione nelle pagine che seguono, in quanto svolge una funzione di collegamento tra le strategie climatiche e la programmazione infrastrutturale. Tale rapporto, infatti, da un lato analizza l'impatto del cambiamento climatico sul complesso delle infrastrutture di trasporto e sui sistemi di mobilità, evidenziando i potenziali danni al 2030 e al 2050, proponendo un approccio integrato alla resilienza delle infrastrutture, includendo le interdipendenze con infrastrutture idriche, di difesa del suolo e digitali; dall'altro avanza l'ipotesi di un Fondo nazionale per l'adattamento ai cambiamenti climatici, quale strumento per sostenere interventi di messa in sicurezza e di trasformazione del sistema infrastrutturale, in coordinamento con gli investimenti già programmati (ad esempio nell'ambito del PNRR e di altri strumenti di finanza pubblica).

Ulteriori contributi provenienti dal mondo della ricerca⁶¹ mettono in evidenza concetti quali: *i*) la crescita attesa dei danni alle infrastrutture in assenza di interventi di adattamento; *ii*) il ruolo centrale del settore dei trasporti nel processo di riduzione delle emissioni; *iii*) la necessità di considerare congiuntamente infrastrutture di mobilità, logistica, risorsa idrica e infrastrutture digitali.

Nel loro insieme, questi riferimenti concorrono a definire un quadro strategico e normativo unitario, che può essere sintetizzato in tre punti:

1. l'adattamento al cambiamento climatico non è più una politica settoriale, ma una dimensione trasversale da integrare in tutte le decisioni di investimento;
2. le infrastrutture di trasporto e mobilità costituiscono un ambito prioritario di intervento, sia per il peso dell'impatto atteso sia per il potenziale contributo a un modello di sviluppo sostenibile e inclusivo;

⁵⁹ Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE), *Decreto 21 dicembre 2023 – Approvazione del Piano nazionale di adattamento ai cambiamenti climatici (PNACC)*, pubblicato in G.U. Serie Generale n. 42 del 20 febbraio 2024.

⁶⁰ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità. Soluzioni e strategie per gli investimenti infrastrutturali in un contesto di adattamento ai cambiamenti climatici e di mitigazione delle emissioni di gas-serra*, cit. p. 1.

⁶¹ JRC (Commissione europea) – *Impacts of climate change on transport: airports, seaports and inland waterways* (2018).

3. la pianificazione nazionale e quella europea risultano sempre più intrecciate e orientano in modo convergente la programmazione degli interventi pubblici.

8. Pericoli meteo-climatici e vulnerabilità dei sistemi infrastrutturali in Italia

Come si è già accennato, l'area mediterranea, e in particolare l'Italia, rappresentano un “*hot spot*” del cambiamento climatico, cioè una regione in cui l'aumento delle temperature e l'estremizzazione delle precipitazioni risultano più intensi della media globale.

Gli scenari climatici considerati nella bibliografia – e già più ampiamente rappresentati descritti – mostrano che in futuro, tra i vari effetti del cambiamento climatico, andranno inevitabilmente considerati eventi che possono rappresentare un rischio importante per i sistemi infrastrutturali nazionali, e tra questi, in particolare:

- un incremento degli episodi di caldo estremo⁶² e del numero di notti tropicali⁶³ nelle aree urbane;
- un'estremizzazione delle precipitazioni, per cui aumenterà la frequenza sia degli eventi piovosi particolarmente intensi, con conseguente pericolo di improvvisi allagamenti (*flash flood*), sia delle siccità idrologiche⁶⁴;
- entro la fine del secolo, per l'effetto combinato della fusione dei ghiacciai e riscaldamento delle acque (l'acqua, come tutti i fluidi, se riscaldata occupa un volume maggiore), si osserverà un ulteriore innalzamento del livello del mare compreso tra poche decine di centimetri e oltre un metro, con inevitabile intensificazione degli effetti delle mareggiate sulle coste;
- la combinazione di caldo estremo, siccità e modifiche nella copertura del suolo causerà una maggior vulnerabilità agli incendi in molte aree collinari e montane.

I pericoli meteo-climatici rilevanti per le infrastrutture e la mobilità⁶⁵ riguardano quindi:

- ondate di calore e stress termico sugli asset e sugli impianti;
- siccità e stress idrico;
- alluvioni, frane e fenomeni di flash flood;
- innalzamento del livello del mare e mareggiate;
- eventi di vento particolarmente intenso;
- incendi boschivi.

Questi pericoli non agiscono in modo isolato: spesso si combinano, si rafforzano a vicenda e si innestano su vulnerabilità preesistenti degli asset e dei territori. La valutazione della vulnerabilità infrastrutturale richiede quindi un approccio che consideri anche le loro interazioni nello spazio e nel tempo.

⁶² Il caldo è considerato estremo quando le temperature dell'aria raggiungono o oltrepassano i 35 °C.

⁶³ Le notti tropicali sono quelle durante le quali le temperature dell'aria non scendono mai al di sotto di 20 °C.

⁶⁴ La siccità idrologica descrive la riduzione delle riserve idriche del territorio (laghi, fiumi, acquiferi) al di sotto di determinate soglie di riferimento; è in generale causata da deficit delle precipitazioni e/o aumento dei prelievi.

⁶⁵ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità. Soluzioni e strategie per gli investimenti infrastrutturali in un contesto di adattamento ai cambiamenti climatici e di mitigazione delle emissioni di gas-serra*, cit. p. 81.

8.1. Principali pericoli climatici per le infrastrutture

Sulla base degli studi dedicati a cambiamenti climatici, infrastrutture e trasporti, è possibile delineare un quadro sintetico che evidenzia le modalità con cui i pericoli meteo-climatici tendono a manifestarsi e le implicazioni per reti e servizi di mobilità⁶⁶.

I. Ondate di calore e stress termico. L'aumento della frequenza, della durata e dell'intensità delle ondate di calore interessa sia le aree urbane sia quelle rurali, con effetti significativi sulle infrastrutture, quali: *a)* fenomeni di alte temperature per periodi prolungati di tempo riducono le prestazioni di materiali e componenti (pavimentazioni, binari, giunti, cavi, impianti), accelerando processi di degrado e deformazione; *b)* l'aggravamento delle condizioni di esercizio di gallerie, stazioni, terminal e nodi intermodali, che richiedono maggiori consumi energetici per il raffrescamento e sono più esposti a malfunzionamenti in caso di stress sulla rete elettrica; *c)* il deterioramento delle condizioni di sicurezza e comfort per gli utenti, in particolare per chi utilizza mezzi e spazi non adeguatamente climatizzati. Il fenomeno è, peraltro, amplificato nelle città, dove le isole di calore urbane accentuano lo stress termico per persone e infrastrutture.

II. Siccità e stress idrico. La maggiore frequenza di periodi siccitosi e di stress idrico ha ripercussioni su diversi tipi di infrastrutture. Al riguardo, si considerino i seguenti:

- la riduzione della disponibilità di acqua per usi civili, agricoli e industriali incide sulla gestione di invasi, canali, opere idrauliche e infrastrutture che dipendono dall'acqua per il raffreddamento o per specifiche funzioni operative;
- la modifica del regime idrologico dei corsi d'acqua condiziona la progettazione e la gestione di ponti, opere di attraversamento e sistemi di difesa idraulica, influenzando i livelli di sicurezza e la frequenza degli interventi di manutenzione;
- lo stress idrico può contribuire a fenomeni di subsidenza del suolo e a variazioni della stabilità dei versanti, con effetti su strade, ferrovie e condotte.

L'acuirsi dei conflitti tra usi diversi della risorsa idrica (agricolo, industriale, potabile, energetico) può inoltre generare criticità per il funzionamento di alcune infrastrutture in situazioni di domanda elevata e disponibilità ridotta.

III. Alluvioni, frane e flash flood. Gli studi sugli impatti che è stato possibile consultare⁶⁷ mostrano come l'estremizzazione delle precipitazioni abbia conseguenze quali la maggiore probabilità di alluvioni fluviali, con esondazioni che interessano infrastrutture situate in pianure alluvionali o in prossimità di alvei e argini; l'incremento dei fenomeni di flash flood in aree urbane e periurbane, dove l'impermeabilizzazione dei suoli e la limitata capacità dei sistemi di drenaggio amplificano velocità e violenza dei deflussi; ancora, la crescita del rischio di frane e movimenti di massa in ambito collinare e montano, con danni a rilevati, muri di sostegno, opere d'arte e piattaforme stradali e ferroviarie. Le conseguenze economiche di tali fenomeni sulle infrastrutture sono già oggi significative. Una ricostruzione storica inclusa

⁶⁶ Commissione "Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili", *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 119.

⁶⁷ Commissione "Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili", *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 84.

negli studi esaminati⁶⁸ stima che, nel periodo 1981-2010, il danno diretto medio annuo sulle infrastrutture causato da eventi meteo-climatici sia stato pari a circa 0,42 miliardi di euro; nello scenario climatico di riferimento⁶⁹, questo valore potrebbe salire a circa 2 miliardi di euro all'anno nel periodo 2020-2030, fino a raggiungere 5 miliardi di euro all'anno tra il 2040 e il 2050. Una quota rilevante di questo aumento riguarda il settore dei trasporti: il danno medio annuo sui soli trasporti è stimato attorno a 1,08 miliardi di euro nel 2020 e a 2,8 miliardi di euro nel 2050, con incrementi percentuali molto elevati rispetto ai valori storici.

IV. Innalzamento del livello del mare e mareggiate. L'innalzamento del livello medio del mare⁷⁰, combinato con l'aumento di frequenza e intensità delle mareggiate, rappresenta un pericolo particolarmente critico per le infrastrutture costiere. La situazione accennata, infatti, espone a erosione, inondazioni e danneggiamento le opere portuali, le strade litoranee e le ferrovie in prossimità della costa. Le aree retroportuali, spesso densamente infrastrutturate, risultano vulnerabili ad allagamenti e alla corrosione accelerata di strutture e impianti. A ciò bisogna aggiungere che gli insediamenti urbani costieri, così come i poli turistici, subiscono un incremento della frequenza di eventi di inondazione marina e di danneggiamento delle infrastrutture a servizio del turismo. La rilevanza economica di questi rischi è particolarmente evidente se si considera il peso dei porti e della blue economy per il sistema-Paese. Le valutazioni riportate indicano che l'insieme delle attività afferenti alla *blue economy* (pesca, cantieristica, trasporti marittimi, turismo costiero, etc.) coinvolge in Italia circa 880.000 occupati e 200.000 imprese (pari a circa il 3,2% del totale), generando, se si considerano gli effetti di filiera, un valore aggiunto stimato intorno a 130 miliardi di euro l'anno, cioè circa il 10% del PIL nazionale⁷¹. Questa quota rilevante di attività economica è particolarmente esposta al rischio di inondazioni derivanti dall'innalzamento del mare, cui si aggiungono gli effetti di eventuali episodi di *storm surge*⁷².

V. Eventi estremi di vento e fenomeni convettivi. L'aumento degli eventi meteorologici estremi si manifesta anche attraverso episodi di vento forte e fenomeni convettivi⁷³ violenti, talora associati a grandinate e trombe d'aria. Questi episodi possono danneggiare linee aeree, pali, torri, segnaletica e altre strutture esposte; compromettere la stabilità di coperture, pensiline e strutture leggere in nodi infrastrutturali (stazioni, terminal, parcheggi); ancora,

⁶⁸ Commissione "Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili", *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 154.

⁶⁹ Con *scenario di riferimento* si intende il contesto climatico futuro più probabile, descritto dallo scenario di emissione intermedio (RCP4.5), in cui la neutralità climatica a scala planetaria verrà raggiunta solo nella seconda parte del secolo.

⁷⁰ ENEA (2019), *Innalzamento del Mar Mediterraneo in Italia: Aree costiere e porti a rischio inondazione al 2100*.

⁷¹ Commissione "Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili", *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 196.

⁷² Lo *storm surge* rappresenta un anomalo innalzamento del livello del mare causato da eventi meteorologici, come ad esempio forti venti che soffiano in direzione dal mare verso la terraferma e che tendono quindi ad ammassare le acque marine contro la costa.

⁷³ I processi convettivi sono quelli che vedono aria calda (e quindi meno densa e più leggera) salire rapidamente all'interno dell'atmosfera e, se sufficientemente umida, condensare velocemente grandi quantità di vapore, dando vita talvolta a imponenti nubi temporalesche.

determinare interruzioni temporanee del servizio e aumentare i rischi per la sicurezza degli utenti.

VI. Incendi boschivi. La combinazione di ondate di calore, siccità e modifiche dell'uso del suolo aumenta la probabilità e l'intensità degli incendi boschivi, soprattutto in aree collinari e montane. Gli incendi possono danneggiare direttamente tratti di rete stradale e ferroviaria e le relative infrastrutture di supporto, ridurre la copertura vegetale, aumentando il rischio di frane e colate detritiche in occasione di piogge successive, e determinare interruzioni prolungate dei collegamenti e l'isolamento temporaneo di comunità locali.

8.3. Distribuzione spaziale e differenze territoriali

I pericoli più sopra sommariamente descritti non si distribuiscono in modo uniforme sul territorio nazionale⁷⁴. La vulnerabilità delle infrastrutture è, infatti, il risultato dell'interazione tra diversi fattori, quali: *i*) le caratteristiche climatiche e fisiche dei territori (orografia, idrologia, geomorfologia, prossimità al mare); *ii*) i modelli insediativi e uso del suolo; *iii*) la dotazione e lo stato di conservazione delle infrastrutture; *iv*) la qualità della pianificazione e della gestione.

Dal Rapporto della Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, già più volte citato, emergono, in particolare, tre linee di frattura territoriali.

I. Nord/Sud e divari infrastrutturali. Permangono significativi divari infrastrutturali tra le diverse aree del Paese, in particolare tra il Centro-Nord e il Mezzogiorno⁷⁵. Il quadro ricostruttivo dei danni climatici sulle infrastrutture mostra che gran parte dei danni diretti attesi si concentra nelle regioni meridionali, dove l'esposizione ai pericoli (ondate di calore, siccità, incendi, alluvioni) si somma a una dotazione infrastrutturale più debole e a maggiori criticità manutentive. Ne deriva una possibile riduzione del PIL⁷⁶ regionale più marcata rispetto alla media nazionale, con il rischio di accentuare ulteriormente i divari di sviluppo.

II. Aree costiere, pianure, aree interne e montane.

La diversa morfologia dei territori determina differenti caratteristiche di vulnerabilità⁷⁷. Le coste e le pianure litoranee, dove si concentrano porti, insediamenti urbani, strade e ferrovie, sono infatti esposte all'innalzamento del livello del mare, alle mareggiate e, in alcuni casi, alla subsidenza, con ripercussioni su sistemi logistici e *blue economy*. Le grandi pianure alluvionali e i fondovalle fluviali, che ospitano una parte rilevante delle infrastrutture di trasporto, produttive e logistiche, risultano invece vulnerabili ad alluvioni e allagamenti ripetuti. Le aree interne e montane, caratterizzate da versanti scoscesi e da condizioni geomorfologiche complesse, sono più esposte a frane, colate detritiche e fenomeni di instabilità, con impatti su strade, ferrovie e centri abitati. Infine, molte aree collinari e

⁷⁴ *Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (SNAC)*, 2015.

⁷⁵ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 251.

⁷⁶ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, cit. p. 161.

⁷⁷ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 119.

montane presentano inoltre un rischio crescente di incendi, con potenziali effetti combinati sul territorio e sulle infrastrutture lineari.

III. Aree urbane e metropolitane vs territori periferici.

Nelle grandi aree urbane e metropolitane, l'elevata concentrazione di popolazione, funzioni economiche e infrastrutture comporta la forte esposizione alle isole di calore e agli effetti delle ondate di calore, il rischio elevato di *flash flood* in presenza di piogge intense e sistemi di drenaggio sottodimensionati e la necessità di garantire la continuità di sistemi di trasporto pubblico complessi e di infrastrutture digitali ad alta densità.

Nei territori periferici, rurali e montani, la vulnerabilità assume invece forme diverse. Tali zone, infatti, sono caratterizzate da una minore ridondanza delle reti, con la conseguenza che anche un singolo evento può interrompere l'unico collegamento disponibile. Nei medesimi, inoltre, si segnala la difficoltà di ripristino rapido dei servizi per carenza di risorse tecniche e finanziarie, e la maggiore dipendenza da pochi collegamenti per l'accesso a servizi essenziali. Queste differenze territoriali suggeriscono che l'adattamento delle infrastrutture al cambiamento climatico richieda strategie calibrate sui contesti, evitando approcci uniformi e generalizzati.

8.4. Impatti trasversali su economia e società

I pericoli e le vulnerabilità descritte non producono solo danni agli asset fisici, ma hanno impatti trasversali sull'economia e sulla società⁷⁸.

I. Accessibilità ai servizi essenziali. Le infrastrutture di trasporto e le reti collegate sono la condizione necessaria per garantire l'accesso a una serie di diritti fondamentali⁷⁹: lavoro, istruzione, salute, servizi sociali. Gli eventi meteo-climatici estremi possono quindi determinare l'isolamento temporaneo di comunità locali, soprattutto nelle aree interne e insulari, la difficoltà di accesso ai servizi sanitari, con rischi amplificati durante le emergenze, e la discontinuità nell'erogazione dei servizi educativi e sociali.

II. Produttività, competitività e catene del valore. Le infrastrutture sono parte fondamentale delle catene di approvvigionamento e della logistica. Le analisi economiche nello scenario climatico di riferimento⁸⁰ evidenziano che: *a)* il danno diretto medio annuo alle infrastrutture, pari a circa 0,42 miliardi di euro nel periodo 1981-2010, potrebbe salire fino a 2 miliardi nel periodo 2020-2030 e a circa 5 miliardi nel 2040-2050⁸¹; *b)* considerando anche gli effetti sistemici sull'insieme dell'attività economica, il danno complessivo da impatti climatici sulle infrastrutture praticamente raddoppia: per l'Italia si stimano perdite complessive tra 2,3 e 8,7 miliardi di euro all'anno nel periodo 2020-2030 (0,1-0,4% del PIL medio) e tra 11,5 e 18 miliardi di euro all'anno nel 2050 (0,33-0,55% del PIL).

⁷⁸ Forzieri, G., et al. (2018). *Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe*. Global Environmental Change.

⁷⁹ Commissione "Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili", cit. p. 212.

⁸⁰ Commissione "Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili", *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 104.

⁸¹ Commissione "Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili", cit. p. 155.

Per il settore dei trasporti, l'aumento dei danni diretti alle infrastrutture (oltre 2,8 miliardi di euro annui al 2050 nello scenario di riferimento) ha ripercussioni immediate sui costi di gestione, sulla continuità dei servizi e sulla competitività delle imprese.

III. Disuguaglianze territoriali e sociali. Gli impatti climatici sulle infrastrutture mostrano anche una distribuzione territoriale non omogenea. Le analisi⁸² evidenziano infatti che i territori già caratterizzati da ritardi infrastrutturali e minori di servizi sono spesso quelli in cui l'impatto degli eventi meteo-climatici risulta più rilevante. Le fasce di popolazione con minori risorse economiche e minori alternative di mobilità, peraltro, sono più vulnerabili alle interruzioni dei servizi di trasporto, e la carenza di strategie di adattamento rischia di ampliare le disuguaglianze territoriali e sociali.

9. Impatto dei cambiamenti climatici sui sistemi di trasporto e sulla mobilità

Gli studi analizzati mettono in evidenza come il settore dei trasporti sia, tra tutti, quello in cui l'aumento dei danni meteo-climatici è più marcato. In termini economici, l'impatto diretto degli eventi estremi sul solo settore dei trasporti è stimato oggi in circa 0,15 miliardi di euro/anno: nelle proiezioni climatiche utilizzate, questo valore potrebbe aumentare di circa il 1900% nel periodo 2040-2070⁸³, con un conseguente danno annuo superiore ai 2,8 miliardi di euro nella parte centrale del secolo⁸⁴.

Più del 50% degli attuali danni diretti al comparto dei trasporti è riconducibile a esondazioni fluviali e inondazioni costiere, che mostrano una tendenza alla crescita nel corso del secolo⁸⁵, mentre nel 2050 la quota prevalente (circa il 95%) sarà associata alle ondate di calore, con una crescita complessiva dei danni diretti che potrebbero raggiungere, per l'intero settore dei trasporti, 1,08 miliardi di euro/anno nel 2020 e 2,80 miliardi di euro/anno nel 2050⁸⁶.

9.1. Trasporto stradale e autostradale

Il sistema della mobilità su gomma – strade urbane ed extraurbane, rete autostradale, viabilità secondaria e locale – è il segmento più esteso e capillare della rete dei trasporti e, al tempo stesso, uno dei più esposti ai pericoli climatici⁸⁷. In particolare, le temperature elevate e le ondate di calore incidono direttamente sui materiali stradali, in virtù delle seguenti ragioni: a) le pavimentazioni bituminose, termo-sensibili, subiscono deformazioni viscosi e fenomeni di fessurazione, con conseguente degrado accelerato del manto e aumento degli interventi

⁸² Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 53.

⁸³ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 121.

⁸⁴ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 121.

⁸⁵ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 123.

⁸⁶ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 83.

⁸⁷ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 126.

manutentivi; *b*) nelle pavimentazioni cementizie, la dilatazione termica può generare stati tensionali incompatibili con la resistenza del materiale, con fessurazioni e danni strutturali⁸⁸.

Le ondate di freddo causano invece rotture e degrado del manto stradale, aggravati dalla ripetizione dei cicli gelo-disgelo, e richiedono operazioni di rimozione di neve e ghiaccio con aumento dei costi di esercizio e possibili blocchi alla circolazione. Prolungati periodi di siccità possono accentuare fenomeni di subsidenza del terreno, con deformazioni della sede stradale e necessità di interventi strutturali, soprattutto in aree già fragili dal punto di vista geotecnico. Gli incendi che si sviluppano in prossimità delle infrastrutture terrestri comportano la chiusura temporanea di tratti di rete e, nei casi più severi, danni materiali a ponti, rilevati, barriere e sistemi di controllo e segnaletica, con costi di ripristino elevati.

Le esondazioni e gli allagamenti producono, invece, due principali tipologie di impatto: da un lato, determinano l'erosione e lo scalzamento di fondazioni e opere geotecniche (pile e spalle di ponti, muri di sostegno, rilevati); dall'altro hanno quale conseguenza allagamento delle carreggiate, malfunzionamento dei sistemi di drenaggio (caditoie, fossi, tombini), collasso localizzato delle sedi stradali.

I movimenti franosi, infine, possono ostruire la sede stradale, provocare danni strutturali alle opere d'arte e, nei casi più gravi, imporre la ricostruzione di interi tratti di infrastruttura, con interruzioni prolungate del servizio e costi di ricostruzione significativi.

9.2. Sistema ferroviario

Il sistema ferroviario condivide molti pericoli con il trasporto stradale, ma presenta alcune specifiche vulnerabilità legate a tecnologia dei binari, elettrificazione e sistemi di controllo. Le ondate di calore sono il principale fattore di danno per le infrastrutture ferroviarie. Ciò in quanto la dilatazione termica delle rotaie può determinare instabilità dell'armamento e fenomeni di "*buckling*" (imbarcamento dei binari), con rischi diretti per la sicurezza e necessità di ridurre le velocità o sospendere il servizio. Si consideri, inoltre, che le elevate temperature incidono anche sui sistemi di alimentazione e sugli impianti di trazione, aumentando guasti e malfunzionamenti⁸⁹.

Le ondate di freddo intenso possono provocare, invece, rotture dell'armamento ferroviario, problemi di gelo, congelamento dei sistemi di segnalamento, comunicazione e instradamento dei treni, con impatti rilevanti sulla regolarità del servizio.

Anche esondazioni, frane e allagamenti hanno impatto significativo sulle infrastrutture ferroviarie. Ciò in quanto: *a*) i rilevati e le opere d'arte possono subire danni strutturali per effetto delle spinte idrauliche e dello scalzamento delle fondazioni; *b*) l'allagamento delle sedi ferroviarie impone la sospensione del traffico e richiede interventi di ripristino sulle massicciate e sui sistemi di drenaggio; *c*) frane e colate detritiche possono causare l'ostruzione della sede ferroviaria con danni diretti all'armamento e alle opere accessorie.

⁸⁸ Commissione "Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili", *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 127.

⁸⁹ Commissione "Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili", *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 127.

9.3. Porti, trasporto marittimo e vie navigabili interne

Le infrastrutture portuali e il trasporto marittimo sono interessati in modo diretto dall'innalzamento del livello del mare e dall'aumento in frequenza e intensità delle mareggiate. Ciò sia perché l'innalzamento del livello medio del mare potrebbe favorire un rilevante aumento delle inondazioni costiere⁹⁰, sia perché le mareggiate hanno impatti sostanziali sulle infrastrutture critiche in prossimità della costa e, in particolare, per il trasporto marittimo con danni tanto alle strutture di difesa e ai moli, quanto alle banchine, ai piazzali e alle infrastrutture retroportuali.

Queste criticità si inseriscono in un contesto economico in cui la *blue economy* italiana, che comprende pesca, cantieristica, trasporti marittimi, turismo costiero e attività connesse, coinvolge circa 880.000 occupati e 200.000 imprese, pari a circa il 3,2% del totale nazionale, generando – se si considerano gli effetti di filiera – un valore aggiunto nell'ordine di 130 miliardi di euro l'anno, cioè circa il 10% del PIL⁹¹.

L'aumento del rischio di inondazione per porti, interporti costieri e infrastrutture retroportuali, oltre ai danni fisici, comporta quindi rallentamenti e interruzioni nella catena logistica, con conseguenze su esportazioni, importazioni e accessibilità dei territori costieri.

Per il trasporto fluviale e interno, gli studi⁹² evidenziano l'effetto combinato di siccità e riduzione dei deflussi fluviali, che possono rendere i fiumi “non navigabili per prolungati periodi dell'anno” da un lato; e maggiore frequenza di piene intense e fenomeni di alluvione che danneggiano opere di difesa e infrastrutture di sponda e di ormeggio, dall'altro.

Sebbene il trasporto fluviale abbia in Italia un peso ancora limitato, queste dinamiche ne riducono ulteriormente l'affidabilità e la capacità di rappresentare una valida alternativa alla gomma.

9.4. Aeroporti e trasporto aereo

Il trasporto aereo è esposto ad alcuni pericoli meteo-climatici specifici, legati sia alle condizioni meteo estreme sia all'eventuale localizzazione costiera di molti degli scali. Le analisi⁹³ indicano che episodi di vento forte, pur non mostrando variazioni percentuali elevate come altri eventi estremi, restano un pericolo climatico potenzialmente molto dannoso per il trasporto aereo. Raffiche intense e fenomeni convettivi⁹⁴ possono causare chiusura temporanea dello scalo, ritardi e cancellazioni, con danni elevati per compagnie e passeggeri, nonché danneggiare infrastrutture leggere (pensiline, torri faro, segnaletica) e compromettere così l'operatività delle apparecchiature di assistenza al volo.

Gli aeroporti localizzati in aree costiere o in pianure alluvionali sono inoltre interessati dal pericolo di rischi di allagamento delle piste e delle aree di rullaggio in occasione di precipitazioni intense, se non addirittura da vere e proprie inondazioni costiere in occasione

⁹⁰ ENEA, *Innalzamento del Mar Mediterraneo in Italia: Aree costiere e porti a rischio inondazione al 2100*, ENEA, 2019.

⁹¹ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 196.

⁹² JRC – Christodoulou & Christidis, *Forecasting the impacts of climate change on inland waterways*, 2020.

⁹³ UNECE – *Climate Change Impacts and Adaptation for Transport Networks and Nodes*.

⁹⁴ Forti correnti verticali all'interno dell'atmosfera possono risultare assai pericolose in fase di decollo o atterraggio, quando il velivolo si trova più vicino alla terraferma. In particolare, all'interno dei temporali, si osservano anche intense correnti discendenti che possono spingere improvvisamente l'aereo verso il basso.

di forti mareggiate, che possono colpire sia le infrastrutture *air-side* sia le connessioni stradali e ferroviarie di accesso allo scalo.

Senza misure di adattamento, tutto ciò può tradursi in una riduzione di operatività degli aeroporti, con impatto a cascata sulle reti di collegamento nazionale e internazionale⁹⁵.

9.5. Mobilità urbana e metropolitana

Le città rappresentano uno degli “*hot spot*” della vulnerabilità infrastrutturale e della mobilità. Da un lato, l’alta densità di popolazione, la concentrazione di infrastrutture viarie e di trasporto pubblico e il grado di impermeabilizzazione del suolo amplificano l’esposizione agli eventi meteo-climatici estremi; dall’altro la presenza di popolazioni più vulnerabili e di insediamenti non sempre a norma accresce i rischi sociali e sanitari associati ai disservizi⁹⁶.

Per di più il Trasporto Pubblico Locale (TPL)⁹⁷ urbano è caratterizzato dalla presenza simultanea di più modalità e quindi da una pluralità di infrastrutture esposte. Al riguardo, infatti, si consideri che:

- le ondate di calore causano deterioramento del manto stradale, deformazione dei binari, irregolarità dell’alimentazione elettrica (ad esempio, peggioramento del contatto sulla linea aerea per i tram), aumento dei consumi dei veicoli e riduzione del comfort di viaggio, con tendenza della domanda a spostarsi verso l’auto privata;
- le ondate di freddo accentuano i problemi di sicurezza e regolarità del servizio, richiedono interventi aggiuntivi di esercizio e producono ulteriori costi di gestione;
- allagamenti ed esondazioni fluviali possono obbligare alla sospensione del servizio su alcune linee, con aggravio dei costi di manutenzione di tombini e caditoie;
- frane e vento forte producono danni alle infrastrutture e interruzioni del servizio, con aumento dei costi di ripristino e delle esternalità legate a deviazioni di percorso.

Solo una quota limitata delle città italiane⁹⁸ ha completato valutazioni sistematiche del rischio climatico e adottato un Piano di Adattamento (appena un quarto circa delle città ha condotto analisi di rischio e solo il 12% dispone di un piano dedicato), il che rende particolarmente complessa una gestione strutturale dei rischi a scala urbana.

9.6. Logistica, catene del valore e intermodalità

La logistica costituisce l’ossatura attraverso cui si muovono merci, componenti e prodotti finiti lungo le catene del valore. I nodi logistici e le reti che li connettono sono esposti a un ventaglio ampio di pericoli meteo-climatici: esondazioni fluviali, allagamenti,

⁹⁵ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 133.

⁹⁶ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 110.

⁹⁷ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 130.

⁹⁸ Fondazione per lo Sviluppo Sostenibile (a cura di), *Relazione sullo stato della green economy 2019 – focus sugli impatti economici dei cambiamenti climatici in Italia*, 2019.

inondazioni costiere, frane, tempeste di vento⁹⁹. Le conseguenze possono essere diverse, tra cui meritano di essere menzionati, in particolare: *i)* i disservizi e i ritardi legati alla riduzione di accesso e alla chiusura temporanea di porti, aeroporti e interporti; *ii)* i danni ai beni trasportati e ai veicoli, anche per effetto di interruzioni o anomalie nella catena del freddo; *iii)* la riduzione di operatività e i danni alle infrastrutture logistiche e alle reti di supporto (energia, telecomunicazioni, trasporti); *iiii)* l'incremento della frequenza delle operazioni di manutenzione, con aumento strutturale dei costi di gestione.

Tutto ciò in un contesto in cui, nell'ultimo decennio, i volumi di trasporto in tutti i settori sono cresciuti più del PIL, determinando una pressione crescente sulle reti, in particolare su valichi alpini, porti e aeroporti, con il rischio di saturazione delle capacità disponibili.

Gli studi mostrano¹⁰⁰ che, a causa di un cambiamento climatico che rende più frequenti le interruzioni delle infrastrutture e delle catene di approvvigionamento, la logistica deve passare da un paradigma centrato sulla massimizzazione dell'efficienza a un paradigma volto alla riduzione della vulnerabilità, basato su: maggiore ridondanza e diversificazione dei fornitori; regionalizzazione delle catene di approvvigionamento, con hub logistici localizzati in aree considerate relativamente più sicure dal punto di vista climatico; possibilità di spostare rapidamente le merci da una modalità di trasporto all'altra (intermodalità flessibile) in caso di emergenze; costituzione di magazzini di buffer prossimi ai poli di produzione per assorbire le interruzioni temporanee delle infrastrutture di trasporto.

10. Interdipendenze tra infrastrutture: acqua, digitale e servizi essenziali

Gli studi analizzati insistono su un punto chiave: le infrastrutture non sono “silos” separati, ma formano un sistema di sistemi. Le reti idriche, di difesa del suolo, di trasporto, le infrastrutture digitali, l'energia e i servizi essenziali (sanità, istruzione, servizi urbani) sono connessi da legami fisici, informativi e funzionali¹⁰¹.

Questo significa che un danno meteo-climatico che colpisce un singolo asset – ad esempio un collettore fognario, una sottostazione elettrica o un data center – può propagarsi a cascata su altri settori, trasformandosi da evento locale in crisi sistemica.

La letteratura tecnica distingue diverse forme di interdipendenza tra infrastrutture: fisica (dipendenza dal servizio di un'altra infrastruttura), cyber (dipendenza da sistemi ICT e flussi informativi), geografica (condivisione della stessa area esposta a un pericolo) e logica (dipendenza attraverso relazioni regolatorie, economiche e organizzative).

10.1. Infrastrutture idriche e difesa del suolo

Le infrastrutture idriche¹⁰² – adduzione, distribuzione, invasi, reti fognarie, sistemi di laminazione – sono al tempo stesso bersaglio diretto dei rischi climatici e snodo di interconnessione con infrastrutture di trasporto, insediamenti urbani e servizi essenziali.

⁹⁹ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 53.

¹⁰⁰ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 144.

¹⁰¹ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p.151.

¹⁰² Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 145.

La Siccità e lo stress idrico mettono sotto pressione invasi, reti di adduzione e distribuzione e sistemi di approvvigionamento idropotabile, accentuando i rischi di scarsità e razionamento. Al tempo stesso, l'estremizzazione delle precipitazioni, con l'aumento della magnitudo e della frequenza delle precipitazioni forti nei bacini piccoli, produce un incremento di *flash flood* e di piene rapide che interessano il reticolo idraulico minore e le reti fognarie.

10.1.1. Adduzione, distribuzione, invasi, sistemi di laminazione

Le reti idriche e fognarie esistenti sono spesso state progettate assumendo, per eventi piovosi estremi, tempi di ritorno superiori a 30 anni: a causa dell'estremizzazione delle precipitazioni associata al cambiamento climatico, queste reti possono essere sottoposte a piene ben superiori ai valori di progetto, con sovraccarichi, tracimazioni e gravi allagamenti. Ecco allora che assumono particolare rilievo alcune misure infrastrutturali, quali ad esempio:

- gli invasi multifunzionali e i sistemi di laminazione delle piene, che consentono di attenuare i picchi di portata e di ridurre il rischio idraulico a valle;
- le misure di protezione dei reticoli minori e degli attraversamenti (ponti, opere in alveo), che devono essere adeguati a condizioni idrauliche più gravose;
- le strategie per mantenere o aumentare la permeabilità dei suoli (ad esempio con pavimentazioni drenanti) nei contesti urbanizzati.

Dal punto di vista economico, il fabbisogno di investimento in adattamento per l'insieme delle infrastrutture – che comprende anche le infrastrutture idriche e di difesa del suolo – è stimato, nello scenario climatico di riferimento, in 8–10 miliardi di euro fino al 2030 (circa 1 miliardo all'anno), con un costo operativo e di manutenzione annuo pari a 604 milioni di euro; per estendere la resilienza fino al 2070, il costo di capitale iniziale salirebbe a quasi 24 miliardi di euro e i costi operativi annui a circa 924 milioni di euro¹⁰³.

Queste cifre segnalano che una quota importante delle risorse per l'adattamento dovrebbe essere destinata proprio alla messa in sicurezza del sistema idrico e di difesa del suolo, in quanto primo “filtro” fisico rispetto a molte delle manifestazioni del rischio climatico.

10.1.2. Interazioni con infrastrutture di trasporto e insediamenti urbani

La rete idrica e fognaria è fortemente intrecciata con le infrastrutture di trasporto e gli insediamenti urbani. Alcuni meccanismi di interazione, emersi con particolare chiarezza negli studi, sono: *a)* i *flash flood* che saturano rapidamente canali e collettori fognari, causano possibili allagamenti di sottopassi, locali interrati, viabilità urbana e attività al piano strada; *b)* l'allagamento di sottopassi stradali e ferroviari, nodi di scambio e stazioni, che comporta interruzioni di traffico e rischi per l'incolumità delle persone; *c)* la compromissione dei sistemi di drenaggio lungo le infrastrutture lineari (fossi, cunette, collettori), che favorisce fenomeni di erosione, instabilità dei rilevati e danni a ponti e opere d'arte.

Per gestire questi rischi, gli studi propongono un'evoluzione delle infrastrutture idriche e di difesa del suolo verso reti “dinamiche” e interconnesse, gestite in tempo reale attraverso: modellistica idrologica e idraulica avanzata; sistemi di sensori diffusi e attuatori a controllo remoto; sistemi di supervisione e controllo centralizzati; integrazione sistematica

¹⁰³ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 226.

con sistemi GIS per condividere dati sulle condizioni ambientali e infrastrutturali. In altre parole, l'adattamento del sistema idrico e di drenaggio passa sempre di più attraverso l'innesto di una "pelle digitale" fatta di sensori, modelli previsionali e piattaforme di controllo, che consentono di anticipare gli impatti (pre-allerta) e di governare in tempo reale reti storicamente progettate per condizioni climatiche diverse.

10.2. Infrastrutture digitali e ICT (Information and Communication Technology)

Le infrastrutture digitali – reti di telecomunicazione, data center, sistemi cloud ed edge, sensoristica IoT (c.d. *Internet of Things*) – nel contesto considerato in questa sede risultano rilevanti almeno da due differenti punti di vista: *a*) innanzi tutto, sono anch'esse vulnerabili agli impatti climatici (ondate di calore, allagamenti, tempeste di vento, interruzioni dell'alimentazione elettrica); *b*) rappresentano, però, un fattore abilitante cruciale per la gestione del rischio climatico su tutte le altre infrastrutture, consentendo monitoraggio, previsione e possibili interventi in tempo reale¹⁰⁴.

10.2.1. Data center, reti di telecomunicazione e sensori

La documentazione analizzata¹⁰⁵ descrive, al riguardo, un quadro in rapida evoluzione. Per garantire la resilienza dei data center, le soluzioni attuali si basano su repliche locali o distribuite dei servizi, sincronizzate periodicamente, e su tecniche come il *checkpointing*¹⁰⁶ e la migrazione di macchine virtuali, che consentono di spostare carichi di lavoro tra server e siti diversi. Dal punto di vista energetico, nuove tecnologie hardware e software permettono di rendere più efficiente il consumo di energia, anche con la possibilità di accendere e spegnere rapidamente apparati di rete e di calcolo sulla base del carico effettivo. Infine, strategie come l'edge computing – cioè la distribuzione di calcolo e storage su piccoli data center – offrono opportunità aggiuntive di resilienza, perché consentono di ridurre la dipendenza da pochi grandi poli, facilitare l'evacuazione dei dati da siti a rischio e sfruttare condizioni microclimatiche più favorevoli per il raffreddamento.

Accanto ai data center, un ruolo centrale è svolto dalle reti di telecomunicazione e dalla sensoristica distribuita. L'estensione di reti in fibra ottica e la predisposizione di canalizzazioni e cavi lungo le principali infrastrutture (strade, ferrovie, reti idriche) rappresentano infatti un investimento a costi relativamente contenuti ma con ritorni elevati in termini di capacità di monitoraggio e controllo. Inoltre, la diffusione di sensori e data logger in grado di misurare in tempo reale livelli idrici, portate, deformazioni, temperature, vibrazioni e altri parametri critici, rende possibile un controllo continuo delle condizioni delle infrastrutture e del potenziale rischio climatico. Tuttavia, deve essere considerato anche che la penetrazione dell'*Internet of Things* (IoT) nelle infrastrutture critiche accresce anche la "superficie di attacco" dal punto di vista della *cybersecurity*: un attacco digitale ben orchestrato

¹⁰⁴ Commissione "Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili", *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 142.

¹⁰⁵ Commissione "Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili", *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 215.

¹⁰⁶ Tecnica di resilienza che consiste nel salvataggio periodico di uno *stato consistente* (checkpoint) di un'applicazione o di una macchina virtuale (es. memoria e stato di esecuzione), così da poter ripristinare il servizio e riprendere l'elaborazione dal punto salvato in caso di guasto o interruzione, riducendo tempi di recovery e perdita di lavoro.

può interrompere servizi e reti con effetti paragonabili – o superiori – a quelli di un evento fisico distruttivo.

10.2.2. Ruolo delle infrastrutture digitali per la gestione del rischio climatico

Le infrastrutture digitali possono svolgere un ruolo prezioso nelle politiche di adattamento, specie in alcuni ambiti strategici. In particolare, dalla documentazione esaminata emerge che:

- la realizzazione di sistemi di pre-allerta meteo-idrologica basati su modellistica meteorologica e idraulica avanzata, è in grado di individuare con maggiore precisione le aree a rischio di esondazione e flash flood e di allertare con utile preavviso la Protezione Civile, le amministrazioni locali e la popolazione;
- la gestione in tempo reale delle reti fognarie e del reticolo idraulico minore, attraverso modelli di rete, sensori e attuatori a controllo remoto, consente di modulare i flussi e di utilizzare in modo coordinato le capacità di laminazione e di drenaggio disponibili;
- integrando i dati di monitoraggio con le proiezioni climatiche e con informazioni su asset, popolazione e funzioni economiche, si può ottenere un costante aggiornamento delle mappe di pericolosità e di rischio;
- lo sviluppo di strumenti di *decision support* e di *digital twin* delle infrastrutture (strade, ferrovie, reti idriche, nodi logistici) permette di simulare scenari di impatto e di progettare strategie di adattamento più efficaci.

Sul piano economico, le misure di adattamento che fanno leva su infrastrutture digitali e di monitoraggio rientrano spesso tra quelle con un rapporto benefici/costi più elevato. Nel complesso del sistema infrastrutturale, si stima¹⁰⁷ che gli investimenti in adattamento – inclusi quelli per sensoristica, reti di comunicazione, sistemi di allerta e gestione – presentino un rapporto benefici-costi compreso tra 5 e 6, considerando sia i danni evitati che i benefici indiretti su produttività, occupazione e benessere.

10.3. Effetti a cascata e rischio sistemico

La combinazione tra infrastrutture idriche, di trasporto, energetiche e digitali genera un sistema altamente interconnesso, in cui un guasto o un malfunzionamento può propagarsi a cascata su più settori¹⁰⁸.

10.3.1. Blackout, interruzioni di servizio, blocchi logistici

Un primo gruppo di effetti a cascata riguarda i blackout e le interruzioni di servizio che si estendono oltre il settore originariamente colpito. Ciò in quanto: *a)* le infrastrutture energetiche dipendono dalle infrastrutture idriche (ad esempio per il raffreddamento nella generazione elettrica e nella raffinazione) e sono a loro volta essenziali per il funzionamento di trasporti, reti idriche, *data center* e sistemi di telecomunicazione; *b)* un evento meteo-climatico che danneggia linee elettriche, sottostazioni o impianti di produzione può quindi generare interruzioni diffuse di servizio nei settori dei trasporti, delle ICT, della distribuzione idrica e dei servizi urbani; *c)* un malfunzionamento delle reti di telecomunicazione o di un

¹⁰⁷ Global Commission on Adaptation - World Resources Institute, *Adapt Now: A Global Call for Leadership on Climate Resilience*, 2019.

¹⁰⁸ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 104.

data center può bloccare sistemi di segnalamento ferroviario, gestione di traffico stradale e aereo, controllo di reti idriche e impianti industriali, con effetti simili a quelli di un danneggiamento fisico diretto delle infrastrutture.

Sul piano logistico, interruzioni e danneggiamenti alle infrastrutture di trasporto e ai nodi logistici (porti, interporti, grandi *hub*) possono avere diverse conseguenze: blocchi o ritardi nelle catene di approvvigionamento, con effetti a catena sulla produzione industriale, sulla distribuzione di beni essenziali e sulla stabilità dei mercati; costi aggiuntivi per deviazioni, trasbordi, riprogrammazione dei flussi; riduzione temporanea o strutturale dell'attrattività di alcuni sistemi territoriali per nuovi investimenti.

Le valutazioni aggregate mostrano¹⁰⁹ che, considerando non solo i danni diretti alle infrastrutture ma anche gli effetti di seconda e terza grandezza sull'economia, il danno complessivo derivante da cambiamento climatico sulle infrastrutture potrebbe raggiungere:

- tra 2,3 e 8,7 miliardi di euro all'anno nel periodo 2020–2030 (circa 0,1–0,4% del PIL medio);
- tra 11,5 e 18 miliardi di euro all'anno nel 2050 (circa 0,33–0,55% del PIL), nello scenario climatico di riferimento.

Questi valori riflettono proprio la dimensione sistemica del rischio, in cui un danno iniziale su una porzione limitata di rete può amplificarsi attraverso le interdipendenze, generando perdite molto superiori al solo costo di riparazione dell'asset danneggiato.

10.3.2. *Impatti su sanità, istruzione, servizi urbani e coesione sociale*

Gli effetti a cascata non si limitano alla sfera economica, ma incidono in modo diretto su sanità, istruzione, servizi urbani e coesione sociale¹¹⁰.

Interruzioni delle reti di trasporto e dell'accesso alle strutture sanitarie durante ondate di calore o eventi alluvionali possono, ad esempio, causare un aumento della mortalità e della morbilità tra le fasce più vulnerabili della popolazione. Allagamenti e danni alle infrastrutture scolastiche e ai servizi educativi possono invece interrompere per periodi prolungati l'accesso all'istruzione, mentre blackout elettrici e interruzioni delle reti ICT possono compromettere il funzionamento di servizi urbani essenziali (illuminazione, semafori, gestione dei rifiuti, erogazione idrica, comunicazioni di emergenza).

Inoltre, i cambiamenti climatici e le vulnerabilità infrastrutturali rischiano di accentuare le disuguaglianze. Le regioni e i gruppi sociali più poveri tendono a subire perdite economiche proporzionalmente maggiori, poichè più esposti ai pericoli meteo-climatici e dotati di una minore capacità adattativa. In particolare, le regioni meridionali e le aree interne del nostro Paese risultano particolarmente vulnerabili, con livelli attesi di riduzione del PIL più elevati rispetto alla media nazionale. Anche le città sono comunque luoghi in cui si concentra una parte rilevante della popolazione fragile (anziani, persone a basso reddito, lavoratori in settori esposti), e in cui gli impatti sui servizi infrastrutturali possono tradursi in forti tensioni sociali.

¹⁰⁹ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità. Soluzioni e strategie per gli investimenti infrastrutturali in un contesto di adattamento ai cambiamenti climatici e di mitigazione delle emissioni di gas-serra*, cit. p. 19.

¹¹⁰ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità. Soluzioni e strategie per gli investimenti infrastrutturali in un contesto di adattamento ai cambiamenti climatici e di mitigazione delle emissioni di gas-serra*, cit. p. 166.

In questa prospettiva, la gestione delle interdipendenze tra infrastrutture idriche, digitali, energetiche, di trasporto e servizi essenziali non è solo una questione tecnica, ma una politica di coesione e di equità.

11. Valutazione economica degli impatti e dei fabbisogni di adattamento delle infrastrutture

Il quadro delineato nei capitoli precedenti – pericoli in crescita, vulnerabilità diffuse, interdipendenze tra reti – si traduce in una dimensione economica molto rilevante. Gli studi analizzati quantificano con un buon livello di dettaglio sia i danni attesi del cambiamento climatico sulle infrastrutture e sui sistemi di trasporto, sia i fabbisogni di investimento in misure di adattamento, mettendo a fuoco il rapporto tra costi e benefici della resilienza.

11.1. Danni attesi alle infrastrutture e all'economia

Una prima stima riguarda i danni diretti alle infrastrutture, cioè i costi di riparazione o ricostruzione degli asset fisici danneggiati da eventi meteo-climatici. Per il complesso delle infrastrutture in Italia, le analisi¹¹¹ riportano che nel periodo 1981–2010 il valore medio annuo del danno diretto è stato di circa 0,42 miliardi di euro/anno, ma nello scenario climatico di riferimento questo valore è destinato a crescere fino a circa 2 miliardi di euro/anno nel periodo 2020–2030, e a circa 5 miliardi di euro/anno nel periodo 2040–2050. Si tratta di un aumento di oltre dieci volte rispetto al valore storico medio.

Il settore dei trasporti è quello in cui l'incremento del danno diretto è destinato a risultare più marcato. L'attuale danno annuo atteso (EAD) sulle infrastrutture di trasporto è stimato intorno a 0,15 miliardi di euro/anno ma, come già scritto, nelle proiezioni al 2020 e 2050¹¹², questo valore potrebbe superare rispettivamente 1,08 miliardi di euro/anno e 2,80 miliardi di euro/anno, con una crescita relativa nell'ordine del +736% e del +1.900% rispetto alla *baseline*¹¹³.

Andamenti analoghi, seppure con livelli assoluti diversi, vengono riportati per il settore energia, per cui l'EAD attuale di 0,04 miliardi di euro/anno potrebbe salire a 0,57 miliardi di euro/anno nel 2050 (circa +1.300%), e per il comparto industria, per cui l'EAD passerebbe dagli 0,23 miliardi di euro/anno attuali a 1,79 miliardi di euro/anno nel 2050 (circa +700%).

Oltre all'entità complessiva, cambierà anche il peso dei diversi eventi meteo-climatici estremi nel computo totale dei danni: mentre oggi circa il 58% dei danni alle infrastrutture è associato alle esondazioni fluviali, nelle proiezioni al 2050 fino al 92% dei danni potrebbe essere legato a siccità e ondate di calore.

In sintesi, già in assenza di effetti di sistema sull'economia, i soli danni diretti alle infrastrutture mostrano una dinamica di crescita molto marcata, soprattutto nel settore dei trasporti.

¹¹¹ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 226.

¹¹² Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità. Soluzioni e strategie per gli investimenti infrastrutturali in un contesto di adattamento ai cambiamenti climatici e di mitigazione delle emissioni di gas-serra*, cit. p. 155.

¹¹³ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità. Soluzioni e strategie per gli investimenti infrastrutturali in un contesto di adattamento ai cambiamenti climatici e di mitigazione delle emissioni di gas-serra*, cit. p. 227.

Ma gli studi economici¹¹⁴ evidenziano che i danni diretti alle infrastrutture rappresentano solo una parte del problema. Interruzioni dei servizi, blocchi della mobilità, interruzioni di filiere e catene logistiche generano danni indiretti sull'insieme dell'attività economica. Quando si tiene conto degli effetti a cascata sul PIL, le stime riportano che:

- nel periodo 2020–2030, il danno legato alle infrastrutture – diretto più indiretto – è stimato tra 2,3 e 8,7 miliardi di euro/anno, pari a circa 0,1–0,4% del PIL medio;
- nel 2050, la perdita annua potrebbe attestarsi tra 11,5 e 18 miliardi di euro, equivalenti a circa 0,33–0,55% del PIL;
- considerando le ulteriori ripercussioni sistemiche non pienamente catturate dai modelli settoriali, il danno complessivo risulta circa il doppio rispetto ai soli danni diretti.

Inoltre, le simulazioni a scala regionale indicano che una parte significativa dei danni alle infrastrutture si concentra nelle regioni meridionali, che mostrano perdite relative di PIL più elevate rispetto alla media nazionale;

Nel complesso, la valutazione economica degli impatti conferma che l'inazione o il ritardo nell'adattamento delle infrastrutture comporta conseguenze non trascurabili: produce infatti un progressivo drenaggio di risorse dal sistema economico, amplificando nel tempo divari territoriali e vulnerabilità settoriali.

11.2. Fabbisogni di investimento in adattamento

Accanto alla quantificazione dei danni, gli studi forniscono valutazioni – pur con margini di incertezza – sui fabbisogni di investimento necessari per adeguare le infrastrutture agli scenari climatici futuri.

11.2.1. Stime aggregate per l'Italia

In primo luogo, a scala internazionale, alcune stime¹¹⁵ indicano per i paesi sviluppati una spesa necessaria addizionale per l'adattamento fino al 2030 nell'ordine di 6.997 miliardi di dollari, di cui circa 4.960 miliardi in infrastrutture. Applicando una quota proporzionale al peso dell'Italia nel PIL dei Paesi OCSE, si ottiene un fabbisogno indicativo di circa 12 miliardi di euro al 2030 per l'Italia, di cui 10 miliardi riferiti alle infrastrutture¹¹⁶.

Stime più mirate al caso italiano, focalizzate sui danni diretti alle infrastrutture, convergono su ordini di grandezza analoghi, con maggiore articolazione temporale:

- per far fronte ai cambiamenti climatici attesi entro il 2030–2040, gli investimenti in adattamento necessari per evitare i soli danni diretti alle infrastrutture vengono stimati in circa 8 miliardi di euro, a cui si aggiunge un costo operativo e di manutenzione di circa 604 milioni di euro/anno;
- tali interventi renderebbero le infrastrutture resilienti al clima fino al 2040;

¹¹⁴ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità. Soluzioni e strategie per gli investimenti infrastrutturali in un contesto di adattamento ai cambiamenti climatici e di mitigazione delle emissioni di gas-serra*, cit. p. 154.

¹¹⁵ UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change, *Investment and Financial Flows to Address Climate Change*, UNFCCC Secretariat, Bonn, ottobre 2007.

¹¹⁶ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili” (Presidente: Carlo Carraro), *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità. Soluzioni e strategie per gli investimenti infrastrutturali in un contesto di adattamento ai cambiamenti climatici e di mitigazione delle emissioni di gas-serra*, cit. p. 19.

- per estendere l'orizzonte di resilienza fino al 2070, coerente con la vita economica utile delle opere, sarebbe necessario un costo di capitale iniziale di quasi 24 miliardi di euro, con un costo operativo e di manutenzione annuo di circa 924 milioni di euro.

In modo semplificato, è possibile osservare come le valutazioni convergano nell'indicare un fabbisogno medio dell'ordine di 1 miliardo di euro/anno per le sole infrastrutture fino al 2030 e un fabbisogno dell'ordine di 2 miliardi di euro/anno tra il 2030 e il 2050 per proseguire e consolidare gli interventi, sempre nello scenario di riferimento.

Questi importi vanno letti in relazione ai danni evitabili: a fronte di un danno potenziale diretto sulle infrastrutture che sale da 0,42 miliardi/anno storici a circa 5 miliardi/anno nel 2040–2050, e di un danno complessivo, diretto più indiretto, che può arrivare a 11,5–18 miliardi/anno (0,33–0,55% del PIL), l'ordine di grandezza dei fabbisogni di investimento in adattamento risulta nettamente inferiore.

11.3. Costi e benefici delle misure di resilienza

Le valutazioni economiche delle misure di adattamento adottano l'ottica del cosiddetto “triplo dividendo”, che considera simultaneamente tre diverse variabili: *a*) i danni evitati, in termini di riduzione dei danni diretti e indiretti generati dagli eventi climatici; *b*) l'effetto espansivo degli investimenti, in termini di impatto positivo sul PIL e sull'occupazione derivante dalla realizzazione delle opere; *c*) i co-benefici sociali e ambientali in termini di miglioramento della qualità dell'aria, riduzione degli impatti sanitari, minore disuguaglianza, benefici per gli ecosistemi.

In questa prospettiva, le analisi riportano che gli investimenti in adattamento fino al 2030-2040 e quelli necessari a estendere la resilienza al 2070 presentano un rapporto benefici/costi molto elevato, stimato tra 5 e 6 a seconda del tipo di intervento¹¹⁷. Inoltre, nel periodo 2020-2030, a fronte di danni infrastrutturali potenziali stimati tra 2,3 e 8,7 miliardi di euro/anno, l'adozione di misure di adattamento può evitare una quota significativa di tali perdite “ad un costo circa cinque volte inferiore a quello del danno evitato”¹¹⁸. In ultimo, su orizzonti più lunghi (2050), ogni euro speso oggi in resilienza climatica delle infrastrutture genera benefici complessivi pari a quasi 5 euro in termini di danni evitati e crescita addizionale, evidenziando un forte effetto moltiplicativo degli investimenti in adattamento.

12. La prospettiva dell'adattamento e della mitigazione per settore energetico e infrastrutture (cenni)

L'impatto crescente dei cambiamenti climatici e, al contempo, la trasformazione del sistema energetico, richiedono un approccio che contempli sia interventi di adattamento, inteso come rafforzamento della resilienza delle infrastrutture, delle filiere e dei modelli operativi, sia interventi di mitigazione, da interpretare come riduzione delle emissioni e accelerazione della transizione verso un sistema decarbonizzato.

¹¹⁷ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 226.

¹¹⁸ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità*, cit. p. 232.

Per un'opportuna opera di adattamento appare fondamentale integrare livelli diversi di intervento – infrastrutturale, operativo, digitale e regolatorio – in un modello unitario di gestione del rischio climatico nel settore elettrico. L'adattamento richiede, quindi, standard e politiche che includano l'aspetto climatico, e in particolare:

- l'aggiornamento dei criteri di localizzazione delle infrastrutture in base ai rischi idrogeologici;
- l'integrazione della valutazione di rischio climatico nei processi autorizzativi;
- l'utilizzazione di indicatori climatici nelle analisi costi-benefici dei progetti.

Rilevante è però anche il nesso acqua-energia, poiché la disponibilità idrica condiziona sia la produzione idroelettrica sia il raffreddamento termoelettrico. Per favorire l'adattamento del settore energetico vi sono comunque diverse soluzioni tecnologiche, tra cui in particolare:

- i. smart grid e automazione: le reti intelligenti consentono una gestione dinamica e distribuita dei flussi, favorendo l'integrazione delle rinnovabili e riducendo i tempi di interruzione. L'estensione di automazione e digitalizzazione nelle aree a rischio può ridurre sensibilmente l'impatto di eventuali disservizi;
- ii. accumuli: gli storage aumentano stabilità e flessibilità, compensano i picchi estivi e bilanciano la variabilità rinnovabile in condizioni meteo avverse;
- iii. edilizia e climatizzazione: l'aumento delle temperature estive richiede misure di raffrescamento passivo e automazione degli edifici (isolamento avanzato, facciate ventilate, tetti riflettenti, ventilazione naturale, sensori IoT);
- iv. microgrid e Comunità Energetiche Rinnovabili (CER): combinando generazione distribuita, accumulo e consumo locale, rafforzano la continuità di fornitura anche in caso di disservizi della rete principale.

Sul piano regolatorio, appare invece utile l'introduzione di indicatori di resilienza climatica e di qualità del servizio nelle metriche riconosciute in tariffa perché consentono di premiare e incentivare gli operatori che investono in prevenzione e riduzione del rischio. Gli impatti climatici e la transizione energetica generano poi rischi anche sul piano economico-finanziario: incremento strutturale dei costi, volatilità dei mercati, vulnerabilità sociale e rischi per gli investimenti. In tal senso, l'adattamento si può realizzare attraverso l'introduzione di metriche e strumenti di finanza sostenibile: integrazione dei rischi fisici e di transizione in linea con raccomandazioni TCFD; emissioni di green bond e sustainability-linked bond con indicatori di performance anche legati alla resilienza (riduzione dei blackout climatici, incremento di capacità resiliente).

La mitigazione si intreccia invece con la sicurezza energetica attraverso la riduzione della dipendenza dalle fonti fossili e la crescita delle rinnovabili. Per l'Italia, ciò significa soprattutto:

- I. diversificazione delle importazioni fossili e potenziamento delle infrastrutture (incluse interconnessioni mediterranee e terminali GNL);
- II. autonomia rinnovabile con sviluppo massiccio di fotovoltaico ed eolico, incluso l'offshore, rilevante per la futura capacità installata.

Tuttavia, la transizione genera nuove vulnerabilità: tecnologie rinnovabili e accumuli dipendono da materie prime critiche e catene di approvvigionamento esposte anche a rischio climatico (eventi estremi in Paesi produttori o nei porti di transito), con possibili impatti su costi e tempi di consegna.

Per quel che riguarda infrastrutture e mobilità, appare invece evidente come il rischio climatico non costituisca più semplicemente un profilo "aggiuntivo" degli investimenti da

considerare, bensì una dimensione strutturale della loro programmazione e gestione. In tale contesto, le politiche pubbliche sono chiamate a ridurre vulnerabilità ed esposizione, garantire la continuità dei servizi essenziali e orientare nuove opere e riqualificazioni verso standard coerenti con gli scenari climatici futuri, integrando adattamento e mitigazione ed evitando fenomeni di mal-adattamento¹¹⁹.

Partendo da tali presupposti, dal punto di vista delle misure¹²⁰ gli studi¹²¹ convergono su una tassonomia funzionale che consente di costruire pacchetti integrati e coerenti.

Le **misure c.d. “grey”** includono interventi di adeguamento fisico di opere e reti (ad esempio adeguamenti idraulici di attraversamenti e collettori, difese costiere, consolidamenti di versanti e rilevati, protezione di opere portuali, interventi su nodi e sottopassi per ridurre vulnerabilità ad allagamenti e stress termico). Le **misure c.d. “green”** valorizzano soluzioni basate sulla natura, quali ripristino di aree di esondazione, riqualificazione di zone umide e fasce ripariali, rinaturalizzazione costiera e incremento della permeabilità urbana, con effetti combinati sulla riduzione del rischio idrogeologico, sul microclima e sui servizi ecosistemici. Le **misure c.d. “soft”** invece riguardano l'aggiornamento di strumenti regolatori e di pianificazione (localizzazioni e vincoli nelle aree a pericolosità elevata, standard tecnici che incorporano carichi climatici, piani di emergenza e continuità operativa), nonché l'impiego di leve economiche e assicurative volte a incentivare prevenzione e investimenti privati in resilienza.

Accanto a tali misure, un ruolo decisivo è svolto dalle azioni trasversali, che costituiscono il “capitale immateriale” dell'adattamento: basi dati integrate *clima-hazard-asset*, programmi di ricerca e innovazione su materiali e tecniche resilienti, standard metodologici condivisi per valutazione e monitoraggio, nonché formazione e rafforzamento delle competenze nelle amministrazioni e presso i gestori.

Per rendere tali strategie effettivamente operative, gli studi indicano l'esigenza di rafforzare strumenti di analisi e di gestione lungo tre direttrici: i) disponibilità e integrazione dei dati (*data hub* climatici e infrastrutturali) per analisi multi-rischio e *multi-asset*; ii) digitalizzazione e capacità predittive (*digital twin*, sensoristica e monitoraggio in continuo, sistemi di *early warning*) per passare da un approccio reattivo ex post a una gestione proattiva; iii) definizione di indicatori di resilienza e protocolli di monitoraggio periodico per misurare esposizione, vulnerabilità e capacità adattativa e valutare l'efficacia delle misure nel tempo.

In questo quadro, il *climate proofing* degli investimenti costituisce la condizione essenziale affinché l'adattamento non resti confinato a iniziative “ad hoc”, ma diventi parte ordinaria dei processi di programmazione e valutazione. In coerenza con gli orientamenti europei, il *climate proofing* è richiamato lungo l'intero ciclo di vita dei progetti: in fase di programmazione, includendo il rischio climatico tra i criteri di selezione e verificando la coerenza con SNAC, PNACC e piani territoriali; in fase di progettazione ex ante, valutando l'esposizione attuale e futura, testando opzioni resilienti e stimando costi e benefici (danni evitati); in fase di valutazione, integrando il rischio climatico nell'analisi costi-benefici e

¹¹⁹ Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili”, *Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità. Soluzioni e strategie per gli investimenti infrastrutturali in un contesto di adattamento ai cambiamenti climatici e di mitigazione delle emissioni di gas-serra*, cit. p. 178.

¹²⁰ EEA – Climate-ADAPT (catalogo delle misure di adattamento).

¹²¹ European Environment Agency (EEA), *Urban adaptation to climate change in Europe 2016 — Transforming cities in a changing climate*, 2016.

verificando standard di resilienza; in fase di realizzazione e gestione, assicurando coerenza esecutiva e manutenzione orientata agli scenari e ai risultati del monitoraggio.

Gli studi sottolineano, infine, che l'adattamento non è soltanto una questione tecnica: governance e finanza rappresentano il principale moltiplicatore della resilienza. Diventa necessario passare da iniziative episodiche a strutture stabili in grado di integrare sistematicamente il rischio climatico nei processi ordinari, garantendo basi dati robuste, metodologie uniformi e supporto tecnico continuo. In tal senso, la SNAC valorizza una *governance* multi-livello e partecipativa, fondata su strumenti di coordinamento e su piattaforme per la standardizzazione e la diffusione di dati, indicatori e buone pratiche.

Sul versante finanziario, la trasformazione richiede un mix di risorse e leve. In primo luogo, risorse pubbliche e programmazione ordinaria – nazionali e europee – devono incorporare criteri di selezione che tengano conto del rischio climatico e prevedere requisiti di *climate proofing* per gli investimenti rilevanti, destinando quote dedicate anche all'adeguamento climatico di infrastrutture esistenti. In secondo luogo, la progressiva applicazione di standard europei in materia di tassonomia e informativa sul rischio climatico può attivare capitali privati verso progetti resilienti, rendendo centrale la cooperazione pubblico–privato. In terzo luogo, strumenti economici, fiscali e assicurativi possono spostare il baricentro dalla copertura *ex post* dei danni a un approccio *ex ante*, premiando prevenzione e riduzione del rischio residuo.

In termini operativi, le amministrazioni centrali sono chiamate a rafforzare capacità tecnico-scientifiche permanenti, integrare analisi climatiche ed economiche nella programmazione e rendere ordinario il *climate proofing*; Regioni e città devono includere il rischio climatico nei piani territoriali e della mobilità, contribuendo a basi dati e mappe integrate di rischio; gestori e operatori devono incorporare il rischio climatico nei piani industriali e di investimento, adottando monitoraggio, *digital twin* e piani di continuità operativa.

In conclusione, con basi dati condivise, standard comuni, *climate proofing* ordinario e strumenti finanziari coerenti, l'adattamento può evolvere da somma di interventi puntuali a strategia integrata e continuativa, capace di proteggere infrastrutture e mobilità nel tempo e, al contempo, sostenere la traiettoria di decarbonizzazione delineata a livello europeo.