Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Architettura Costruzione Città

A.A. 2019/2020

Tesi di Laurea Magistrale

Changing buildings for a changing climate

Valutazione degli effetti del cambiamento climatico
sulle prestazioni energetiche degli edifici

Relatore:

Prof. Enrico Fabrizio

Candidato:

Andrea Tolve

Corelatore:

Ph.D. Maria Ferrara

Abstract

In recent years, climate change is showing its effects on natural and anthropized environment more and more evidently: this thesis paper aims to investigate their projected and now inevitable implications for architecture and buildings and construction sector, focusing in particular on the energy performances of buildings in response to these stresses.

First, the general aspects of climate change are exposed, from its scientific foundations, with the anthropogenic emissions of greenhouse gases irrefutably recognized as its main cause, to the contrast strategies known as mitigation and adaptation, up to their implementation at political-institutional level. The reciprocal relationship between climate change and buildings and construction sector is then analysed: on the one hand, the latter is decisive for world energy consumption and greenhouse gas emissions, on the other hand, it is very exposed to the aforementioned more and more extreme impacts, of which, however, it offers great mitigation potential and requires effective adaptation strategies. The next chapter is dedicated to the fundamental prediction of future climatic conditions, based on different generation methods, on greenhouse gas emissions scenarios and on atmospheric circulation models. A critical review of the scientific literature follows on the subject of the effects of climate change on buildings energy performances, which highlights, in extreme synthesis, the progressive shift of needs and consumption from heating to cooling indoor environments.

In the final chapter, through the methodology of dynamic energy simulation, the performance of a case study in the Turin area, a typical multi-family residential building, representative of the stock of climatic zone E, is assessed, applying, in succession, projected climate change in Turin and some retrofit interventions consistent with national regulations, including the implementation of an active cooling system, a solution that proved necessary in temperate climate contexts due to global warming.

Abstract

Negli ultimi anni, il cambiamento climatico sta manifestando in modo sempre più evidente i suoi effetti su ambiente naturale e antropizzato: il presente elaborato di tesi intende indagarne le implicazioni previste e ormai inevitabili sull'architettura e il settore edile, focalizzandosi in particolare sulle prestazioni energetiche degli edifici in risposta a tali sollecitazioni.

In primo luogo, si espongono gli aspetti generali del cambiamento climatico, dai suoi fondamenti scientifici, con le emissioni antropogeniche di gas a effetto serra inconfutabilmente riconosciute quali sua causa principale, alle strategie di contrasto note come mitigazione e adattamento, fino alla loro attuazione a livello politico-istituzionale. Viene quindi analizzato il reciproco rapporto tra il cambiamento climatico e il settore edile: da un lato, quest'ultimo è decisivo per i consumi energetici mondiali e le emissioni di gas serra, dall'altro, è molto esposto ai suddetti impatti sempre più estremi, di cui però offre grandi potenzialità di mitigazione e richiede efficaci strategie di adattamento. Il capitolo successivo è dedicato alla fondamentale previsione delle condizioni climatiche future, basata su diversi metodi di generazione, sugli scenari di emissioni di gas serra e sui modelli di circolazione atmosferica. Segue una revisione critica della letteratura scientifica sul tema degli effetti del cambiamento climatico sulle prestazioni energetiche degli edifici, che evidenzia, in estrema sintesi, lo spostamento progressivo dei fabbisogni e dei consumi dal riscaldamento al raffrescamento degli ambienti interni.

Nel capitolo conclusivo, attraverso la metodologia della simulazione energetica dinamica, si valutano le performance di un caso studio in area torinese, un edificio residenziale plurifamiliare tipo, rappresentativo dello stock della zona climatica E, applicando, in successione, i cambiamenti climatici previsti a Torino e alcuni interventi di retrofit coerenti con le normative nazionali, tra cui l'implementazione di un impianto di raffrescamento attivo, soluzione rivelatasi necessaria nei contesti climatici temperati a causa del riscaldamento globale.

Ringraziamenti

Vorrei dedicare il presente lavoro a mio nonno Andrea, che ci ha da poco lasciati, ricordandolo e ringraziandolo per tutti i valori e gli insegnamenti che mi ha trasmesso.

Ringrazio il Professor Fabrizio per il tema propostomi, che mi ha permesso di sviluppare nuove conoscenze e competenze, e per la costante e attenta guida in tutto il percorso di ricerca ed elaborazione della tesi.
Ringrazio la Dottoressa Ferrara per l'analogo supporto, i preziosi consigli metodologici e i continui confronti e suggerimenti.

Ringrazio la mia famiglia per avermi sempre sostenuto e spronato durante il mio percorso universitario e nel raggiungimento del titolo conclusivo, tra fatica, gioia, soddisfazione e difficoltà.

Ringrazio i miei amici di sempre, con cui ho condiviso momenti ed emozioni impagabili in questi anni.

Ringrazio colleghi e compagni di viaggio al Poli, tra cui molti veri amici, per il fondamentale scambio di pensieri, visioni e abilità nelle innumerevoli attività collettive, che sento determinanti per la persona che sono oggi.

Indice

Introduzione 9

1. Cambiamento climatico 13
Un fenomeno complesso
Fondamenti scientifici 17
Mitigazione e adattamento 37
Piani d'azione 45

2. Cambiamento climatico e ambiente costruito 51
Un rapporto reciproco
Impatto del settore edile sul cambiamento climatico 55
Effetti del cambiamento climatico sugli edifici 61
Strategie di progetto in risposta al cambiamento climatico 65

3. Previsione dei dati climatici futuri 69
Scenari, modelli, metodi
Scenari di emissioni 73
Modelli climatici 79
Metodi di generazione 83

4. Effetti del cambiamento climatico sulle prestazioni energetiche degli edifici 89
Processo di costruzione di conoscenza dalla letteratura esistente
Approccio al cambiamento climatico 93
Metodi e strumenti di valutazione 105
Strategie di intervento e risultati 113
Questioni aperte 125

5. Effetti del cambiamento climatico in area torinese 135
Applicazione a un caso studio locale
Caso studio 139
Dati climatici attuali e futuri 147
Metodi e strumenti di valutazione 151
Strategie di intervento e risultati 155

Conclusioni 175

Bibliografia 177

Introduzione

«Climate change is no longer some far-off problem.
It is happening here. It is happening now».[1]

Negli ultimi anni, il dibattito in merito al cambiamento climatico ha assunto un ruolo sempre più di centrale nell'opinione pubblica, dopo essere stato per troppo tempo ignorato e le sollecitazioni ad agire della comunità scientifica tacciate di allarmismo, minimizzando colpevolmente la gravità della questione. Il tema della protezione ambientale e quello strettamente connesso della riduzione degli impatti delle attività antropiche sugli equilibri del pianeta Terra, che da decenni impegna le potenze mondiali in trattati e convenzioni mai pienamente efficaci, ha visto l'appoggio di figure emergenti e sorprendenti: dalla giovane attivista svedese Greta Thunberg, fenomeno mediatico dal 2018, che con il suo *Skolstrejk för klimatet* mobilita milioni di studenti a manifestare in favore del clima, all'Enciclica *Laudato si'* di Papa Francesco, che invita tutti a prendersi cura della "casa comune" in cui viviamo.
La frase iniziale, citata da un discorso dell'ex Presidente statunitense Barack Obama, aldilà dell'opinione politica, è efficace per la sua stringente semplicità nel ribadire gli effetti già in atto e ormai in certa misura inevitabili del cambiamento climatico su scala globale.

Le implicazioni delle anomalie climatiche investono tutti i settori delle attività umane e l'ambiente costruito è molto spesso lo sfondo e altresì la causa di tali processi: il presente elaborato di tesi considera proprio il rapporto reciproco tra cambiamento climatico e costruito, nella sua componente edile-architettonica, contemporaneamente responsabile degli impatti umani sul

[1] «Il cambiamento climatico non è più un problema lontano. Sta accadendo qui. Sta accadendo adesso.»; B. Obama, discorso in occasione della conferenza GLACIER tenutasi ad Anchorage, Alaska, il 31/08/2015.

clima, con consumi energetici ed emissioni di gas a effetto serra, ed esposta alle sollecitazioni di un clima sempre più estremo.
Il tema centrale è la valutazione di tali effetti sulle prestazioni energetiche degli edifici, un campo di ricerca recente che si contamina di saperi e conoscenze eterogenei, dalla fisica tecnica alla tecnologia, dall'economia alla climatologia, finalizzandone i contributi in strategie di intervento e costruttive per i progettisti.
La trattazione prende avvio dalle basi teoriche e scientifiche dal cambiamento climatico, proseguendo con gli approcci complementari di mitigazione e adattamento, fondamentali per contrastarne gli impatti più violenti, e una panoramica storica delle decisioni politiche e istituzionali sulla questione.
Quindi, si affronta la suddetta relazione biunivoca tra cambiamento climatico e settore edile, che offre grandi potenzialità di efficientamento delle risorse per ridurre gli effetti antropogenici sul clima, ma richiede contestuali ed efficaci strategie di resilienza.
A tal proposito, un processo indispensabile è rappresentato dalla previsione dei dati climatici futuri, di cui sono discusse le metodologie più diffuse e funzionali in ottica edile-energetica, i modelli atmosferici e terrestri di simulazione e gli scenari di emissioni climalteranti, indici del tipo di sviluppo sociale ed economico intrapreso dall'umanità.
Per approfondire il tema degli effetti del cambiamento climatico sulle prestazioni energetiche degli edifici, è stata svolta un'analisi critica e originale della letteratura esistente, che è al contempo un risultato della presente ricerca, inteso come costruzione di conoscenza per ulteriori sviluppi futuri, rivelatasi decisiva per lo studio applicativo successivo nell'individuazione dei punti aperti da provare ad affrontare.
L'obiettivo principale del presente lavoro è la dimostrazione della necessità di controllare attivamente le condizioni microclimatiche interne agli ambienti costruiti, in modo particolare in estate a fronte del crescente riscaldamento globale. Attraverso la simulazione energetica dinamica e le teorie del comfort termico adattivo, si valutano gli effetti combinati del cambiamento climatico e

di strategie di riqualificazione su un caso studio torinese, un edificio multifamiliare esistente, indagandone le implicazioni costruttive, energetiche e di emissioni sul patrimonio costruito urbano e regionale.

Infine una riflessione in questo 2020 di pandemia da Covid-19, che ha mostrato la fragilità dei sistemi antropizzati e probabilmente la loro insostenibilità per l'ambiente naturale, e che, paradossalmente in una crisi simile, potrebbe favorire un ripensamento dei modelli di sviluppo e di sfruttamento delle risorse, in cui anche la lotta al cambiamento climatico sia percepita pienamente per la sua importanza.

1. Cambiamento climatico

Un fenomeno complesso

> *«Human influence on the climate system is clear, and recent anthropogenic emissions of greenhouse gases are the highest in history. Recent climate changes have had widespread impacts on human and natural systems».*[1]

Come introdotto in precedenza, il cambiamento climatico è il grande tema del nostro tempo e una sfida globale che riguarda tutti i Paesi e le popolazioni, in misura molto più uniforme ed equamente distribuita di altre crisi sociali, culturali o economiche verificatesi in passato.

Alla base del fenomeno è ormai innegabile la responsabilità diretta delle attività umane, che già a partire dall'industrializzazione del XVIII secolo, e in modo sempre più estremo negli ultimi cinquant'anni, si impongono in modo univoco sul mondo naturale, troppo spesso non curandosi degli impatti provocati e rimandando alle generazioni future le necessarie azioni di contenimento o inversione degli stessi, quando con ogni probabilità la situazione sarà irrimediabilmente compromessa.

Nonostante le evidenze scientifiche, permane un paradossale e grottesco scetticismo non solo in merito alle cause, ma perfino sull'esistenza stessa del problema, che se relegato a pseudo-teorie negazioniste risulta anche comico,

[1] «L'influenza umana sul sistema climatico è evidente, e le recenti emissioni antropogeniche di gas serra sono le più alte nella storia. I recenti cambiamenti climatici hanno avuto impatti diffusi sui sistemi umani e naturali.»; IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, [Core Writing Team, R.K. Pachauri, L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginevra, Svizzera, p. 40.

ma sostenuto da personaggi di enorme rilevanza negli assetti geopolitici mondiali, tra gli altri i Capi di Stato statunitense Donald Trump e brasiliano Jair Bolsonaro, ovviamente soltanto per mantenere invariati i tenori di profitto economico e di sfruttamento delle risorse, diventa un pesante ostacolo nella limitazione dei danni già in parte inevitabili.
Comunque tale approccio non ruberà altro spazio nella trattazione, che al contrario in questo primo capitolo si concentra proprio sui fondamenti fisici ormai ampiamente dimostrati del cambiamento climatico, sulle strategie di contrasto e sugli impegni istituzionali per attuarle.

Nel percorso di studi che si conclude con la presente tesi, vi sono stati frequenti cenni agli argomenti in questione, ma per i contenuti presentati nel seguito e per approfondirne gli aspetti più teorici e scientifici in modo più esaustivo, è stata fondamentale in primo luogo una lezione tenuta dal Professore Emerito Gian Vincenzo Fracastoro, nell'ambito del Master di Secondo Livello *Techs 4 Change: Design for Social and Technological Innovation in Development*, presso il Politecnico di Torino nel dicembre 2019; quindi, per ulteriori spunti di riflessione, si è rivelato molto utile anche il precedente ciclo di incontri *Envi4Future*, svoltosi presso l'Environment Park di Torino nell'autunno 2019.
Tra le pubblicazioni vere e proprie, la principale fonte è sicuramente il Quinto Rapporto di Valutazione dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), l'organismo delle Nazioni Unite che raccoglie gli esiti delle ricerche internazionali sul cambiamento climatico, il cui programma è ripreso nell'organizzazione dei paragrafi del presente capitolo:

- valutare le conoscenze scientifiche relative al fenomeno, ai suoi impatti e rischi;
- definire le strategie di adattamento e mitigazione degli stessi;
- fornirne rapporti dettagliati ai governi per stabilire le politiche nazionali e internazionali per affrontarli.[2]

[2] L'obiettivo dell'IPCC, come dichiarato sul sito ufficiale: https://www.ipcc.ch/about/.

La citazione iniziale è il primo enunciato estratto proprio dal Rapporto di Sintesi (2014)[3] del più recente di tali resoconti, che ribadisce come la comunità scientifica internazionale abbia ormai inconfutabilmente dimostrato la stretta dipendenza del cambiamento climatico dalle attività umane, in particolare sottoforma di emissioni di gas a effetto serra.

Il clima terrestre è ovviamente in costante mutamento già per cause naturali intrinseche, secondo diverse scale temporali e spaziali, dalle condizioni meteorologiche giornaliere al ciclo delle stagioni durante l'anno, dalla posizione geografica alle caratteristiche del territorio in cui ci si trova, fino agli effetti dei fenomeni astronomici non osservabili in tempi umani. Tuttavia i fattori antropogenici stanno determinando in maniera decisiva il comportamento climatico attuale e futuro, con rapida accelerazione e inedita estremizzazione della sua variabilità, dalle conseguenze persino ignote e imprevedibili nel lungo termine.

A livello generale, le emissioni di gas serra e le relative concentrazioni in atmosfera aumentano il noto effetto serra, con il conseguente riscaldamento globale, a sua volta causa di fenomeni concatenati quali la desertificazione, lo scioglimento dei ghiacciai e l'innalzamento del livello degli oceani; tali alterazioni possono però diventare a loro volta agenti determinanti di ulteriori emissioni ad effetto serra, in un'inversione della causalità e in un'amplificazione dei reciproci impatti definita "feedback climatico"[4], ossia retroazioni del sistema che influenzano il funzionamento del sistema stesso[5], e che rendono quindi ancora più urgenti efficaci strategie di contenimento e adattamento.

[3] IPCC, 2014, *op. cit.*

[4] Galbiati, F., 2019. Incendi in Siberia e il concetto di "feedback climatico". Da *Icona Clima*, pubblicato online 01/08/2019; accessibile al sito https://www.iconaclima.it/salute-del-pianeta/temperature/incendi-in-siberia-e-il-concetto-di-feedback-climatico/.

[5] Definizione da vocabolario *Treccani*, accessibile online al sito https://www.treccani.it/vocabolario/feedback/.

Fondamenti scientifici

> *«Warming of the climate system is unequivocal, and since the 1950s, many of the observed changes are unprecedented over decades to millennia. The atmosphere and ocean have warmed, the amounts of snow and ice have diminished, and sea level has risen».* [6]

La prima sezione del presente capitolo analizza le evidenze scientifiche in tema di cambiamento climatico: partendo dalle anomalie nelle condizioni atmosferiche e terrestri rilevate negli ultimi decenni, se ne riportano quindi le cause dimostrate e gli ulteriori effetti previsti per il futuro, legati agli scenari di sviluppo sociale ed economico che l'umanità sceglierà di seguire.
Considerando le variazioni dei dati climatici nel recente passato, ci si rende conto dell'eccezionalità dell'epoca contemporanea per l'impatto avuto sul pianeta, come rimarcato dalla frase citata, che segue quella precedente nel Report dell'IPCC, che sostiene come tali fenomeni si stiano manifestando in maniera inedita rispetto alle tendenze osservate fino all'industrializzazione.
I grafici nelle Figure 1.1-1.5 mostrano i valori assunti dagli indicatori principali del cambiamento climatico: il riscaldamento globale registrato nell'ultimo secolo è di circa 1°C, con un'elevata variabilità nella distribuzione geografica, con incrementi più marcati ai Tropici e nell'emisfero Boreale; l'esito più immediato è la riduzione dell'estensione dei mari glaciali, e quindi l'innalzamento del livello medio degli oceani; si rilevano poi aumenti della siccità in Africa, nel Mediterraneo e in Asia orientale, e della piovosità nel Nord Europa, in Asia centrale, nelle zone monsoniche, e in America.

[6] «Il riscaldamento del sistema climatico è inequivocabile e, a partire dagli anni '50, molti dei cambiamenti osservati sono senza precedenti su scale temporali da decennali a millenarie. L'atmosfera e gli oceani si sono riscaldati, le quantità di neve e ghiaccio sono diminuite, e il livello del mare si è alzato.»; IPCC, 2014, *op. cit.*, p. 40.

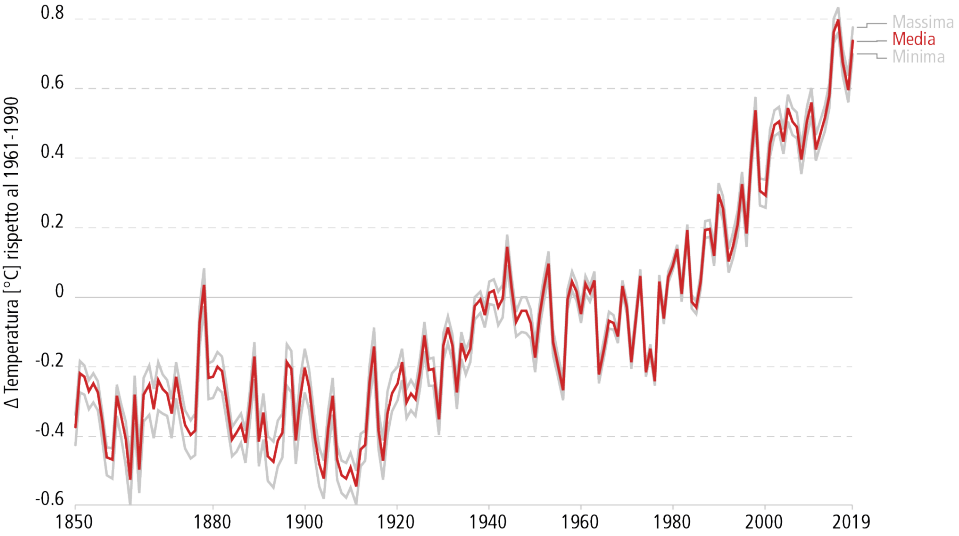


Figura 1.1
Anomalia osservata nella temperatura media globale superficiale combinata tra terre emerse e oceani.
Fonte: tradotto da https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions.

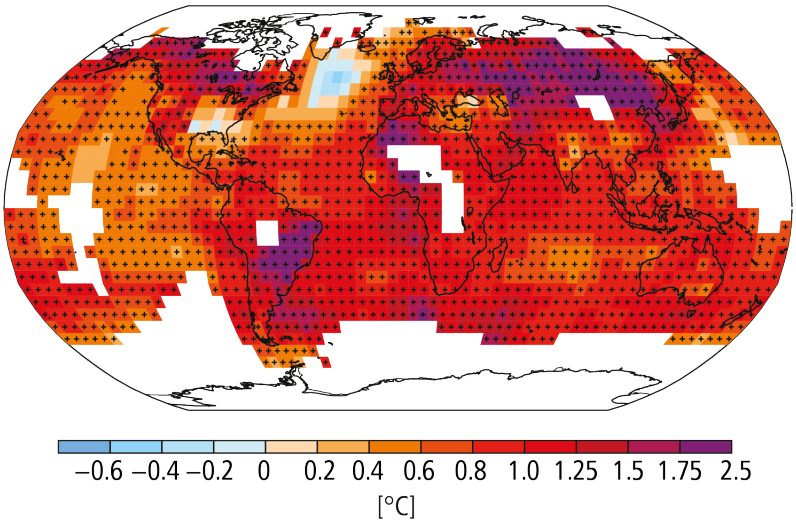


Figura 1.2
Variazioni osservate nella temperatura media superficiale nel periodo 1901-2012.
Fonte: IPCC, 2014, *op. cit.*, p. 41.

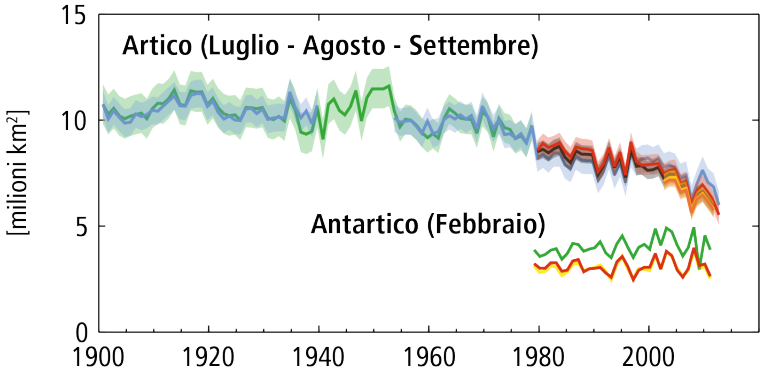


Figura 1.3

Estensione osservata dei mari glaciali.
Fonte: tradotto da IPCC, 2014, *op. cit.*, p. 41.

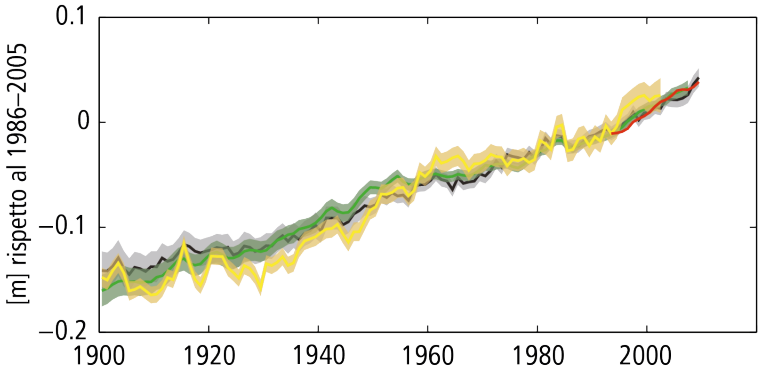


Figura 1.4

Variazione osservata nel livello medio globale degli oceani.
Fonte: tradotto da IPCC, 2014, *op. cit.*, p. 41.

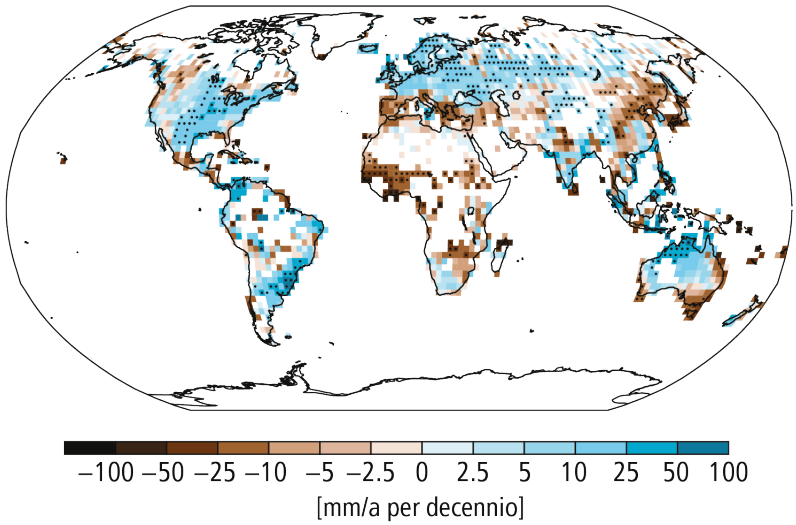


Figura 1.5

Variazione osservata nelle precipitazioni annuali sulle terre emerse nel periodo 1951-2010.
Fonte: tradotto da IPCC, 2014, *op. cit.*, p. 41.

Il complesso sistema di relazioni causa-effetto del cambiamento climatico è sintetizzato nello schema in Figura 1.6, estratto dalla prima sezione del Rapporto di Valutazione dell'IPCC, redatta dal *Working Group I* e dedicata alle evidenze scientifiche sul tema.[7]

L'agente originario sono le emissioni di gas serra in atmosfera, le cui crescenti concentrazioni aumentano il cosiddetto "forzante radiativo", il disequilibrio tra la radiazione solare assorbita e quella riemessa dal pianeta, alla base dei vari impatti descritti in precedenza. Dalle emissioni è necessario definire adeguati parametri per confrontare in modo coerente il peso delle diverse sostanze climalteranti o i contributi dei diversi Paesi o settori economici sulle stesse, e quindi stabilire le relative strategie di mitigazione[8].

La successiva Figura 1.7[9] illustra le dinamiche del forzante radiativo, misura quantitativa dell'effetto serra, che combina fattori o *driver* naturali e antropogenici. La quota di radiazione solare incidente a bassa lunghezza d'onda (ultravioletta) trasmessa dall'atmosfera viene assorbita dal pianeta e riemessa a lunghezze d'onda maggiori (infrarosse), quindi diffusa o schermata nuovamente dall'involucro gassoso: la componente naturale garantisce una temperatura media costante di circa 15°C sulla superficie terrestre, indispensabile alla vita e altrimenti di -18°C, ma le emissioni antropogeniche aumentano la radiazione trattenuta e quindi il riscaldamento globale.

Il grafico in Figura 1.8 riporta l'effetto dei diversi *driver* sul forzante radiativo.

---

[7] Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., Zhang, H., 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA, p. 710.

[8] *Ibid.*

[9] Cubasch, U., Wuebbles, D., Chen, D., Facchini, M.C., Frame, D., Mahowald, N., Winther, J.-G., 2013. Introduction. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA, p. 126.

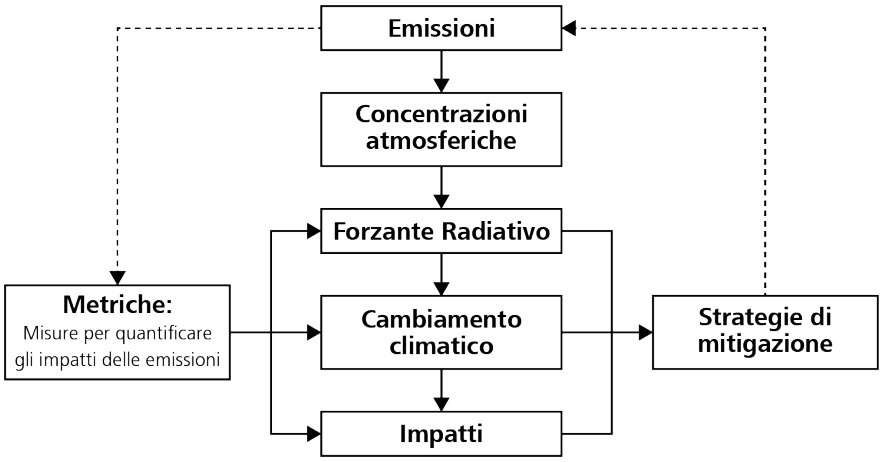


Figura 1.6

Schema della catena causa-effetto tra le emissioni di gas serra e il cambiamento climatico.
Fonte: riadattato da Myhre et al., *op. cit.*, p. 710.

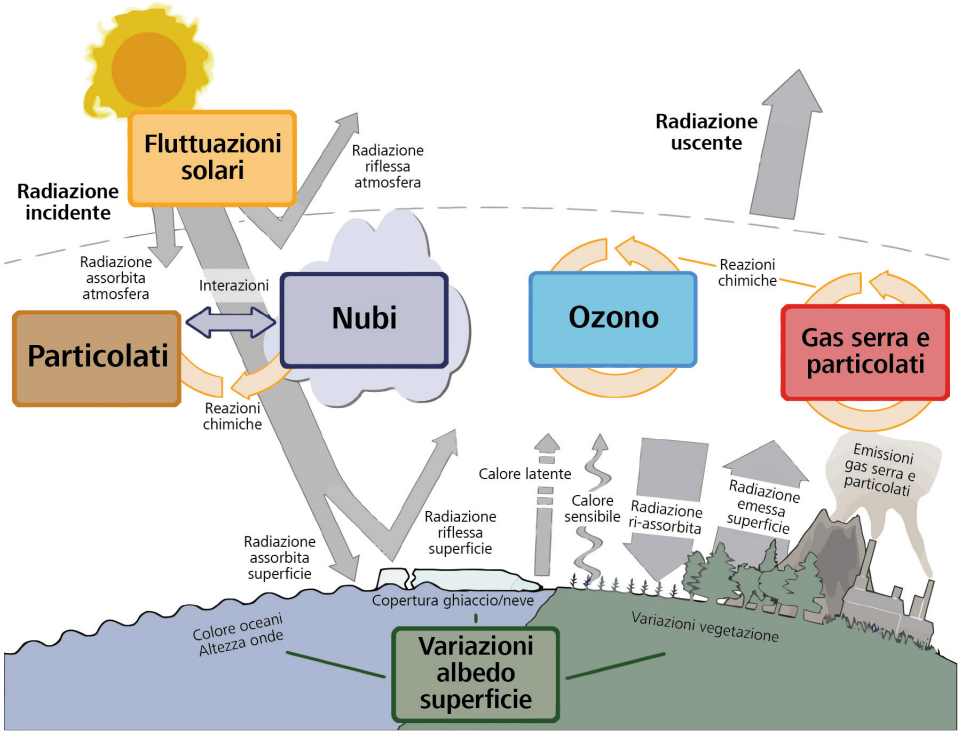


Figura 1.7

Schema dei principali *driver* del cambiamento climatico.
Fonte: tradotto da Cubasch et al., *op. cit.*, p. 126.

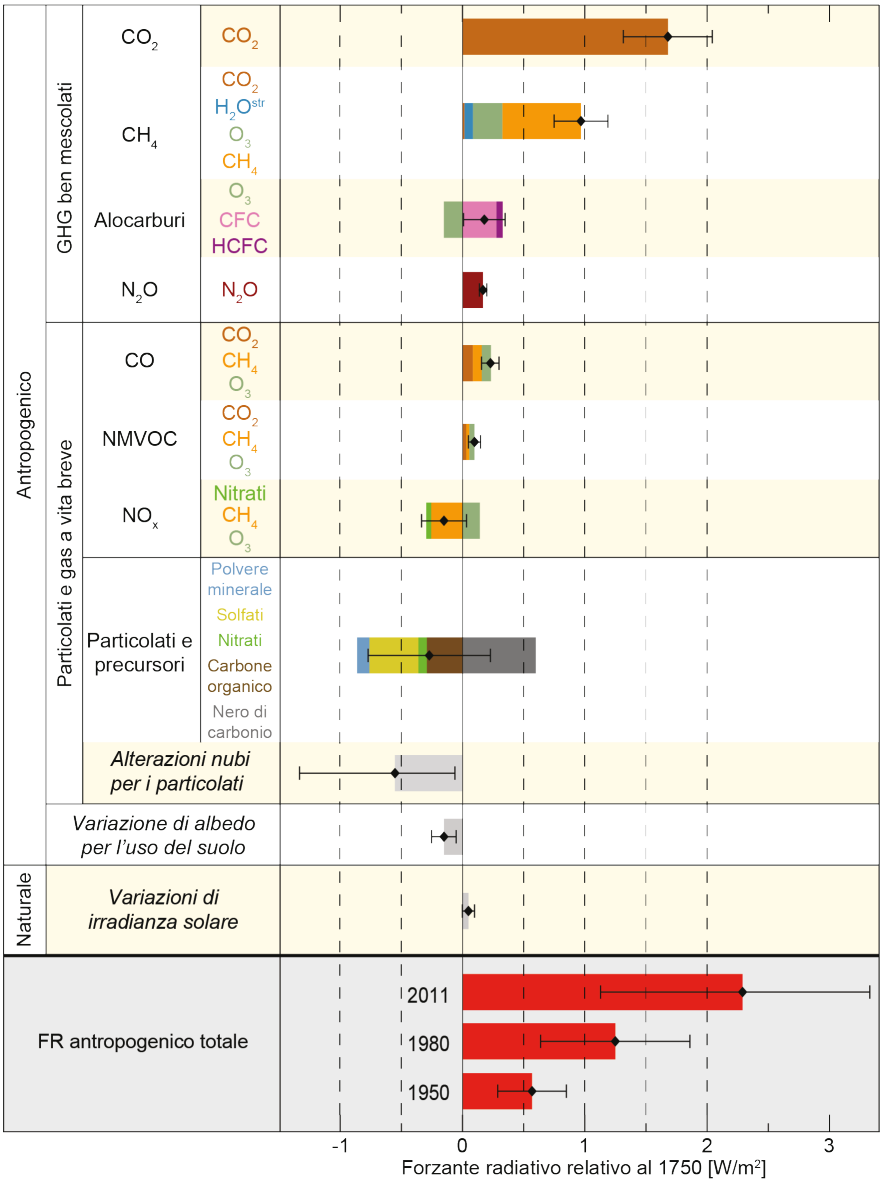


Figura 1.8

Stime del forzante radiativo nel 2011 rispetto al 1750.
Fonte: riadattato e tradotto da IPCC, 2013. Summary for Policymakers. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA, p. 14.

> *«Anthropogenic greenhouse gas emissions have increased since the pre-industrial era driven largely by economic and population growth. From 2000 to 2010 emissions were the highest in history. Historical emissions have driven atmospheric concentrations of carbon dioxide, methane and nitrous oxide to levels that are unprecedented in at least the last 800˙000 years, leading to an uptake of energy by the climate system».*[10]

A questo punto si analizzano le ormai assodate emissioni antropogeniche di gas a effetto serra, causa fondamentale del cambiamento climatico, facendo ancora riferimento al Rapporto di Sintesi dell'IPCC, che nell'estratto ribadisce l'eccezionalità dei livelli attuali di tali sostanze, senza precedenti da centinaia di migliaia di anni e con tendenze strettamente analoghe a quelle degli indicatori climatici già osservati.

Nelle Figure 1.9-1.14 vediamo i grafici dell'evoluzione delle emissioni totali annue di gas serra dal 1990 al 2016; inizialmente si considera la proporzione tra le diverse componenti chimiche di tali emissioni, il cui aumento totale è evidentemente trainato dall'anidride carbonica, prodotta essenzialmente dal consumo di combustibili fossili, mentre per il metano e il protossido di azoto, comunque pesantemente climalteranti, gli incrementi sono più contenuti. Nel confronto tra Paesi, si nota la rapidità nella crescita delle emissioni da parte della Cina, quasi quadruplicate negli ultimi trent'anni e stabilizzatesi solo molto recentemente, mentre altre grandi potenze mondiali presentano tendenze più contenute, come l'India, piuttosto stabili, come gli Stati Uniti, o inverse, come l'Unione Europea e il Giappone.

[10] «Le emissioni di gas serra antropogeniche sono aumentate dall'età preindustriale, guidate principalmente dalla crescita economica e demografica. Dal 2000 al 2010 le emissioni sono state le più alte nella storia. Le emissioni storiche hanno portato le concentrazioni atmosferiche di anidride carbonica, metano e protossido di azoto a livelli senza precedenti almeno negli ultimi 800˙000 anni, provocando un assorbimento di energia da parte del sistema climatico.»; IPCC, 2014, *op. cit.*, p. 44.

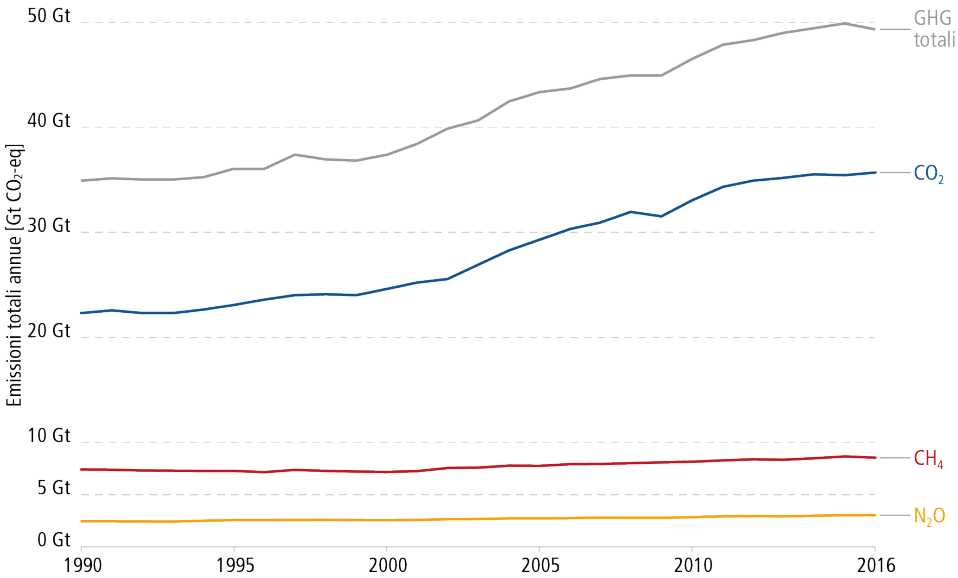


Figura 1.9

Evoluzione delle emissioni antropogeniche totali di GHG.
Fonte: tradotto dal sito web *Our World in Data*: https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions.

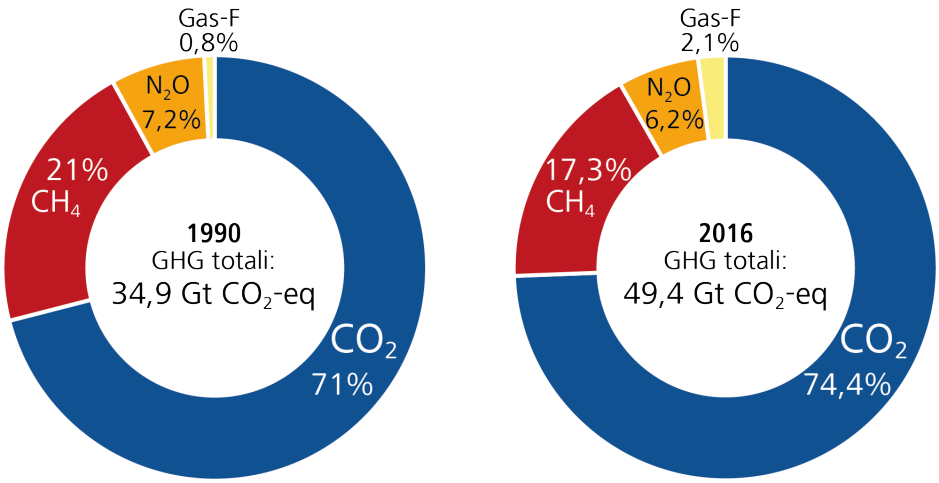


Figura 1.10

Confronto tra le componenti delle emissioni antropogeniche totali di GHG nel 1990 e nel 2016.
Fonte: riadattati dal sito web *Our World in Data*: https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions.

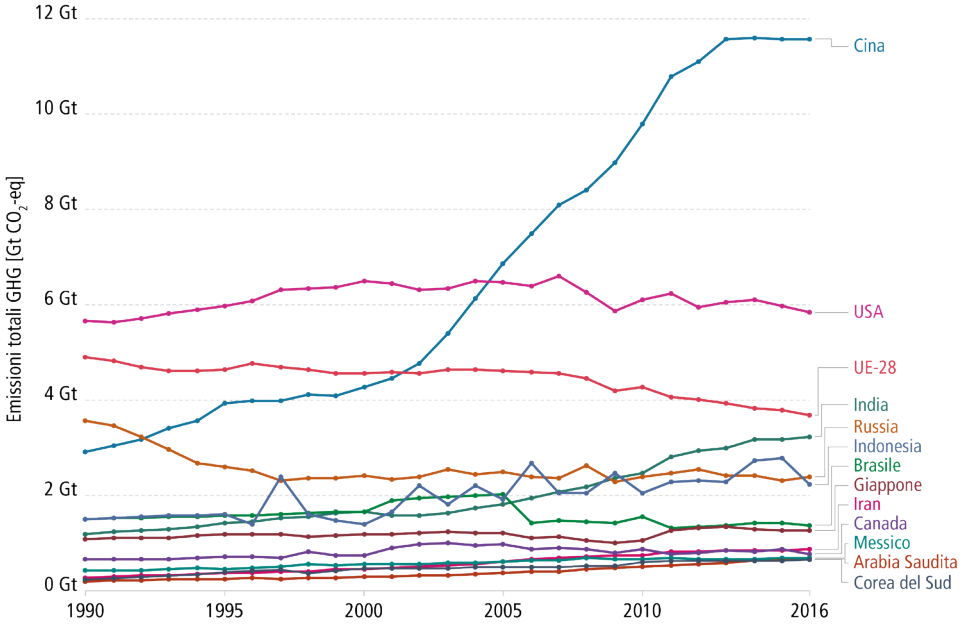


Figura 1.11

Evoluzione delle emissioni antropogeniche totali di GHG; valori per Paese.
Fonte: tradotto dal sito web *Our World in Data*: https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions.

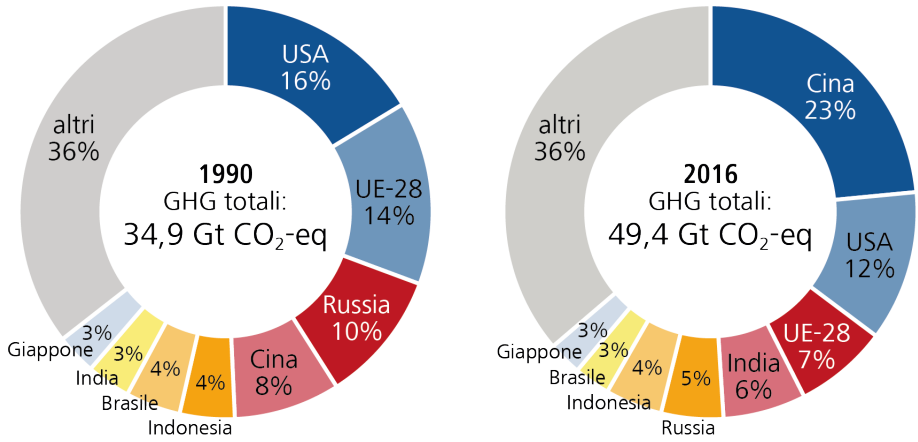


Figura 1.12

Confronto tra le emissioni antropogeniche totali di GHG nel 1990 e nel 2016; valori per Paese.
Fonte: riadattati dal sito web *Our World in Data*: https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions.

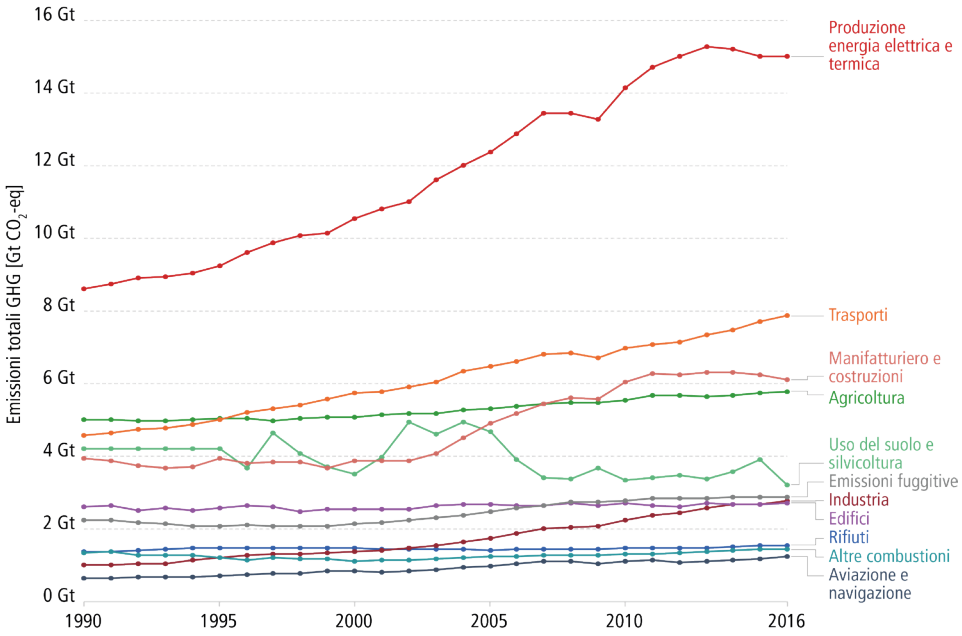


Figura 1.13

Evoluzione delle emissioni antropogeniche totali di GHG; valori per settore economico.
Fonte: tradotto dal sito web *Our World in Data*: https://ourworldindata.org/emissions-by-sector.

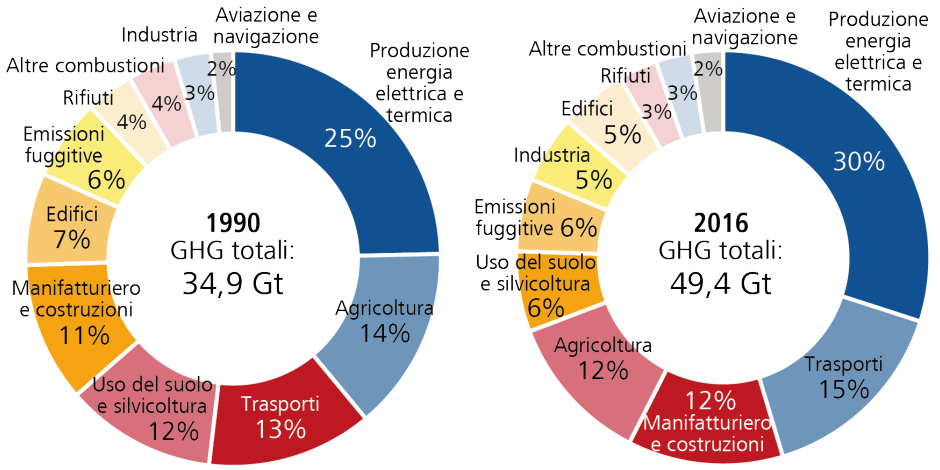


Figura 1.14

Confronto tra le emissioni antropogeniche totali di GHG nel 1990 e nel 2016; valori per settore economico.
Fonte: riadattati dal sito web *Our World in Data*: https://ourworldindata.org/emissions-by-sector.

Infine, per quanto riguarda i settori economici responsabili delle crescenti emissioni, predomina la produzione di energia, seguita da trasporti, industria manifatturiera e costruzioni, e agricoltura.

Le pagine seguenti, nelle Figure 1.15-1.23, riportano il dettaglio dei dati relativi alla sola anidride carbonica, trattandosi del gas più emesso e più impattante sul cambiamento climatico. I valori, ricostruiti in maniera attendibile per il passato, sono presentati nell'intervallo 1800-2018, ad eccezione dell'analisi per settori economici, elaborata nell'orizzonte 1990-2016, come per i gas serra totali in precedenza.
Fino alla metà del XX secolo, l'incremento di emissioni antropogeniche di CO_2 è stato piuttosto lento fino a circa 5 miliardi di tonnellate, poi quintuplicatosi rapidamente entro il 2000 e salito fino ad oltre 36 Gt annue nel 2018.
È poi utile osservare i contributi dei diversi combustibili alla base di tali emissioni, generate appunto dal loro consumo nelle attività produttive: le tendenze sono in crescita netta per tutte tali sostanze, con il carbone prevalente fino agli anni '60, sorpassato fino agli anni 2000 dal petrolio con flessioni per le crisi energetiche, e poi nuovamente superiore, soprattutto per lo sviluppo economico di Cina e India. Confrontando quindi i principali Paesi responsabili delle emissioni di CO_2, la Cina è prevedibilmente al primo posto e in crescita pressoché verticale negli ultimi vent'anni, seguita dagli Stati Uniti, in calo nel medesimo periodo, dall'Unione Europea, in diminuzione già dagli anni '70, dall'India, anch'essa in aumento costante, e dalla Russia, in netto calo dalla caduta del sistema sovietico.
Per quanto concerne i settori economici, la dipendenza dai combustibili fossili è decisiva, con la produzione di energia che si conferma il principale fattore di emissione, davanti ai trasporti, all'industria manifatturiera e ai consumi degli edifici.
Infine, si considera la concentrazione atmosferica dell'anidride carbonica dal 1800 e negli ultimi 800˙000 anni circa, dove con oscillazioni cicliche non ha mai superato le 300 ppm fino al XX secolo, crescendo poi oltre le 400 ppm in soli cento anni. È quindi evidente la correlazione con il riscaldamento globale.

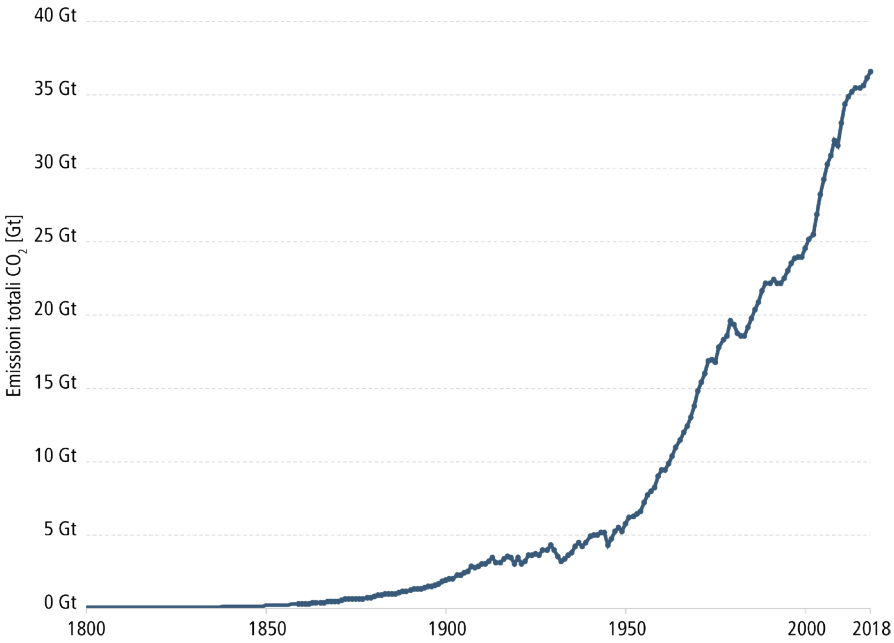


Figura 1.15

Evoluzione delle emissioni antropogeniche totali di CO_2.
Fonte: tradotto dal sito web *Our World in Data*: https://ourworldindata.org/co2-emissions.

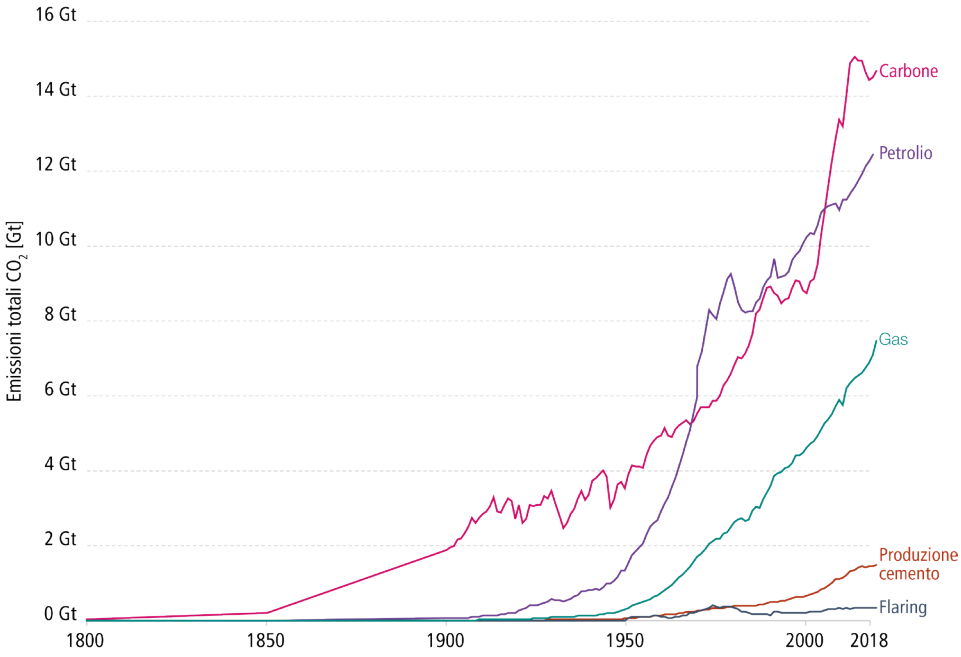


Figura 1.16

Evoluzione delle emissioni antropogeniche totali di CO_2; valori per combustibile o fonte.
Fonte: tradotto dal sito web *Our World in Data*: https://ourworldindata.org/emissions-by-fuel.

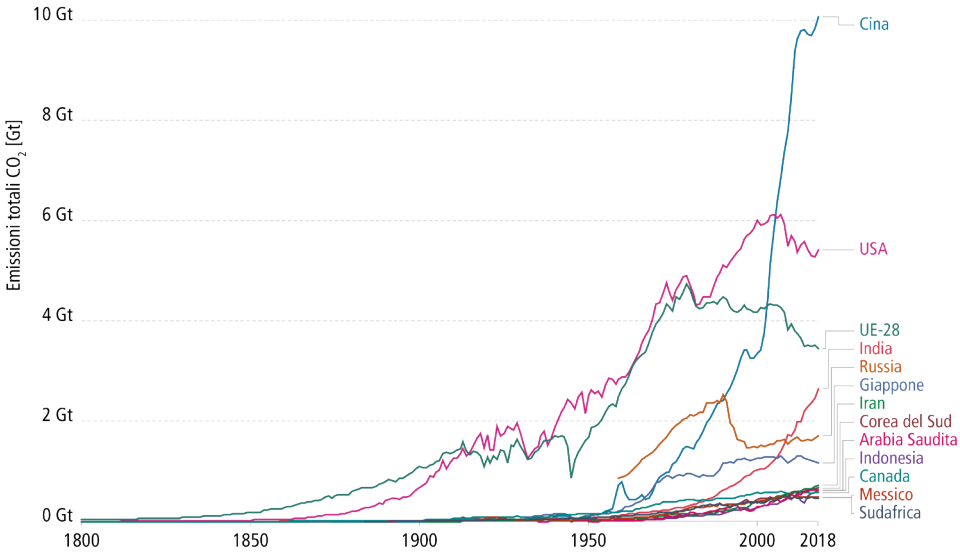


Figura 1.17

Evoluzione delle emissioni antropogeniche totali di CO_2; valori per Paese.
Fonte: tradotto dal sito web *Our World in Data*: https://ourworldindata.org/co2-emissions.

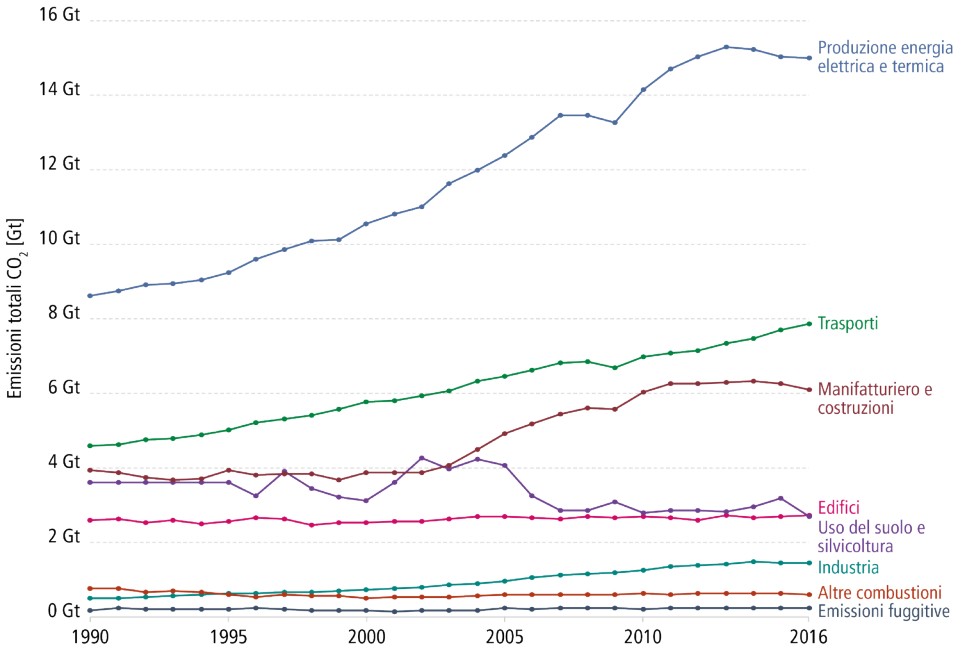


Figura 1.18

Evoluzione delle emissioni antropogeniche totali di CO_2; valori per settore economico.
Fonte: tradotto dal sito web *Our World in Data*: https://ourworldindata.org/emissions-by-sector.

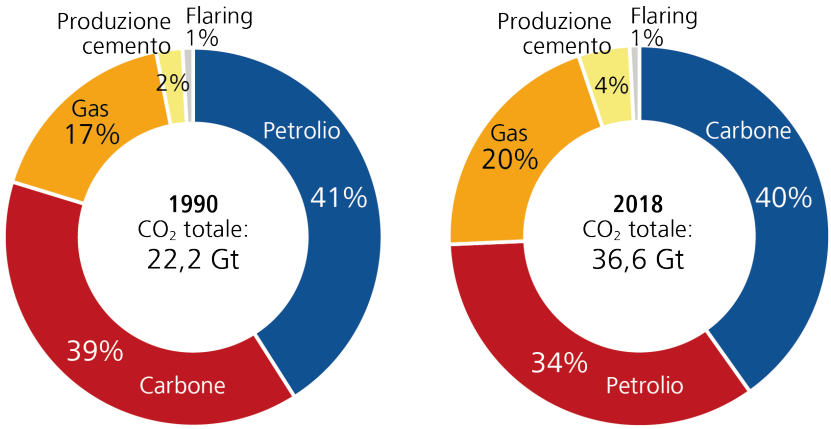


Figura 1.19

Confronto tra le emissioni antropogeniche totali di CO_2 nel 1990 e nel 2018; valori per combustibile o fonte.
Fonte: riadattati dal sito web *Our World in Data*: https://ourworldindata.org/emissions-by-fuel.

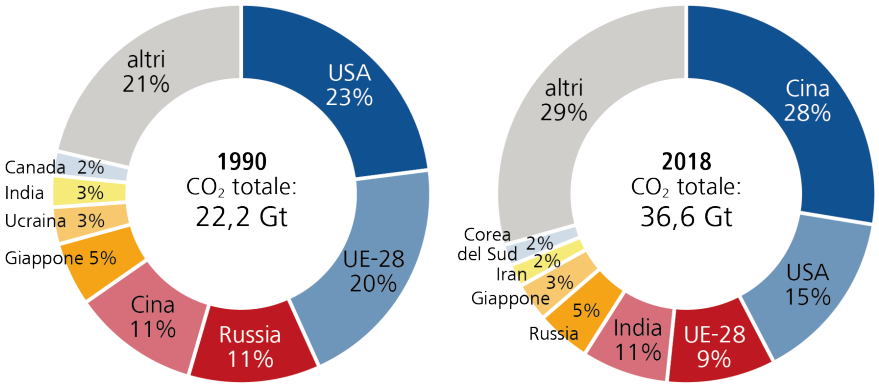


Figura 1.20

Confronto tra le emissioni antropogeniche totali di CO_2 nel 1990 e nel 2018; valori per Paese.
Fonte: riadattati dal sito web *Our World in Data*: https://ourworldindata.org/co2-emissions.

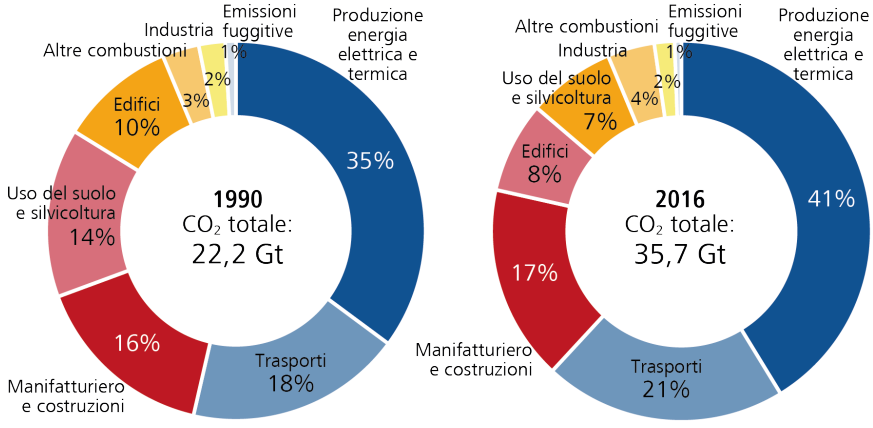


Figura 1.21

Confronto tra le emissioni antropogeniche totali di CO_2 nel 1990 e nel 2016; valori per settore economico.
Fonte: riadattati dal sito web *Our World in Data*: https://ourworldindata.org/emissions-by-sector.

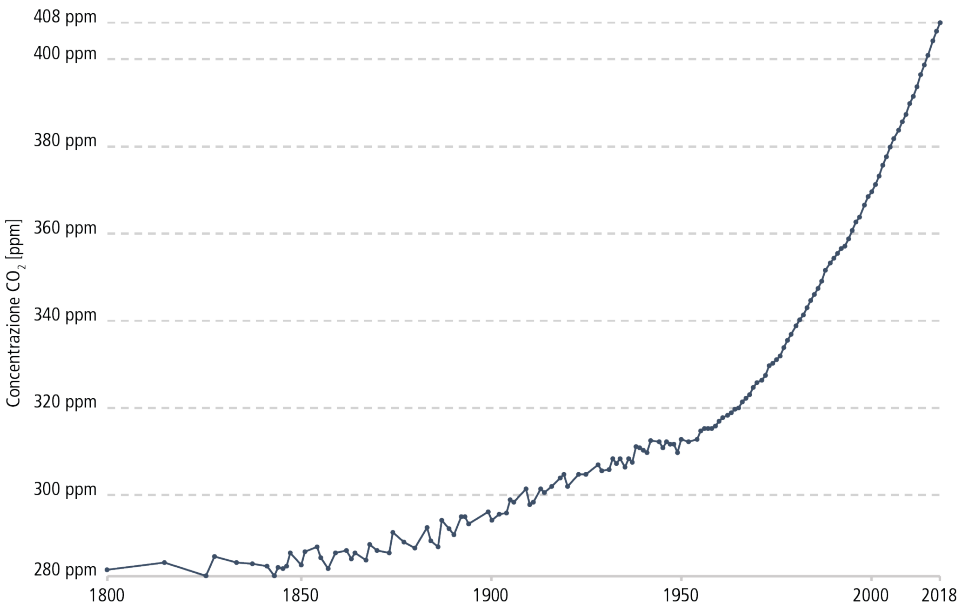


Figura 1.22

Evoluzione della concentrazione atmosferica di CO_2 dal 1800 al 2018.
Fonte: tradotto dal sito web *Our World in Data*: https://ourworldindata.org/atmospheric-concentrations.

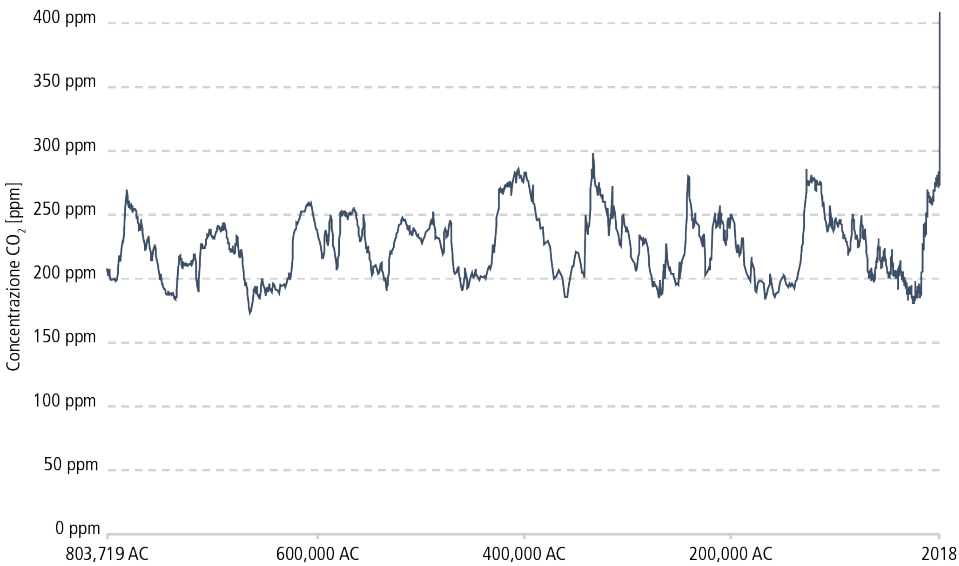


Figura 1.23

Evoluzione della concentrazione atmosferica di CO_2 negli ultimi 800.000 anni circa.
Fonte: tradotto dal sito web *Our World in Data*: https://ourworldindata.org/atmospheric-concentrations.

> *«Cumulative emissions of CO_2 largely determine global mean surface warming by the late 21st century and beyond. Projections of greenhouse gas emissions vary over a wide range, depending on both socio-economic development and climate policy».*[11]

In ultima istanza si analizzano i cambiamenti nel sistema climatico previsti per il futuro, che, come sottolineato nella citazione, saranno chiaramente determinati dalle emissioni di gas a effetto serra, sintomo più evidente del tipo di sviluppo socio-economico intrapreso.
A tal proposito, nel Quinto Rapporto di Valutazione dell'IPCC, è stata introdotta una nuova gamma di possibili scenari, i *Representative Concentration Pathways* (RCP), espressi in funzione del forzante radiativo antropogenico al 2100 o nel punto di stabilizzazione, anche successivo, come riportato nel grafico in Figura 1.24. Tali proiezioni simulano le future emissioni e concentrazioni (Figura 1.25) dalla combinazione di diversi modelli climatici, di chimica dell'atmosfera e del ciclo globale del carbonio, e includono strategie di mitigazione, utili per la definizione di efficaci politiche climatiche.[12]

Nelle Figure 1.26-1.31 sono riassunti i previsti impatti sugli indicatori climatici fondamentali al variare degli scenari RCP: la temperatura superficiale media continuerà ad aumentare nel corso del secolo in tutte le proiezioni, con distribuzione variabile sul pianeta e in modo più incisivo nell'emisfero Boreale; i mari glaciali vedranno ridurre ulteriormente la loro estensione, con quello Artico tendente alla scomparsa nello scenario più pesante; il livello degli oceani si innalzerà in maniera sempre più rapida.[13]

[11] «Le emissioni cumulative di CO_2 determinano principalmente il riscaldamento superficiale medio globale per la fine del XXI secolo e oltre. Le previsioni delle emissioni di gas serra variano in un ampio spettro, in base sia allo sviluppo socio-economico sia alle politiche climatiche.»; IPCC, 2014, *op. cit.*, p. 56.
[12] IPCC, 2013, *op. cit.* in Figura 1.8, p. 29.
[13] IPCC, 2014, *op. cit.*, p. 58.

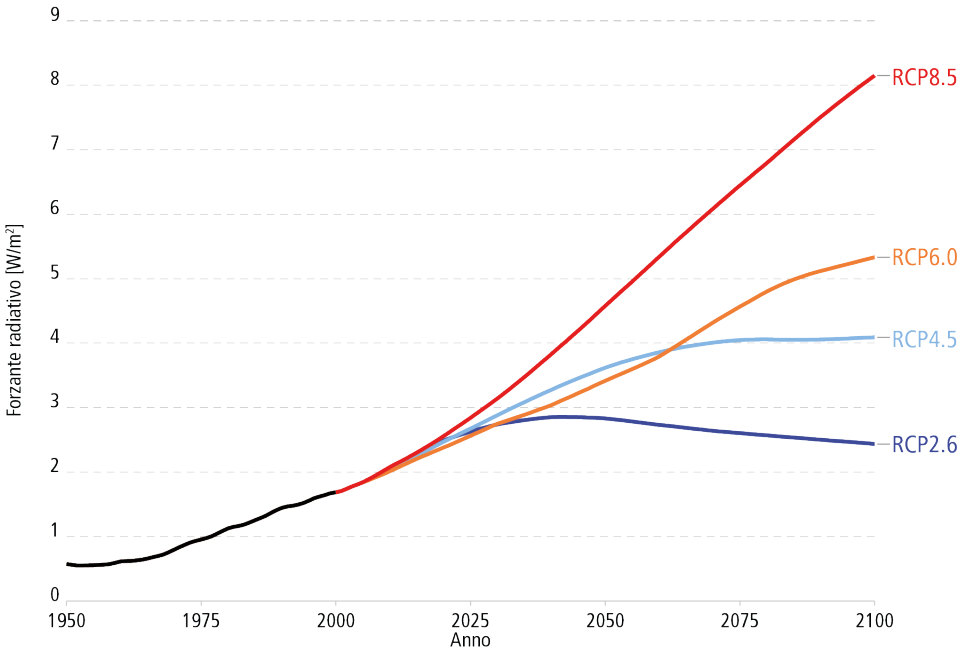


Figura 1.24

Scenari RCP in funzione del forzante radiativo antropogenico totale.
Fonte: riadattato da Cubasch et al., *op. cit.*, p. 146.

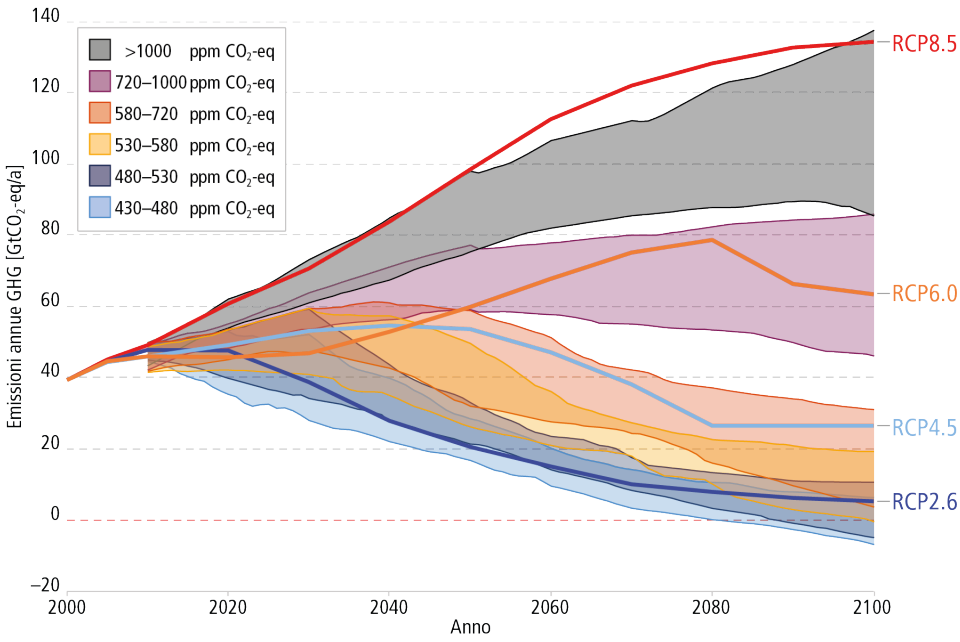


Figura 1.25

Scenari RCP in funzione delle emissioni antropogeniche totali di GHG e della relativa concentrazione.
Fonte: riadattato da IPCC, 2014, *op. cit.*, p. 82.

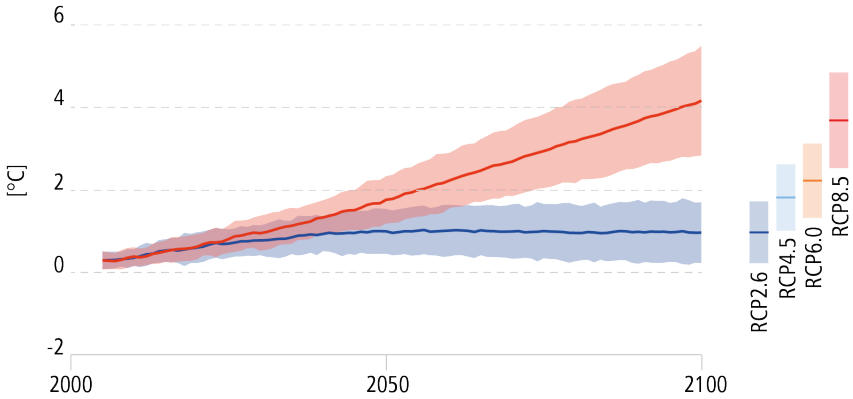


Figura 1.26

Variazione della temperatura media globale superficiale prevista rispetto al 1986-2005, in funzione degli scenari RCP. Fonte: riadattato da IPCC, 2014, *op. cit.*, p. 59.

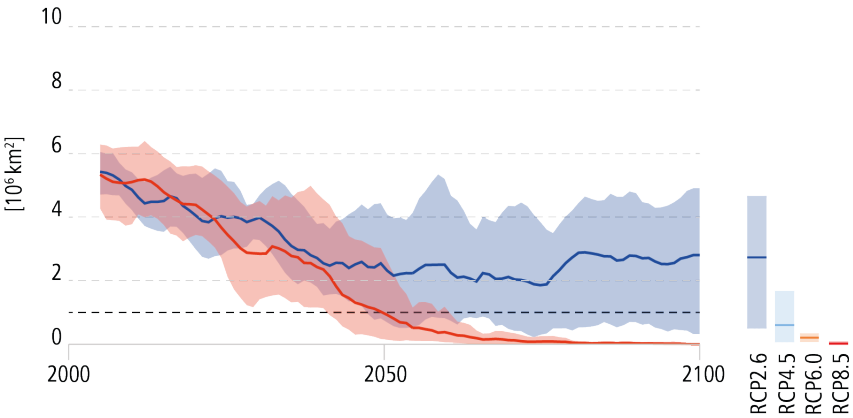


Figura 1.27

Estensione del ghiaccio marino nell'emisfero Boreale prevista, in funzione degli scenari RCP. Fonte: riadattato da IPCC, 2014, *op. cit.*, p. 59.

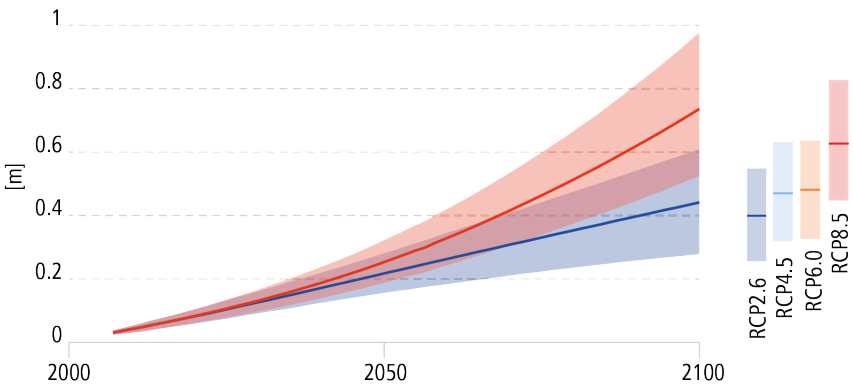


Figura 1.28

Innalzamento del livello medio globale degli oceani prevista rispetto al 1986-2005, in funzione degli scenari RCP. Fonte: riadattato da IPCC, 2014, *op. cit.*, p. 59.

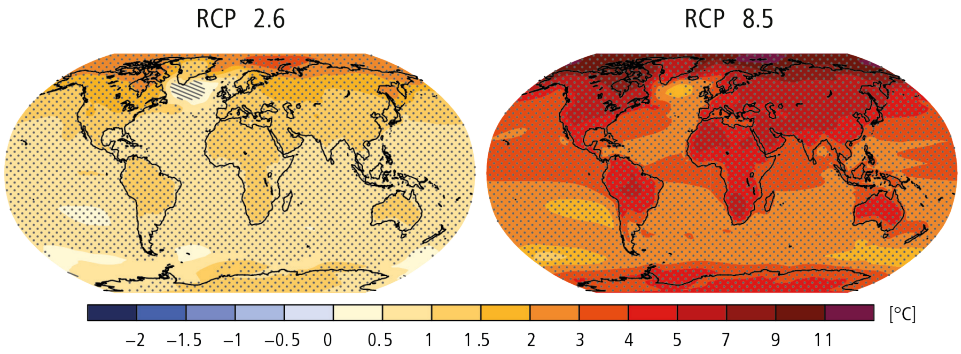


Figura 1.29

Variazione della temperatura media superficiale prevista nel 2081-2100 rispetto al 1986-2005, in funzione di due scenari RCP. Fonte: riadattato da IPCC, 2014, *op. cit.*, p. 61.

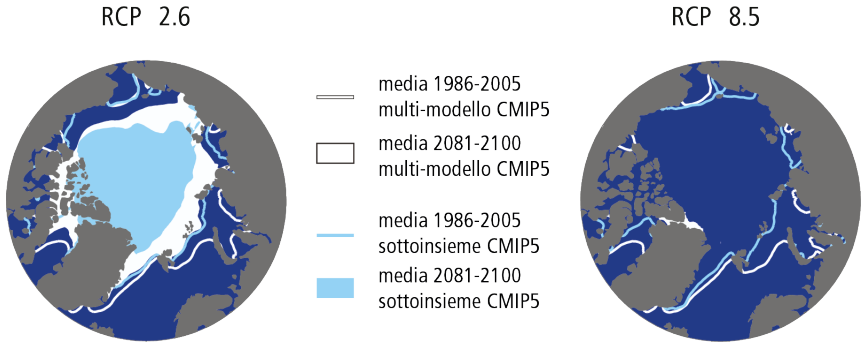


Figura 1.30

Estensione del ghiaccio marino nell'emisfero Boreale prevista nel 2081-2100, in funzione di due scenari RCP. Fonte: riadattato da IPCC, 2013, *op. cit.*, p. 22.

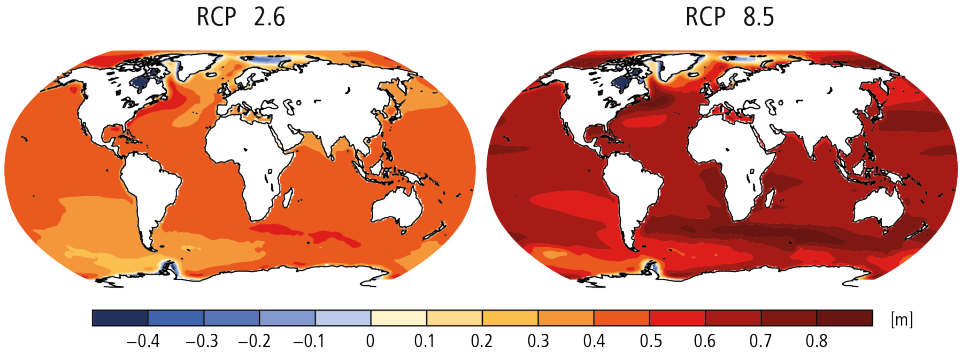


Figura 1.31

Innalzamento del livello medio degli oceani prevista nel 2081-2100 rispetto al 1986-2005, in funzione di due scenari RCP. Fonte: riadattato da IPCC, 2014, *op. cit.*, p. 61.

Mitigazione e adattamento

> *«Adaptation and mitigation are complementary strategies for reducing and managing the risks of climate change. Substantial emissions reductions over the next few decades can reduce climate risks in the 21st century and beyond, increase prospects for effective adaptation, reduce the costs and challenges of mitigation in the longer term and contribute to climate-resilient pathways for sustainable development».*[14]

Affrontare il cambiamento climatico è una sfida per la quale l'umanità non si è ancora assunta la piena responsabilità, nonostante l'urgenza conclamata della questione. E non è sufficiente limitarne gli impatti, ma è al contempo necessario conviverci e farsi trovare preparati per quelli ormai inevitabili.
Gli approcci noti come mitigazione e adattamento sono quindi assolutamente complementari, come affermato nella citazione dal Rapporto di Sintesi dell'IPCC, guida indispensabile per il presente capitolo: il primo identifica l'intervento umano per ridurre le emissioni o aumentare l'assorbimento di gas serra[15], mentre il secondo è il processo di adeguamento al clima reale o previsto, per evitarne gli effetti dannosi o sfruttarne le opportunità.[16]

---

[14] «Adattamento e mitigazione sono strategie complementari per ridurre e gestire i rischi del cambiamento climatico. Sostanziali riduzioni delle emissioni nei prossimi decenni possono ridurre i rischi climatici nel XXI secolo e oltre, maggiori prospettive di un efficace adattamento possono ridurre i costi e le sfide della mitigazione a lungo termine e contribuire a scenari resilienti al clima per lo sviluppo sostenibile.»; IPCC, 2014, op. cit., p. 76.
[15] IPCC, 2014. Annex II: Glossary [K.J. Mach, S. Planton, C. von Stechow (eds.)]. In *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Core Writing Team, R.K. Pachauri, L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginevra, Svizzera, p. 125.
[16] *Ivi*, p. 118.

I due concetti si influenzano reciprocamente e agiscono su diverse scale temporali e geografiche. L'adattamento è necessario già per il clima attuale e avrà risvolti immediati a breve termine, mentre la mitigazione, pur richiesta oggi, influenzerà maggiormente gli scenari di metà e fine secolo[17], poiché sia le trasformazioni economiche ed energetiche per ridurre o azzerare le emissioni, sia i loro effetti, non sono certamente immediati.
Dal punto di vista geografico si intrecciano due ragionamenti: uno più etico, che impone ai Paesi più sviluppati di mitigare le emissioni antropogeniche a discapito degli altri, meno responsabili degli impatti climatici estremi, ma più esposti ad essi, che necessitano maggiormente di strategie di adattamento; l'altro più pratico e operativo, poiché l'adattamento si applica a contesti locali o regionali specifici, mentre la mitigazione va gestita a livello globale e in cooperazione, poiché, agendo isolato, nessun Paese può influire su emissioni e concentrazioni in modo decisivo.[18]

È indubbio che la mitigazione influirà sulla portata del cambiamento climatico, i cui impatti potrebbero superare i limiti di adattabilità delle società e degli ecosistemi.[19] Il grafico in Figura 1.32 sintetizza quindi la correlazione tra tali rischi climatici, l'aumento previsto della temperatura media globale e le future emissioni. I possibili scenari di mitigazione sono rappresentati dagli ovali colorati, identificati dal livello di concentrazione atmosferica di gas serra alla fine del XXI secolo; quello "base" non prevede alcun intervento. I rischi, nelle barre sfumate a sinistra, riguardano le cosiddette *Reasons For Concern*, indicatori chiave di allerta dell'influenza umana sul sistema climatico.[20]

[17] IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report*, op. cit., p. 77.
[18] Victor, D.G., Zhou, D., Ahmed, E.H.M., Dadhich, P.K., Olivier, J.G.J., Rogner, H.-H., Sheikho, K., Yamaguchi, M., 2014. Introductory Chapter. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA, p. 140.
[19] IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report*, op. cit., p. 77.
[20] *Ivi*, p. 72.

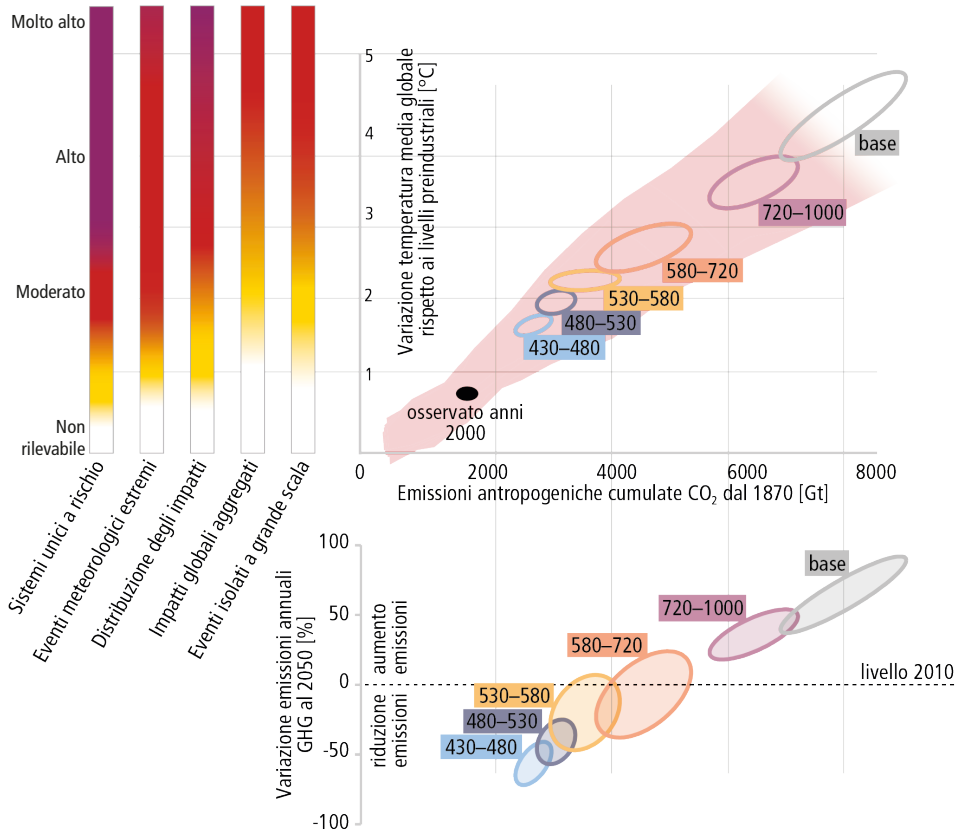


Figura 1.32

Relazione tra rischi del cambiamento climatico, riscaldamento globale, emissioni cumulate di CO2 e variazioni delle emissioni annuali di GHG al 2050. Fonte: tradotto da IPCC, 2014, *op. cit.*, p. 78.

La riduzione delle emissioni è la linea guida degli scenari di mitigazione, che possono essere applicati secondo diversi orizzonti temporali, tenendo conto dei limiti tecnologici ed economici e dei ritardi istituzionali e decisionali, che implicheranno sforzi sempre maggiori in futuro per ottenere i medesimi risultati.[21]

I grafici alle Figure 1.33-1.34 mostrano alcune tendenze previste nell'evoluzione delle emissioni, a breve e lungo termine. I percorsi "base", di nuovo, non prevedono interventi di contenimento, e portano ad aumenti costanti delle emissioni annue. Quelli a bassa intensità energetica prevedono una rapida diffusione di tecnologie efficienti per ridurre i consumi e le relative emissioni. Infine, per limitare il riscaldamento globale entro 1,5°C o 2°C, servono strategie più drastiche di mitigazione, dalla decarbonizzazione tramite fonti di energia rinnovabile, per azzerare le emissioni, all'assorbimento e allo stoccaggio dei gas climalteranti, per emissioni nette negative. Si tratta di meccanismi quali il *Carbon Dioxide Capture and Storage* (CCS), che accumula flussi di CO_2 dall'industria o dalla produzione energetica, per poi comprimerli e isolarli dall'atmosfera in giacimenti sotterranei esausti o nei fondali oceanici[22], o il *Carbon Dioxide Removal* (CDR), che si basa sulla rimozione chimica del gas direttamente dall'atmosfera.[23] Il costo e la limitata disponibilità di tali processi chimici e di geoingegneria, determinano i ritardi evidenziati nel secondo grafico, che in futuro potrebbero essere comunque compensati.

La Figura 1.35 riporta un grafico dal Rapporto Speciale dell'IPCC del 2018[24] con gli scenari di mitigazione per un riscaldamento globale entro 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali.

[21] *Ivi*, p. 81.

[22] IPCC, 2014. Annex II: Glossary, op. cit., p. 119.

[23] *Ibid.*

[24] IPCC, 2018. Summary for Policymakers. In *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*. [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Ginevra, Svizzera, p. 8.

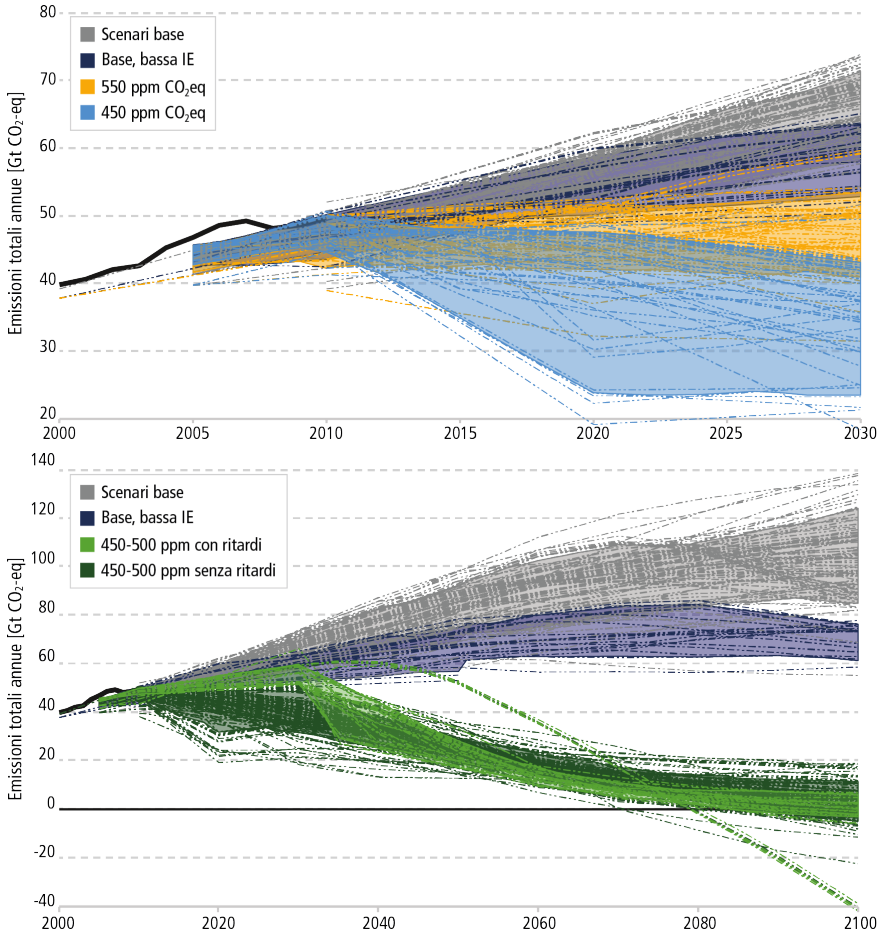


Figure 1.33-1.34

Scenari di mitigazione a breve termine e a lungo termine.
Fonte: riadattati da Victor et al., 2014, *op. cit.*, p. 135.

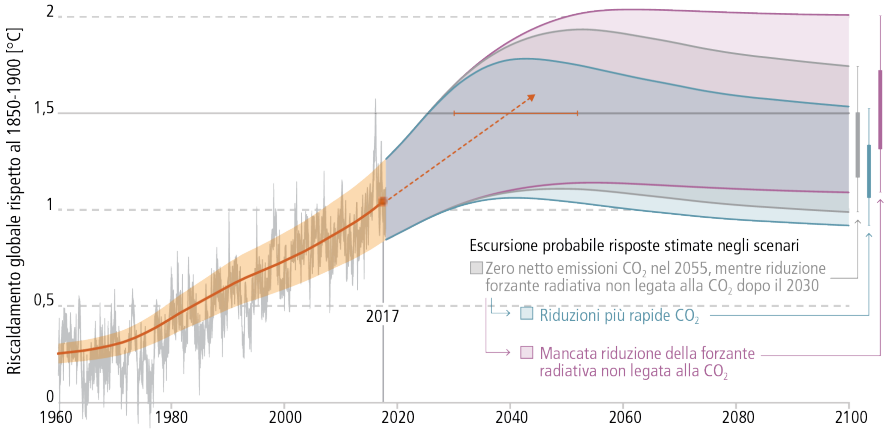


Figura 1.35

Scenari di mitigazione per mantenere il riscaldamento globale entro 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali.
Fonte: tradotto da IPCC, 2018, *op. cit.*, p. 8.

> *«The world has spent more than 20 years of diplomatic debate on questions of mitigation and has only more recently begun extensive discussions and policy planning on the strategies needed for adaptation».*[25]

Le strategie politiche per la lotta al cambiamento climatico si sono basate, tradizionalmente, sulla mitigazione delle emissioni di gas serra, a sottolineare la necessità di condivisione degli impegni per tale scopo, tuttavia l'attenzione per l'adattamento e la resilienza al clima attuale e futuro è sempre crescente e percepita come altrettanto urgente.

Le valutazioni in quest'ottica partono dalle proiezioni di mitigazione, ma si sviluppano principalmente su analisi dei rischi indotti, non solo a livello climatico, dai fattori umani e naturali, ed elaborano schemi decisionali che condizionano l'adattabilità futura dello scenario; lo schema in Figura 1.36 riassume tale processo.

Le opzioni di adattamento dipendono dal contesto locale o regionale, da limiti economici o tecnici e dalla conoscenza degli impatti da gestire, a loro volta influenzati dalle strategie di mitigazione a larga scala; l'equilibrio tra i due approcci non è sempre conseguibile, poiché se gli sforzi di mitigazione saranno limitati o inefficaci, il peso politico dell'adattamento sarà prevalente, al contrario, se i Paesi e gli ecosistemi avranno difficoltà nell'adattarsi al clima futuro, saranno richiesti impegni di mitigazione ancora superiori.[26]

[25] «Il mondo ha dedicato oltre vent'anni di dibattito pubblico ai problemi della mitigazione e solo più di recente ha iniziato estese discussioni e pianificazioni politiche sulle strategie necessarie all'adattamento.»; Victor et al., op. cit., p. 140.
[26] *Ibid.*

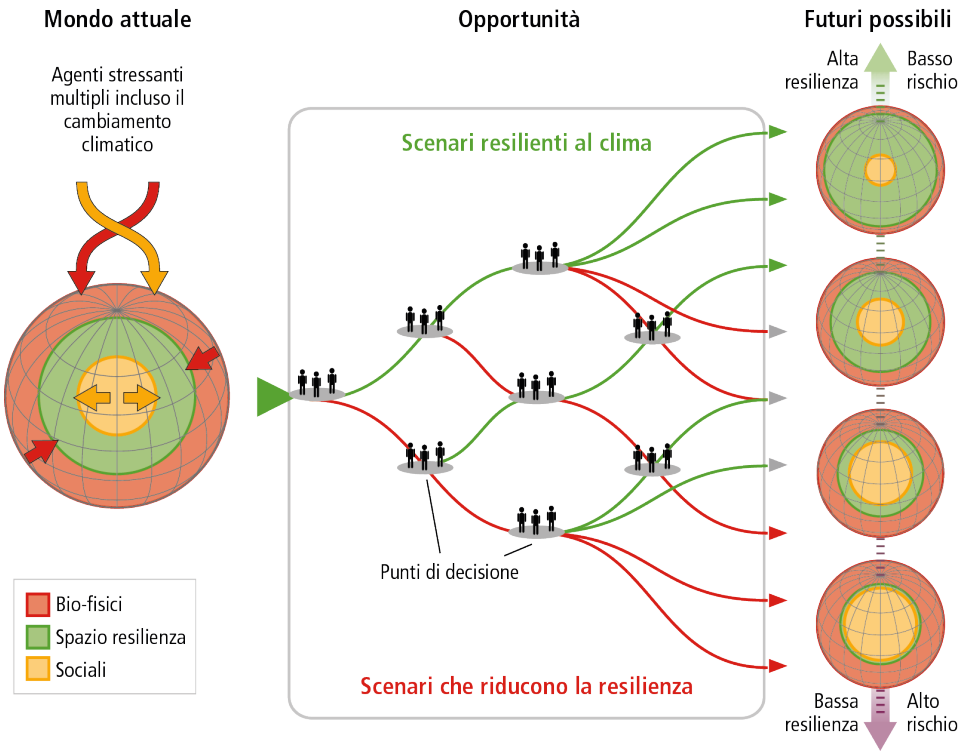


Figura 1.36

Opportunità e scenari resilienti al clima.
Fonte: tradotto da Burkett, V.R., Suarez, A.G., Bindi, M., Conde, C., Mukerji, R., Prather, M.J., St. Clair, A.L., Yohe, G.W., 2014. Point of Departure. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA, p. 182.

Piani d'azione

> *«Il cambiamento climatico è la sfida chiave del nostro tempo. La nostra generazione è la prima a sperimentare il rapido aumento delle temperature in tutto il mondo e probabilmente l'ultima ad avere l'opportunità di combattere efficacemente l'imminente crisi climatica globale».*[27]

Negli ultimi trent'anni il dibattito sul cambiamento climatico ha assunto una veste istituzionale sempre crescente, in particolare dal 1988, anno di fondazione del già citato IPCC da parte della WMO (World Meteorological Organization) e dell'UNEP (United Nations Environment Programme), organi delle Nazioni Unite per il clima e l'ambiente.

Pochi anni dopo, nel 1992, durante la Conferenza sull'Ambiente e sullo Sviluppo delle Nazioni Unite (UNCED) di Rio de Janeiro venne approvata ufficialmente la UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change), la prima convenzione internazionale direttamente rivolta al cambiamento climatico e di importanza decisiva nel riconoscimento dell'impatto negativo delle attività antropiche sul riscaldamento globale.

Nel 1995 I Paesi firmatari della UNFCCC si riunirono a Berlino nella prima Conferenza delle Parti (COP) per stabilire i principali obiettivi in termini di riduzione delle emissioni di sostanze climalteranti in atmosfera, che in occasione della COP3 del 1997 portarono alla redazione del celebre Protocollo di Kyoto, città giapponese sede del summit. Il trattato è entrato in vigore soltanto nel 2005 con l'adesione della Russia, e prevedeva processi di

[27] Dichiarazione di 32 Capi di Stato e di Governo in occasione del Climate Action Summit delle Nazioni Unite, tenutosi a New York il 23/09/19. *Iniziativa per una maggiore Ambizione Climatica*; accessibile al sito https://www.quirinale.it/elementi/36747.

"scambio" di emissioni tra i Paesi, l'ET (Emission Trading), la JI (Joint Implementation) e il CDM (Clean Development Mechanism), che consentivano interventi di contrasto alle emissioni di gas serra anche indirettamente in territorio straniero, ad esempio tramite nuova forestazione e gestione forestale in Paesi tropicali;[28] tale possibilità è stata criticata quale strumento di deresponsabilizzazione dei Paesi industrializzati o addirittura tacciata di neocolonialismo emissivo.[29]

Il protocollo è stato tuttavia superato definitivamente nel 2015 con l'Accordo di Parigi nell'ambito della COP21, ratificato da 195 Paesi (oggi 187) e per la prima volta giuridicamente vincolante per gli stessi. L'obiettivo comune è di limitare il riscaldamento globale entro i 2°C rispetto ai livelli preindustriali, puntando però con decisione a 1,5°C per ridurre significativamente rischi e impatti dei cambiamenti climatici conseguenti e cercando di raggiungere il picco di emissioni di gas serra il prima possibile. L'impegno è inoltre rivolto a sostenere quei Paesi più vulnerabili ed esposti ai danni del cambiamento climatico.[30] Purtroppo nel 2019, per volere del Presidente Donald Trump, gli Stati Uniti si defilano dall'accordo, con conseguenze affatto trascurabili, trattandosi del secondo Paese al mondo in termini di emissioni di CO_2 in atmosfera.

La COP25 del dicembre 2019, guidata dal Cile ma tenutasi a Madrid per via delle tensioni socio-politiche nel Paese sudamericano, avrebbe dovuto garantire maggiori impegni nei piani nazionali per rispettare i vincoli dell'Accordo di Parigi, ma si è risolta in nessun atto concreto, soprattutto in termini di cessioni di quote di emissioni tra Paesi più e meno virtuosi e di sostegno ai territori più vulnerabili ai cambiamenti climatici.[31]

[28] Le principali novità introdotte dal Protocollo di Kyoto sul sito ufficiale della UNFCCC: https://unfccc.int/kyoto_protocol.

[29] Fonte: sito web *Rete Clima* https://www.reteclima.it/protocollo-di-kyoto/.

[30] Una sintesi degli elementi salienti dell'Accordo fornita dal sito ufficiale della Commissione Europea: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_it.

[31] Fonte: Perché è fallita la conferenza sul clima. Da *Il Post*, pubblicato online 16/12/2019; accessibile al sito https://www.ilpost.it/2019/12/16/cop2-conferenza-clima-fallimento/.

La lotta al cambiamento climatico è l'obiettivo n°13 degli SDG (Sustainable Development Goals) riportati in Figura 1. , istituiti nel settembre 2015 dall'ONU nell'ambito dell'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile. Si tratta di un «programma d'azione per le persone, il pianeta e la prosperità»[32] sottoscritto da 193 Paesi e da conseguire entro il 2030, per porre rimedio sia alle diseguaglianze sociali, dalla povertà alla fame, dalla disparità di genere alle discriminazioni, sia agli effetti dello sviluppo incontrollato delle attività umane sul clima, sull'ambiente e sulle risorse naturali, con l'ambizione di un mondo in pace ed equo.

L'Unione Europea, considerata come unica entità, è da molti anni una delle potenze mondiali impegnate più attivamente in politiche e piani di contrasto al cambiamento climatico. Dai primi anni '90 ha posto la questione climatica sempre più al centro delle sue strategie di sviluppo, in particolar modo nell'attenzione a limitare le emissioni di CO_2, come testimonia la prima *Community Strategy to Limit Carbon Dioxide Emissions and Improve Energy Efficiency* del 1991, mentre nel decennio successivo sono stati istituiti gli ECCP (European Climate Change Programme I: 2000-04; II: 2005-2007), nati come strumenti di attuazione del Protocollo di Kyoto e rivolti a redigere analisi e previsioni sulle misure ambientali ed economiche più efficaci per ridurre le emissioni di gas serra.[33]
Nel 2007 i leader europei hanno approvato il *Pacchetto per il clima e l'energia 2020*, una serie di norme vincolanti volte a garantire che l'UE raggiunga i suoi obiettivi in materia di clima ed energia entro il 2020[34].

[32] Una sintesi degli SDG dell'Agenda ONU 2030 fornita dal Centro Regionale di Informazione delle Nazioni Unite sul proprio sito ufficiale: https://unric.org/it/agenda-2030/.
[33] La descrizione degli ECCP sul sito ufficiale della Commissione Europea: https://ec.europa.eu/clima/policies/eccp_it.
[34] Gli obiettivi del Pacchetto 2020 sul sito ufficiale della Commissione Europea: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_it.

Recepito a livello nazionale nel 2009, è noto più semplicemente come piano "20-20-20" per gli obiettivi fondamentali previsti:

- una riduzione del 20% delle emissioni di gas a effetto serra rispetto ai livelli del 1990;
- un ricavo del 20% del fabbisogno energetico da fonti rinnovabili;
- un miglioramento del 20% dell'efficienza energetica.

Nel 2014, nell'ottica di una pianificazione a medio termine, tali obiettivi sono stati resi più ambiziosi e impegnativi per il 2030 con il *Quadro 2030 per il clima e l'energia*, che prevede:

- una riduzione del 40% delle emissioni di gas a effetto serra rispetto ai livelli del 1990;
- almeno il 32% del fabbisogno energetico ricavato da fonti rinnovabili;
- un miglioramento del 32,5% dell'efficienza energetica.[35]

Gli ultimi due target sono stati rivisti al rialzo nel 2018 rispetto all'iniziale 27% richiesto per entrambi, mentre per la riduzione delle emissioni di gas climalteranti l'intenzione è di innalzare l'obiettivo ad almeno il 50% e di puntare al 55% in modo responsabile, nell'ambito del nuovo Green Deal Europeo. Si tratta di un piano per lo sviluppo sostenibile dissociato dall'uso delle risorse, basato su un'economia pulita e circolare, sulla riduzione dell'inquinamento e sul ripristino della biodiversità, che trasformi quindi le problematiche ambientali in opportunità di crescita per tutti i settori, e che renda la transizione inclusiva ed equa per tutti i cittadini europei.[36]

In questo contesto si inserisce la *Strategia a lungo termine per il 2050*, presentata nel 2018 e, in linea con l'Accordo di Parigi, rivolta a raggiungere la neutralità climatica, l'azzeramento delle emissioni nette di gas serra, entro il 2050.[37]

[35] Gli obiettivi del Quadro 2030 sul sito ufficiale della Commissione Europea: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_it.
[36] Il programma del Green Deal Europeo sul sito ufficiale della Commissione Europea: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-greendeal_it.
[37] La Strategia per il 2050 sul sito ufficiale della Commissione Europea: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_it.

Per rendere tale obiettivo giuridicamente vincolante, nel marzo 2020 è stata proposta la prima *Legge Europea sul Clima*[38], in corso di approvazione.
Nel 2013 è stata inoltre varata la *Strategia Europea di Adattamento al Cambiamento Climatico*, con l'intento di promuovere azioni a tale fine a livello comunitario e nei singoli Paesi Membri, delle quali poi valutare lo stato dell'arte, gli obiettivi salienti e i progressi raggiunti.[39]

L'Italia è ovviamente coinvolta nelle politiche internazionali ed europee in tema climatico, che recepisce con strumenti normativi specifici per soddisfarne gli obiettivi.
Per quanto riguarda il Pacchetto europeo 20-20-20, il Paese è in linea con le prescrizioni assegnate in termini di riduzione delle emissioni, -13% rispetto al 2005, di produzione da fonti rinnovabili, pari al 17% del fabbisogno totale, e di efficienza, con consumo di energia primaria di 158 Mtep e di energia finale di 124 Mtep.[40] La *Strategia Energetica Nazionale* del 2017 prima, e il più recente *Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima* del 2019 sanciscono gli impegni nazionali nel Quadro 2030: riduzione delle emissioni del 33%, copertura del 30% del fabbisogno energetico da fonti rinnovabili, riduzione dei consumi del 43%.[41]
Il *Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* (PNACC), per attuare la relativa *Strategia* (SNAC) del 2015, redatto con il supporto del Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC), è ancora in attesa di approvazione dalla consultazione pubblica del 2017.[42]

[38] La proposta della Legge Europea sul Clima sul sito ufficiale della Commissione Europea: https://ec.europa.eu/clima/policies/eu-climate-action/law_it.
[39] La Strategia di Adattamento sul sito ufficiale della Commissione Europea: https://ec.europa.eu/clima/policies/adaptation/what_en.
[40] Dati Eurostat, accessibili online al sito https://ec.europa.eu/eurostat/web/europe-2020-indicators/europe-2020-strategy/headline-indicators-scoreboard.
[41] Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2019. *Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima.*
[42] La consultazione pubblica per il PNACC annunciata sul sito del Ministero dell'Ambiente: http://www.pdc.minambiente.it/it/news-ed-eventi/piano-nazionale-di-adattamento-ai-cambiamenti-climatici-consultazione-pubblica.

2. Cambiamento climatico e ambiente costruito

Un rapporto reciproco

> *«But even if the best design practices are widely adopted and implemented, this will only mitigate global warming. It is too late to prevent it».*[1]

Questo secondo capitolo affronta il tema del rapporto tra il cambiamento climatico e l'ambiente costruito, configurandosi come punto di vista intermedio tra il fenomeno scientifico in senso generale e la valutazione dei suoi effetti sulle prestazioni energetiche degli edifici, obiettivo fondamentale del presente elaborato di tesi.

Il concetto di ambiente costruito identifica l'antropizzazione di quello naturale per adeguarlo alle esigenze della vita umana, in primo luogo con la realizzazione di manufatti, edifici, città e infrastrutture di connessione, elementi che danno immediatamente il senso di "costruzione", ma anche attraverso tutte le attività sociali ed economiche che vi si svolgono e che richiedono altri usi artificiali di suolo e risorse, dalla produzione di beni e servizi ai trasporti, dall'agricoltura alle estrazioni minerarie e allo smaltimento dei rifiuti. Si tratta quindi dello spazio in cui si dispiega il complesso sistema di interazioni tra l'uomo, le sue opere e i suoi modelli di sviluppo, che dà origine

[1] «Ma anche se le migliori strategie di progetto venissero largamente adottate e implementate, ciò mitigherà soltanto il riscaldamento globale. È troppo tardi per impedirlo.»; Robert, A., Kummert, M., 2012. Designing Net-Zero Energy Buildings for the Future Climate, Not for the Past. In *Building and Environment*, 55, p. 150.

alle emissioni di gas a effetto serra dette appunto antropogeniche, come noto, principali responsabili del cambiamento climatico.
Per limitare il campo d'indagine della tesi in oggetto all'ambito architettonico, ci si concentra specificamente sul settore edile, che, peraltro, instaura una relazione biunivoca molto forte ed evidente con il cambiamento climatico, visto che, da un lato, ha un peso decisivo nelle emissioni di gas serra totali e nel conseguente riscaldamento globale, dall'altro, è allo stesso tempo molto esposto alle sollecitazioni previste, data la funzione di interfaccia tra esterno e interno degli edifici; il rischio concreto è quello di un meccanismo di feedback, concetto introdotto al capitolo precedente, ossia un circolo vizioso di impatti reciproci crescenti, da limitare con urgenza.
A tal proposito, questo settore offre grandi potenzialità nelle strategie di mitigazione e adattamento, come sottolineato dalla citazione iniziale, pur con tono amaro nella constatazione delle inevitabili conseguenze già in atto.

La struttura del presente capitolo riprende in parte quella del precedente, seppur focalizzata sulle implicazioni del cambiamento climatico in architettura: inizialmente si analizzano i reciproci effetti tra tale fenomeno e il settore edile, distinguendo i due punti di vista, quindi si espongono le strategie di progetto per contrastarli, derivate dagli approcci generali di mitigazione e adattamento.
Nella prima sezione si valuta l'impatto degli edifici sul cambiamento climatico, che, come detto, è evidente dagli elevati consumi energetici e dalle relative emissioni di gas serra in atmosfera, in termini sia diretti, legati alle tecnologie impiantistiche a combustione fossile *in situ*, sia indiretti, insiti nella produzione *ex situ* di energia elettrica, materiali ed elementi costruttivi, e nel processo edilizio in generale.
A seguire, in direzione opposta ma complementare, si osservano gli effetti del cambiamento climatico sul costruito, in particolare nelle aree urbane. Esse ospitano la maggioranza della popolazione mondiale almeno dal 2007[2], e sorgono in qualsiasi contesto ambientale e geografico, dalle coste oceaniche

[2] Fonte: Dipartimento Affari Economici e Sociali delle Nazioni Unite (UN/DESA), *World Urbanization Prospects*, accessibile al sito https://population.un.org/wup/DataQuery/.

e marittime a fiumi e lagune, dalle foreste pluviali ai deserti, più o meno esposte alle molteplici sollecitazioni climatiche, dal costante riscaldamento globale alle più frequenti ondate di calore, fino ad alluvioni ed esondazioni per il diverso regime delle precipitazioni, lo scioglimento dei ghiacciai e l'innalzamento del livello delle acque. Alla scala dell'edificio, gli impatti riguardano *in primis* il comfort interno degli occupanti e la loro salute, e poi strutture portanti, involucro e tecnologie impiantistiche, mentre, su larga scala, avranno ulteriori risvolti sociali ed economici, dalla disponibilità di cibo alle migrazioni, dalla sanità collettiva alla disoccupazione.

Nel contrasto al cambiamento climatico sono fondamentali la mitigazione e l'adattamento, e nel paragrafo conclusivo se ne considerano le modalità e l'efficacia nel settore edile. Ovviamente, anche in questo caso le strategie sono complementari e diventano elementi di progetto imprescindibili, identificati spesso nel concetto di sostenibilità ambientale dell'edificio nel suo senso più generale, ricercando quindi: da un lato, il minimo impatto in termini energetici ed emissivi in tutto il ciclo di vita edilizio, dall'uso di fonti e risorse rinnovabili a materiali ricavabili sul sito o nel contesto di progetto; dall'altro, la previsione e la resilienza agli impatti climatici diretti o alle loro conseguenze indirette, quali nuove possibili necessità abitative e sociali, attraverso soluzioni costruttive flessibili, temporanee, e non rivolte esclusivamente alla mitigazione, spesso basata sulle sole condizioni attuali.

Impatto del settore edile sul cambiamento climatico

Il settore edile impatta in modo determinante sulle cause antropogeniche del cambiamento climatico, poiché le grandi quantità di energia richieste da edifici e processi costruttivi si ottengono in larga misura dalla combustione di fonti fossili, provocando inevitabilmente elevati livelli di emissioni di gas serra.

In tal senso, è fondamentale l'analisi del *Global Status Report for Buildings and Construction*[3], rapporto annuale redatto dalla Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC)[4], dall'International Energy Agency (IEA) e dall'UNEP, che stima i consumi energetici del settore edile e le relative emissioni climalteranti; la citazione iniziale è estratta dal più recente del 2019, al pari di molti grafici nelle pagine seguenti.

Il primo, in Figura 2.1, mostra l'evoluzione dal 1990 ad oggi dei consumi di energia finale negli edifici, quindi legata alle efficienze impiantistiche nel coprire i fabbisogni, che risultano in generale aumento sia nel residenziale sia nelle altre destinazioni d'uso. Le Figure 2.2-2.3 riportano invece, da un lato, l'attuale composizione dei consumi totali di energia finale, evidenziando come il settore edile vi influisca complessivamente per il 36%, dall'altro, il peso dei diversi vettori energetici e degli usi finali in quest'ambito. L'energia elettrica da rete, il gas naturale e le biomasse tradizionali sono le fonti prevalenti, mentre emerge l'impiego ancora ridotto di quelle rinnovabili, almeno alla scala dell'edificio; i consumi finali sono destinati in quota maggiore al riscaldamento degli ambienti, alla produzione di acqua calda sanitaria e alla cottura dei cibi, oltre che agli usi elettrici in generale, tra cui il raffrescamento, che seppur

[3] GlobalABC, IEA, UNEP, 2019. *2019 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-Emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*, IEA, Parigi, Francia.

[4] Ente che riunisce governi, organi internazionali, associazioni e imprese in campo edile, energetico e ambientale; sito web ufficiale: https://globalabc.org/.

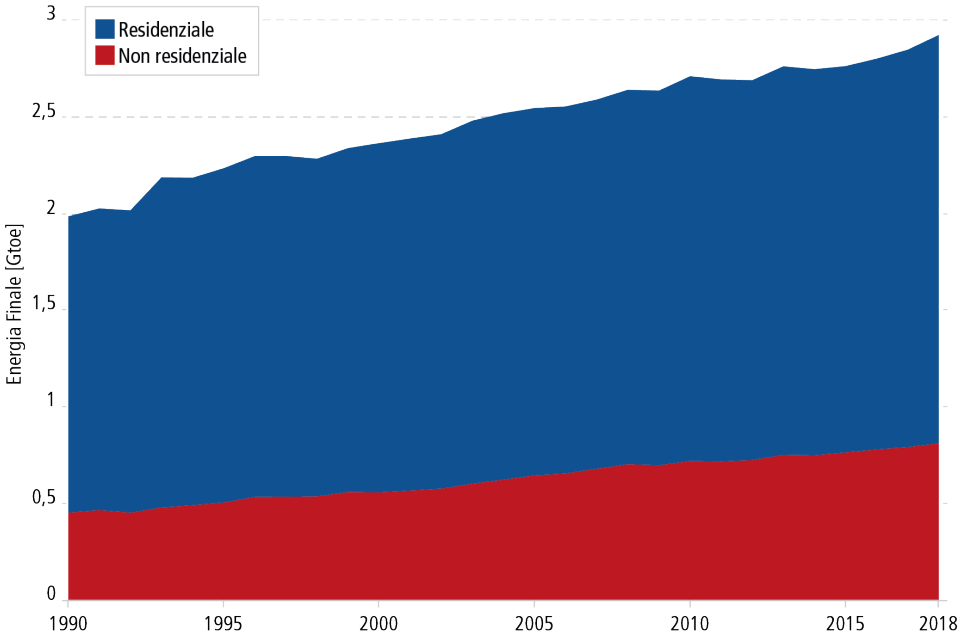


Figura 2.1

Consumi di energia finale del settore edile nel periodo 1990-2018.
Fonte: riadattato da *IEA - Data and Statistics*, accessibile online al sito https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=TFCShareBySector.

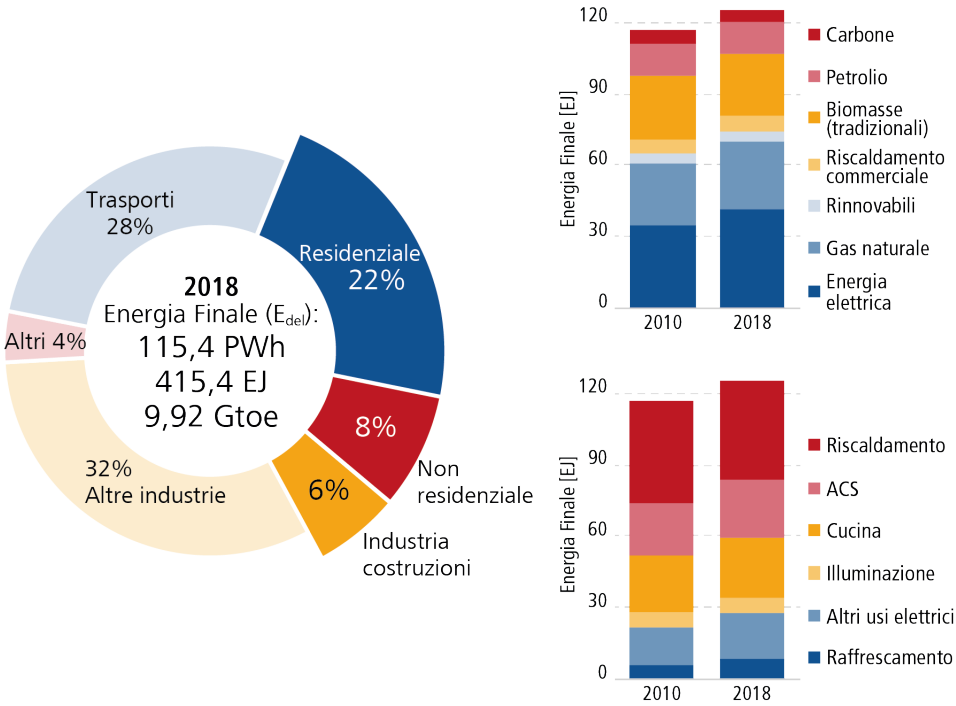


Figure 2.2-2.3

Consumi globali di energia finale nel 2018 per settore economico; per il settore edile, valori per vettore energetico e per uso finale. Fonte: riadattati e tradotti da GlobalABC et al., 2019, *op. cit.*, pp. 12-13.

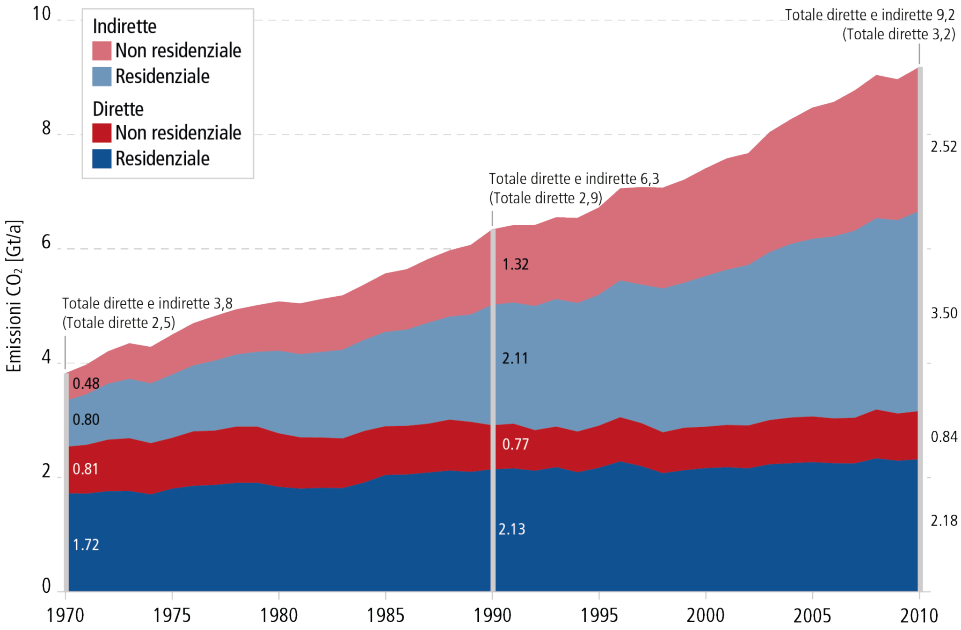


Figura 2.4

Emissioni di CO_2 del settore edile nel periodo 1970-2010, valori per destinazione d'uso.
Fonte: riadattato e tradotto da Lucon et al., *op. cit.*, p. 678.

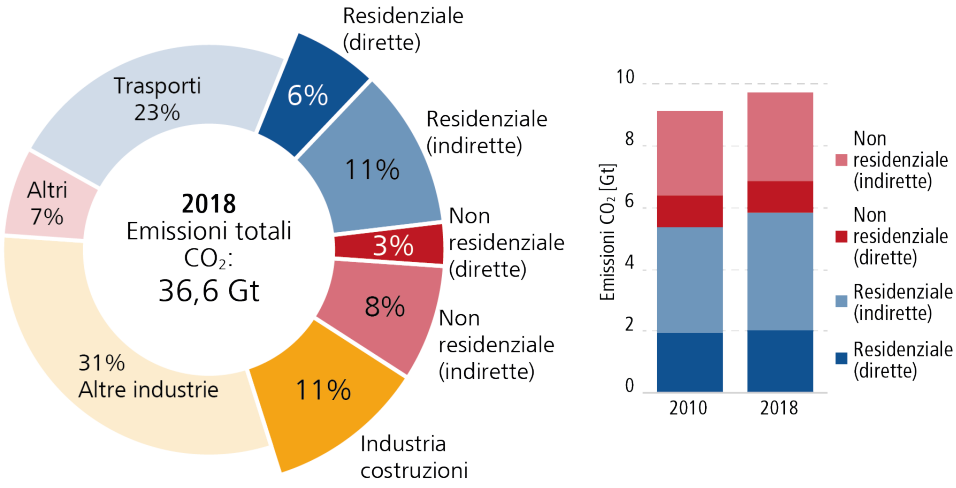


Figure 2.5-2.6

Emissioni globali di CO_2 nel 2018 per settore economico; per il settore edile, valori per destinazione d'uso.
Fonte: riadattati e tradotti da GlobalABC et al., 2019, *op. cit.*, pp. 12-13.

ancora contenuto, in termini relativi registra la crescita più rapida negli ultimi dieci anni, anticipando le tendenze future a causa del cambiamento climatico. Le emissioni di gas serra degli edifici sono formate quasi interamente da anidride carbonica e dipendono dall'energia impiegata secondo due modalità: diretta, se prodotte *in situ* e in esercizio dalla combustione di fonti fossili o biomasse, fondamentalmente per riscaldamento, ACS e cucina; indiretta, quando derivate dalla produzione *ex situ*, ancora tramite combustibili fossili, di energia elettrica e dei materiali costruttivi, quest'ultime dette *embodied*, incorporate. Il grafico in Figura 2.4, tratto dal capitolo *Buildings*[5] della sezione del *Working Group III* del Quinto Rapporto IPCC dedicata alle strategie di mitigazione, illustra l'evoluzione delle emissioni dirette e indirette di CO_2 causate dagli edifici dal 1970 al 2010, con una crescita analoga ai consumi, trainata soprattutto dalle seconde; quelli successivi, nelle Figure 2.5-2.6, attribuiscono al settore edile il 39% delle attuali emissioni totali di CO_2, ancora dominate da quelle indirette, mentre mostrano un aumento più moderato negli ultimi dieci anni.

Tali tendenze, come da Figura 2.7, sono forzate dalla crescita della superficie lorda edificata e da quella demografica, ma parzialmente contenute dal miglioramento dell'efficienza energetica, come dal grafico in Figura 2.8, in cui si nota, in quasi tutti gli usi finali, la riduzione dei consumi per unità di superficie, ad eccezione del raffrescamento. Tuttavia, in sintesi definitiva e in termini di consumi assoluti, l'ultimo grafico, in Figura 2.9, sottolinea come tale efficienza raggiunta sia insufficiente a colmare gli incrementi dovuti ai fattori congiunturali, quali il clima esterno e la crescita demografica, e strutturali, quali la superficie costruita e l'accesso ai servizi.

[5] Lucon, O., Ürge-Vorsatz, D., Zain Ahmed, A., Akbari, H., Bertoldi, P., Cabeza, L.F., Eyre, N., Gadgil, A., Harvey, L.D.D., Jiang, Y., Liphoto, E., Mirasgedis, S., Murakami, S., Parikh, J., Pyke, C., Vilariño, M.V., 2014. Buildings. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA, pp. 671–738.

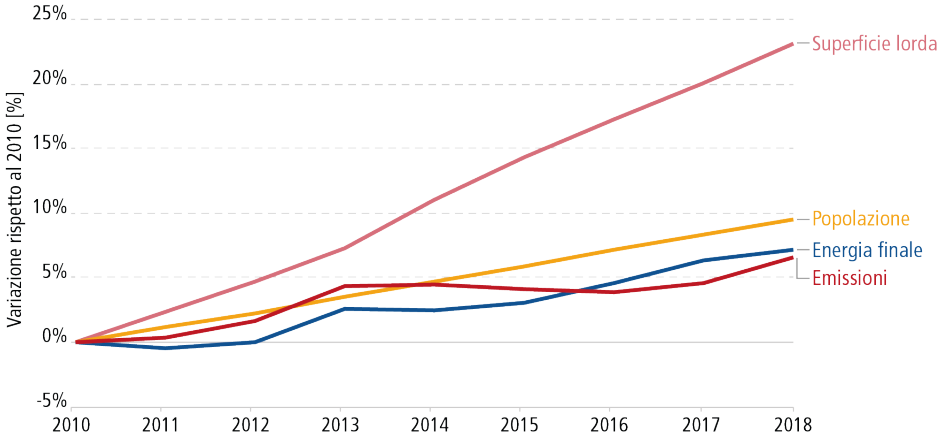


Figura 2.7

Variazione percentuale di alcuni fattori e degli indicatori risultanti nel settore edile, nel periodo 2010-2018. Fonte: riadattato e tradotto da GlobalABC et al., 2019, *op. cit.*, p. 16.

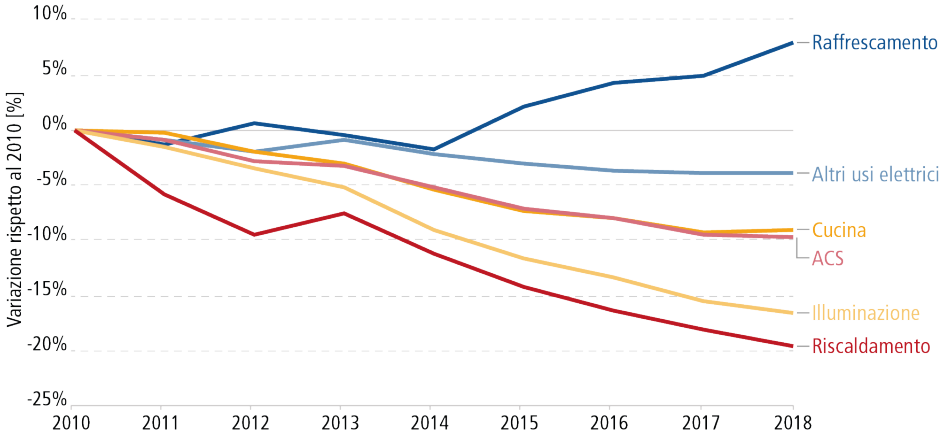


Figura 2.8

Variazione percentuale dell'intensità energetica per unità di superficie [E_{del}/m^2] degli usi finali nel settore edile, nel periodo 2010-2018. Fonte: riadattato e tradotto da GlobalABC et al., 2019, *op. cit.*, p. 14.

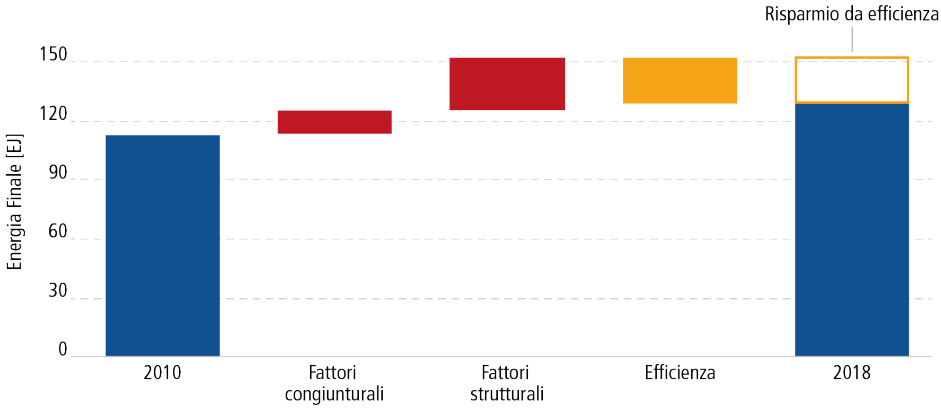


Figura 2.9

Variazione dei consumi di energia finale nel settore edile, nel periodo 2010-2018, per effetto di diversi fattori. Fonte: riadattato e tradotto da GlobalABC et al., 2019, *op. cit.*, p. 15.

Effetti del cambiamento climatico sugli edifici

> *«Climate change is projected to have profound impacts on the built environment, although the precise extent of these impacts is uncertain and will vary significantly between and within regions».* [6]

Come introdotto, l'ambiente costruito è molto esposto e vulnerabile ai previsti cambiamenti climatici, e i singoli edifici sono in prima linea rispetto a tali impatti, quali interfacce tra il clima esterno, soggetto alle alterazioni, e il comfort interno, che deve essere adeguato al benessere degli utenti e allo svolgimento delle loro attività.

La frase citata, estratta dalla sintesi delle implicazioni per gli edifici analizzate nel Quinto Rapporto IPCC, svolta dall'Università di Cambridge e altri enti, tra cui il Building Performance Institute Europe (BPIE), sottolinea quanto siano variabili gli effetti del cambiamento climatico in termini di localizzazione geografica e della relativa morfologia del contesto territoriale, che richiedono quindi attente analisi preliminari in fase di progetto e di intervento sul costruito.

Lo schema in Figura 2.10 deriva da un articolo di de Wilde e Coley (2012)[7], riferimento prezioso nell'introduzione al rapporto tra cambiamento climatico ed edifici, di cui appunto ne sintetizza il sistema cause-effetti: inizialmente le note forzanti climatiche antropogeniche e naturali, da cui hanno origine in prima istanza gli impatti ambientali, a loro volta determinanti per molti aspetti

[6] «È previsto che il cambiamento climatico abbia profondi impatti sull'ambiente costruito, anche se la portata precisa di tali impatti è incerta e varierà significativamente tra ed entro le regioni.»; Chalmers, P., 2014. Climate Change: Implications for Buildings. Key Findings from the Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report. In *Climate Everyone's Business*. University of Cambridge, BPIE, GBPN, WBCSD, p. 12.

[7] de Wilde, P., Coley, D., 2012. The Implications of a Changing Climate for Buildings. In *Building and Environment*, 55, pp. 1–7.

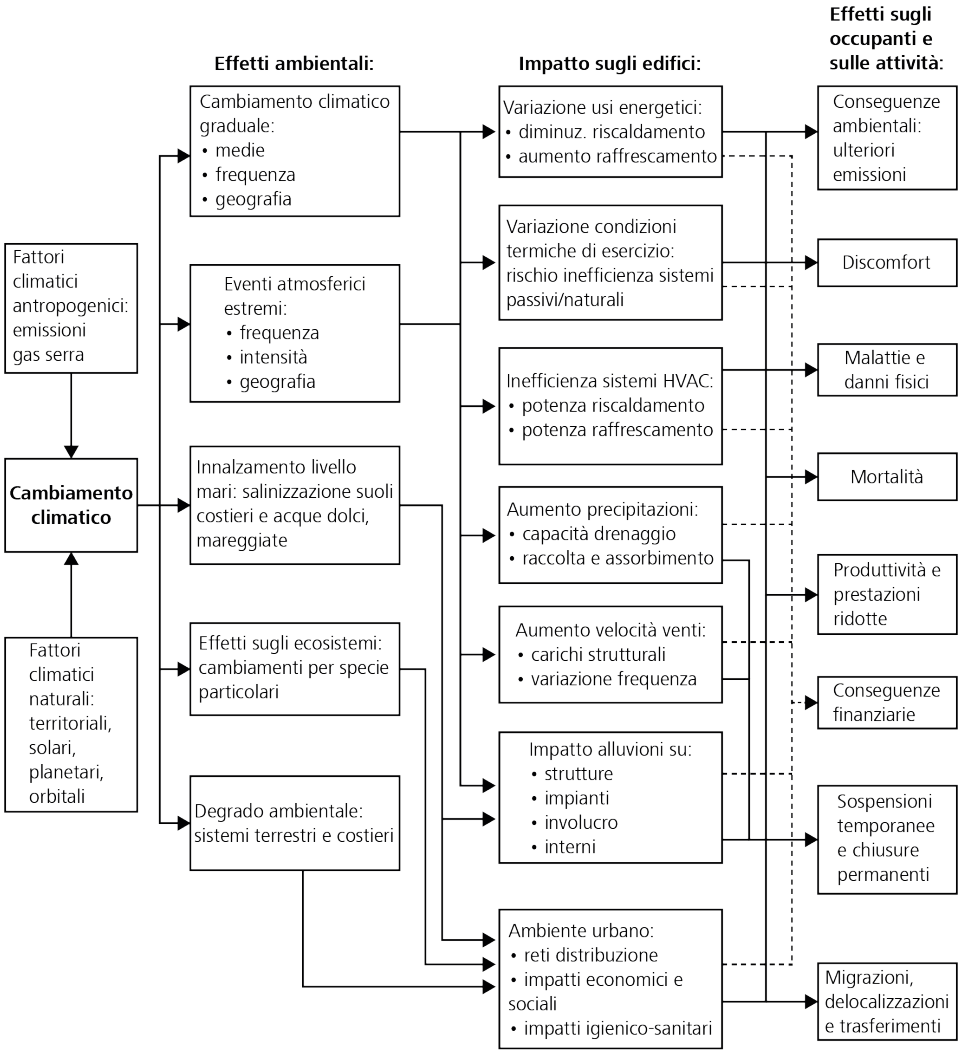


Figura 2.10

Schema dei principali effetti del cambiamento climatico sugli edifici, sugli occupanti e sulle attività ad essi connesse. Fonte: tradotto da de Wilde, Coley, *op. cit.*, p. 2.

del settore edile, e quindi i potenziali rischi per gli occupanti, sociali ed economici; vengono solo accennate le possibili ulteriori emissioni a causa dei maggiori consumi energetici previsti, che possono innescare il già descritto processo di feedback.

Gli effetti ambientali vanno da cambiamenti graduali e più generalizzati, quali il riscaldamento globale, a eventi estremi più localizzati, come ondate di calore, fenomeni atmosferici straordinari e alluvioni.

Nel primo caso, il risultato più evidente dal punto di vista edilizio è la variazione delle prestazioni energetiche, tema centrale della presente tesi, con la probabile riduzione dei fabbisogni per il riscaldamento e l'opposto aumento per il raffrescamento e il rischio di inefficienza degli impianti e di inefficacia delle soluzioni costruttive, come discusso nei capitoli successivi.

Per gli eventi estremi, invece, gli impatti sul settore edile sono diversificati a seconda del fenomeno: se le ondate di calore influiscono ancora sulla componente energetica, precipitazioni, venti, incendi o alluvioni più frequenti e intensi riguardano gli elementi tecnici e i materiali, a livello strutturale, di involucro e di finitura.

Nelle aree urbane, le temperature crescenti possono aumentare i fenomeni di isola di calore o, unitamente agli eventi estremi, avere altre conseguenze su larga scala, dai danni alle infrastrutture di fornitura energetica e di trasporto, al superamento della capacità di drenaggio e smaltimento delle acque meteoriche, fino alla mancata gestione dei servizi essenziali.

Di qui gli effetti sugli occupanti negli edifici e sulla collettività urbana, in termini igienico-sanitari, sociali ed economici, quali malattie e mortalità crescenti, disponibilità di cibo e acqua potabile, migrazioni, disoccupazione, chiusure e fallimenti di attività.[8]

[8] van Staden, R., 2014. Climate Change: Implications for Cities. Key Findings from the Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report. In *Climate Everyone's Business*. University of Cambridge, ICLEI, pp. 6-7.

Strategie di progetto in risposta al cambiamento climatico

> *«Buildings built today need to be designed to work successfully in both the current and future climate, and with the aim of reducing the greenhouse emission burden they place on this and future generations»*.[9]

Considerati i vicendevoli impatti tra il cambiamento climatico e il settore edile, e il rischio di un inasprimento ricorsivo degli stessi, si pone l'evidente necessità di contrastarne la portata in modo duplice, riducendo o azzerando consumi energetici e processi altamente emissivi e rendendo progetti ed edifici adattivi alle mutevoli condizioni esterne, attuali o future.

Come visto al capitolo precedente, nella pianificazione politica e normativa è sempre prevalso l'approccio di mitigazione dei fattori antropogenici negativi, intesa generalmente come sostenibilità ambientale delle attività e dei prodotti umani, nel senso di minor impatto possibile sugli ecosistemi naturali e sul costruito. A tal proposito e specificamente in applicazione agli edifici, la citazione iniziale da Wilde e Coley (2012)[10] ribadisce l'eguale e complementare importanza dell'adattamento al cambiamento climatico rispetto alla mitigazione, pur sempre necessaria.

Tali strategie andrebbero perseguite in maniera sempre più ottimizzata in chiave economica, come previsto in molte recenti normative, soprattutto nel lungo termine, e diventa quindi ancora più utile la previsione delle condizioni climatiche future e della loro variabilità a livello locale, tema sviluppato nei capitoli seguenti.

---

[9] «Gli edifici costruiti oggi devono essere progettati per operare efficacemente nel clima sia attuale sia futuro, e con l'obiettivo di ridurre il carico di emissioni a effetto serra che impongono su questa e le future generazioni.»; de Wilde, Coley, *op. cit*, p.1.

[10] *Ivi.*

Ad ogni modo, nonostante l'emergenza della questione, una tradizionalmente maggiore sensibilità alla mitigazione e alla sostenibilità ambientale, purtroppo solo nelle intenzioni, un *know-how* progettuale e costruttivo ormai affinato e implementato in soluzioni dall'efficacia inconfutabile, una loro estesa e sistematica applicazione è ancora troppo limitata, fallendo nel contrastare la crescente domanda energetica, derivata dai fattori strutturali e dalle condizioni al contorno visti al paragrafo precedente.

In ambito edile, sia nelle nuove costruzioni sia negli interventi di retrofit sull'esistente, la mitigazione passa dalla riduzione dei fabbisogni e dei consumi finali di energia, tramite una maggiore efficienza dell'involucro e degli impianti, e delle emissioni di gas serra, attraverso la decarbonizzazione delle fonti primarie e dei materiali nel loro intero ciclo di vita.

Le soluzioni progettuali possono quindi essere distinte in base al diverso aspetto o parametro che vanno ad influenzare: rispetto al fabbisogno netto di energia, si applicano generalmente misure passive all'involucro edilizio; il consumo finale è invece legato alle tecnologie di condizionamento termico e impiantistiche, attive o passive, e al loro livello di efficienza; l'energia primaria dipende infine dalla scelta delle fonti e dai metodi di generazione dei vettori di fornitura, e influisce sulle emissioni definitive.

Nelle fasi di concezione e preliminari del progetto, soprattutto negli edifici *ex novo*, bisogna anticipare gli aspetti costruttivi considerando l'orientamento, l'esposizione e l'inserimento nel contesto, e dal punto di vista compositivo, valutando ed esempio il rapporto di forma tra superfici perimetrali e volumi climatizzati, elementi fondamentali per le prestazioni energetiche in esercizio.

Quindi, come introdotto, per contenere i fabbisogni energetici si agisce sull'involucro, con soluzioni quasi sempre passive che riguardano:

- l'isolamento termico delle superfici opache e trasparenti, tramite materiali e serramenti adeguati;
- l'inerzia termica, con elementi massivi o leggeri a seconda della destinazione d'uso e del contesto climatico, fino all'impiego di sistemi vegetali in tetti e pareti verdi;

- l'estensione delle superfici trasparenti in funzione dell'esposizione e della stagione;
- il controllo degli apporti solari con la schermatura o la riflessione della radiazione incidente.

I fabbisogni risultanti vengono soddisfatti dagli impianti di climatizzazione: talvolta passivi, quali la ventilazione e il raffrescamento naturali, a energia nulla, o nella maggior parte dei casi attivi, che richiedono diverse forme di energia. Dalla tecnologia scelta si innesca a questo punto il processo a catena precedentemente descritto, che collega l'efficienza dell'impianto al consumo di energia finale, i rispettivi vettori di fornitura all'energia primaria, e le relative fonti alle emissioni di gas serra. Gli impianti a combustione fossile o da biomasse tradizionali, ad oggi chiaramente poco efficienti e altamente emissivi di CO_2, se nel nuovo non sono nemmeno più considerati, nell'esistente possono essere sostituiti da altri analoghi più performanti. Tuttavia, sono ormai preferiti i sistemi in grado di fornire riscaldamento e raffrescamento in un'unica soluzione, come le pompe di calore invertibili, ad alimentazione elettrica per sfruttare il potenziale di risorse rinnovabili quali l'aria esterna o la geotermia, limitando i consumi finali.

Altre fonti rinnovabili come energia solare o eolica diventano fondamentali nella produzione dello stesso vettore energia elettrica o dell'ACS, per mitigare le emissioni indirette del settore edile, tramite impianti fotovoltaici, solari termici ed eolici integrati all'edificio o nella distribuzione da rete.

I processi di cogenerazione, invece, ad esempio nel teleriscaldamento, possono considerarsi vie di compromesso, poiché pur basati indirettamente sulla combustione fossile, permettono comunque di ridurre il consumo effettivo di energia primaria e i livelli di emissioni.

3. Previsione dei dati climatici futuri

Scenari, modelli, metodi

> *«Unlike most other scientific works, projections of climate change cannot be validated, since they do not relate to a currently replicable event».*[1]

Progettare edifici resilienti al cambiamento climatico è un'esigenza sempre crescente in architettura, ed è fondamentale una realistica previsione dei suoi impatti per prevenire conseguenze dannose per gli occupanti o ulteriormente negative per l'ambiente, dovute a sottovalutazione dei rischi o a scelte costruttive inadeguate. Le proiezioni sul futuro sono alla base delle politiche di mitigazione delle emissioni di gas serra e determinano, quindi, le strategie di adattamento in tutti i settori economici e sociali.

La citazione in apertura pone subito la questione dell'incertezza intrinseca in un processo simile, a maggior ragione nel caso dei cambiamenti climatici, che dipendono nettamente dai comportamenti umani e dalle loro variabili decisioni, in cui non sono totalmente note alcune dinamiche di interazione tra concentrazioni di gas serra e atmosfera, e i cui effetti non sono ancora completamente determinabili per portata e distribuzione geografica.

[1] «A differenza della maggioranza degli altri lavori scientifici, le previsioni del cambiamento climatico non possono essere validate, poiché non si riferiscono a un evento attualmente replicabile.»; Guan, L., 2009. Preparation of Future Weather Data to Study the Impact of Climate Change on Buildings. In *Building and Environment*, 44, 4, p. 796.

Grazie a tutte le evidenze in nostro possesso, è tuttavia possibile anticipare alcuni eventi, sia dalle tendenze già in atto sia attraverso simulazioni e modelli matematici. Il presente capitolo intende analizzare gli elementi principali del campo di indagine delle previsioni legate al cambiamento climatico, in particolare nelle applicazioni destinate alla progettazione energetica in edilizia, rappresentati da:

- gli scenari di emissioni, elaborati dalla comunità scientifica internazionale e validati dall'IPCC;
- i modelli climatici e di circolazione atmosferica, che simulano l'evoluzione delle caratteristiche ambientali e fisiche del pianeta;
- i metodi di generazione vera e propria, basati su serie storiche di dati, sulle condizioni attuali delle località in oggetto, su diverse procedure di calcolo;
- le tipologie di dati climatici su cui impostare tutto il processo, variabili per cadenza temporale, da mensile a giornaliera od oraria, e per i valori di riferimento selezionati, se tipici, medi o estremi;
- gli orizzonti temporali dell'analisi, da breve a medio o lungo termine nel corso del XXI secolo, a seconda della vita utile dell'edificio in oggetto e dello scenario emissivo impiegato.

Nella prima parte del capitolo si discutono gli scenari di emissioni antropogeniche utilizzati nelle ricerche sul clima futuro, di fatto quelli presentati dall'IPCC in due versioni storiche: nello *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES)[2] del 2000, che li identificava in base al modello di sviluppo socio-economico e al relativo tenore di emissioni, e nel successivo Quinto Rapporto di Valutazione (AR5) del 2014, che li ha sostituiti con i già citati *Representative Concentration Pathways*, definiti dal valore del forzante

[2] IPCC, 2000. Summary for Policymakers. In *Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [N. Nakicenovic, R. Swart (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito.

radiativo a fine XXI secolo e che integrano strategie di mitigazione già in atto o previste.

In secondo luogo si rivolge l'attenzione ai modelli climatici e atmosferici più diffusi, distinguibili in globali (Global/General Circulation/Climate Models, GCM), che considerano l'intero pianeta, con una risoluzione più grossolana, o regionali (Regional Circulation/Climate Models, RCM), limitati a specifiche aree geografiche ma più raffinati nel considerare la morfologia del territorio. In questo caso, le fonti sono ancora il Rapporto IPCC, che utilizza diversi modelli globali e regionali per valutare gli impatti del cambiamento climatico attuali e previsti, per definire gli scenari di emissioni, di mitigazione e di adattamento, e altri studi dalla letteratura scientifica.

Infine, si descrivono le metodologie di generazione dei dati climatici futuri, che si basano sugli elementi elencati precedentemente e su diverse procedure di calcolo, attingendo ancora dalle ricerche più recenti o autorevoli nel campo, che ha avuto un forte impulso negli ultimi vent'anni.
Quella più impiegata in applicazione agli edifici è il cosiddetto *morphing*, che consiste nell'implementare le previste variazioni climatiche a livello globale ai valori attuali di riferimento, attraverso specifici algoritmi matematici messi a punto da Belcher et al. (2005)[3]; altri metodi quali il *downscaling* dinamico o la generazione stocastica, utilizzano calcoli statistici o probabilistici più complessi e richiedono impegni computazionali maggiori, motivi della loro limitata diffusione nella progettazione energetica.[4]

[3] Belcher, S.E., Hacker, J.N., Powell, D.S., 2005. Constructing Design Weather Data for Future Climates. In *Building Services Engineering Research and Technology*, 26, 1, pp. 49–61.
[4] *Ivi*, p. 50.

Scenari di emissioni

> *«Scenarios are alternative images of how the future might unfold and are an appropriate tool with which to analyse how driving forces may influence future emission outcomes and to assess the associated uncertainties».* [5]

Gli scenari di emissioni sono il primo step fondamentale per prevedere il clima futuro poiché descrivono le possibili evoluzioni delle attività umane e, per includere le incertezze legate a tali fattori, sono formulati secondo un ampio spettro di alternative.

Come accennato in precedenza, nell'ambito dello SRES (IPCC, 2000) sono state elaborate quattro famiglie di scenari, caratterizzate da diverse linee narrative per il futuro del pianeta, legate al tipo di sviluppo sociale, economico e tecnologico intrapreso; nelle Figure 3.1-3.2 sono riportate le rispettive condizioni e i livelli di emissioni corrispondenti nel corso del XXI secolo.

Il gruppo A1 si riferisce a un modello di sviluppo a rapida crescita economica, maggiore coesione sociale globale e riduzione delle differenze regionali, e si articola in tre possibili scenari di tecnologie energetiche: A1FI con uso intensivo dei combustibili fossili, che comporta emissioni crescenti fino alla stabilizzazione a fine secolo intorno alle 30Gt di carbonio annue; A1T con fonti energetiche non fossili ed emissioni con picco oltre le 10Gt annue al 2030 e in successivo calo; A1B equilibrato e con picco al 2050 intorno alle 15Gt e tenore piuttosto stabile in seguito. Lo scenario A2 è invece relativo a uno sviluppo più frammentato e locale, pur con crescita economica rapida, e un aumento costante delle emissioni fino a circa 30Gt di carbonio annue. Le famiglie

[5] «Gli scenari sono rappresentazioni alternative di come potrebbe rivelarsi il futuro e uno strumento adatto ad analizzare come i fattori determinanti (dello sviluppo) potrebbero influenzare gli effetti delle future emissioni, e a valutare le relative incertezze.»; IPCC, 2000, op. cit., p. 3.

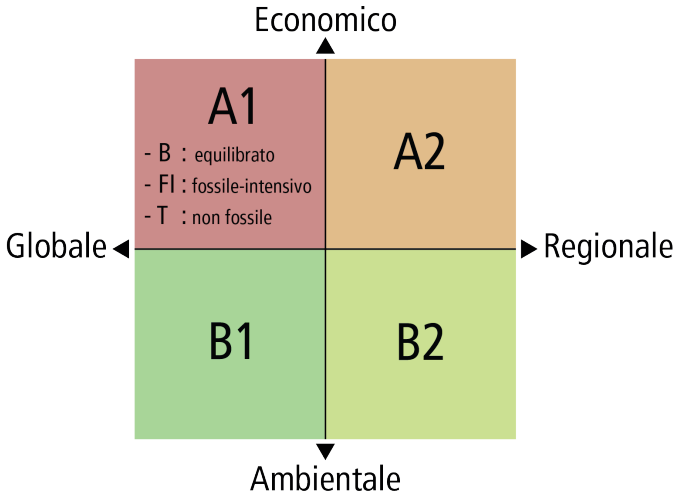


Figura 3.1
Schema degli scenari socio-economici sviluppati nell'ambito dello SRES.
Fonte: riadattato da IPCC, 2001. *Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Integovernmental Panel on Climate Change*, [R.T. Watson, Core Writing Team (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA, p. 62.

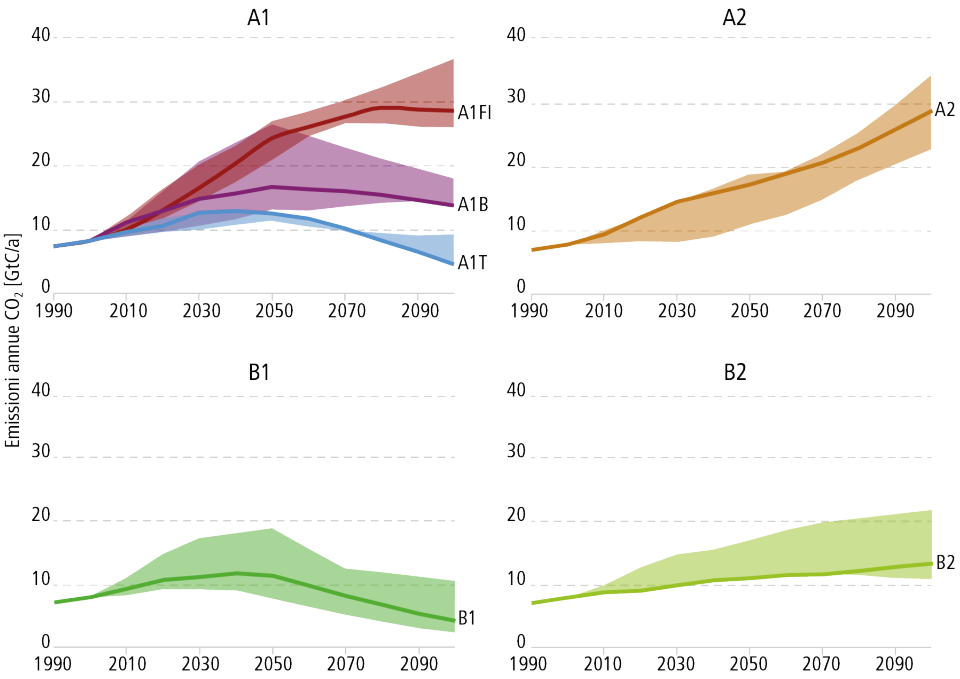


Figura 3.2
Scenari SRES in funzione delle emissioni annue di CO_2 fino al 2100.
Fonte: tradotto da IPCC, 2000, *op. cit.*, p. 8.

contrassegnate dalla lettera B sono invece orientate a modelli di sviluppo più sostenibile in termini ambientali, con lo scenario B1 più improntato all'efficienza tecnologica in un contesto globalizzato, le cui emissioni annue raggiungono un massimo oltre le 10Gt a metà secolo per poi calare, mentre il B2 è legato a scelte di conversione tecnologica regionali e disomogenee, con efficacia più lenta e che implicano un aumento di emissioni graduale fino a circa 15Gt annue a fine secolo.

Nel Quinto Rapporto di Valutazione IPCC del 2014 sono stati invece adottati nuovi scenari di emissioni, i *Representative Concentration Pathways* già introdotti nel precedente capitolo 1, identificati dal valore del forzante radiativo a fine secolo e confrontati con gli SRES nei grafici alle Figure 3.3-3.6. Sono intesi come "percorsi" poiché non rappresentano scenari definitivi, ma piuttosto proiezioni di fattori antropogenici riferibili a più di un modello di sviluppo socio-economico[6], ma non per questo sono necessariamente migliori dei predecessori a prefigurare le possibili evoluzioni future.[7]
Il RCP 2.6 conduce a livelli di concentrazione di gas serra molto bassi e presenta un picco nel forzante radiativo intorno a 3W/m^2 a metà secolo, tornando a 2,6W/m^2 entro il 2100, con costante riduzione delle emissioni attuali e necessità di emissioni nette negative. Per i RCP 4.5 e 6.0, il forzante radiativo si stabilizza intorno a 4,2W/m^2 o 6W/m^2 dopo il 2100 mediante l'impiego di diverse tecnologie e strategie di mitigazione delle emissioni. Il RCP 8.5 è caratterizzato da un continuo aumento delle emissioni fino alla stabilizzazione del forzante radiativo a 8,5W/m^2.

[6] Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichefet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W.J., Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Tebaldi, C., Weaver, A.J., Wehner, M., 2013. Long-Term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In *Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA, p. 1045.
[7] Cubasch, U., et al., Introduction, op. cit., p. 147.

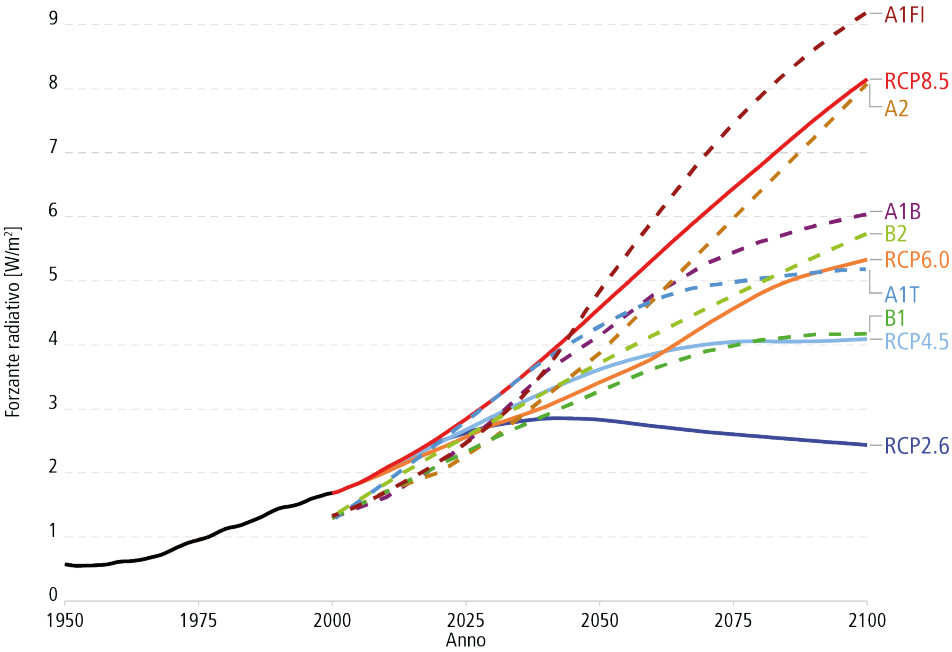


Figura 3.3

Confronto tra scenari SRES e RCP in funzione del forzante radiativo antropogenico totale fino al 2100. Fonte: riadattato da Cubasch et al., *op. cit.*, p. 146; e dal sito web *New South Wales Government* https://climatechange.environment.nsw.gov.au/Climate-projections-for-NSW/About-NARCliM/Emissions-scenarios.

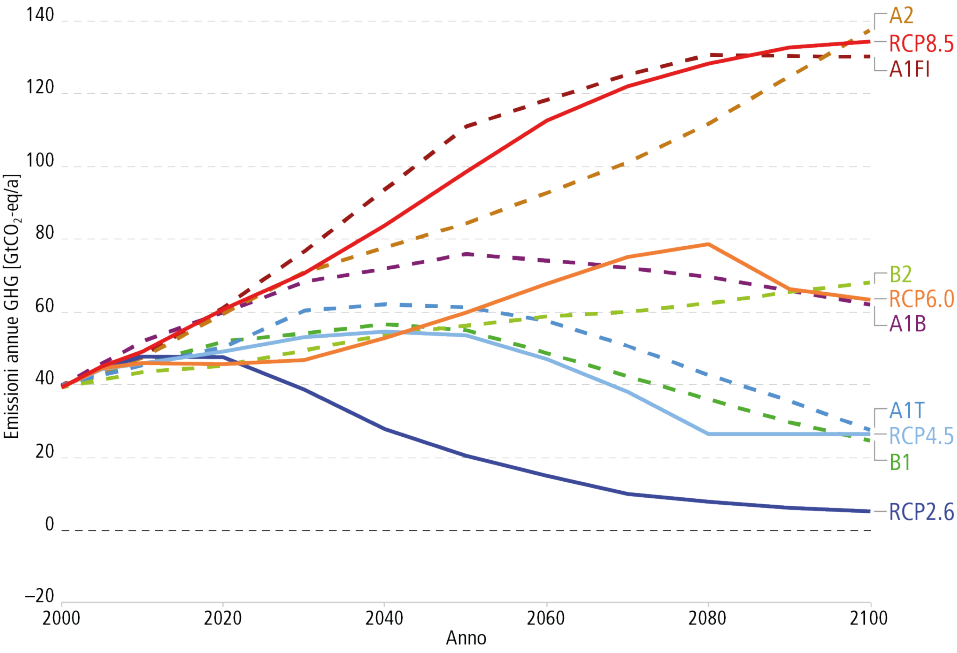


Figura 3.4

Confronto tra scenari SRES e RCP in funzione delle emissioni totali annue di GHG fino al 2100. Fonte: riadattato da IPCC, 2014, *op. cit.*, p. 82; e da IPCC, 2007, *op. cit.*, p. 44.

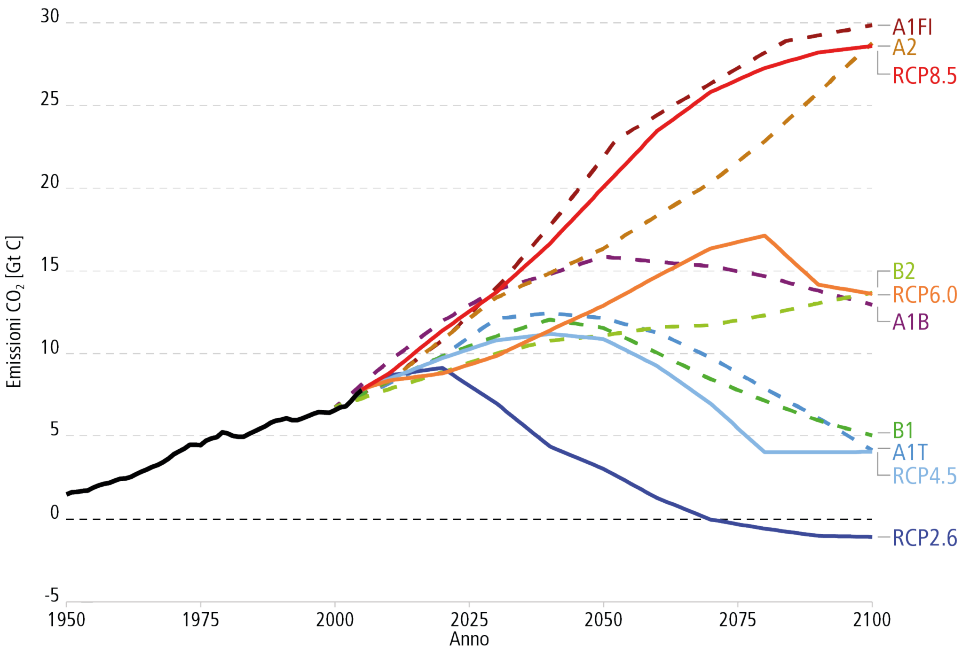


Figura 3.5

Confronto tra scenari SRES e RCP in funzione delle emissioni annue di CO_2 fino al 2100.
Fonte: riadattato da Cubasch et al., *op. cit.*, p. 149.

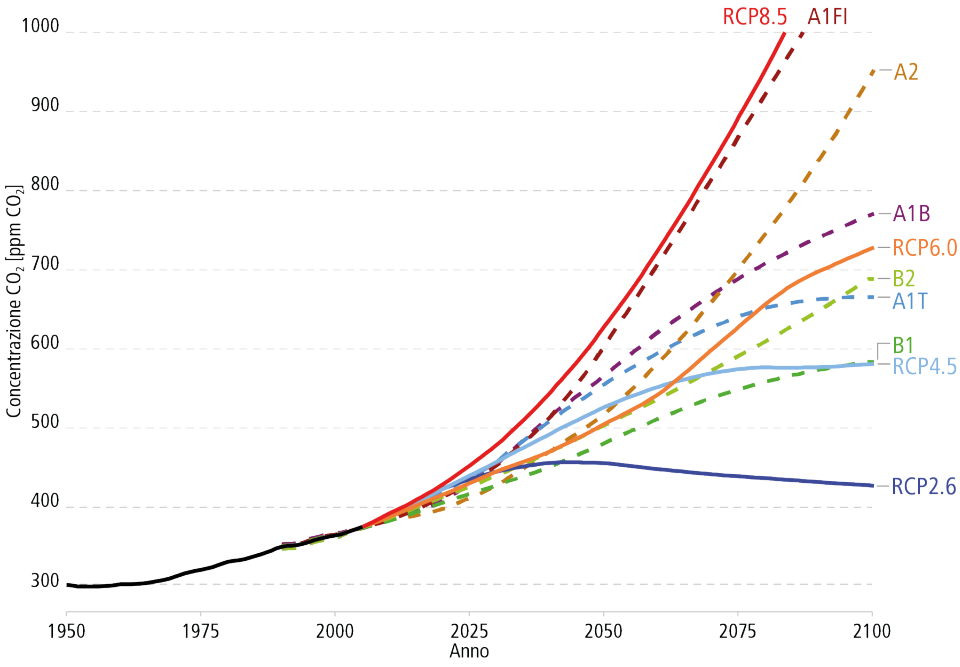


Figura 3.6

Confronto tra scenari SRES e RCP in funzione della concentrazione di CO_2 in atmosfera fino al 2100.
Fonte: riadattato da Cubasch et al., *op. cit.*, p. 149.

Modelli climatici

I modelli climatici sono modelli numerici che simulano le interazioni tra atmosfera, oceani, superficie terrestre e ghiacciai, utilizzati per discretizzare e risolvere le equazioni dei bilanci di massa ed energia e dello scambio radiativo all'interno del sistema climatico terrestre.

Come anticipato, i modelli globali o di circolazione generale (GCM) coprono l'intero pianeta e processi su larga scala, basandosi sui principi della fluidodinamica e della termodinamica, ma con risoluzioni spaziali, nell'ordine di alcune centinaia di chilometri, e temporali, da medie mensili a circa sei ore, grossolane. Quelli tradizionalmente più diffusi sono gli AOGCM (Atmosphere-Ocean GCM)[8], che considerano le componenti fisiche del sistema climatico e usati per le proiezioni future del Quarto Rapporto di Valutazione IPCC (AR4); mentre più recentemente, con l'aumento della comprensione scientifica delle dinamiche più complesse del clima, come i cicli biogeochimici del carbonio, dello zolfo o dell'ozono, e della potenza di calcolo delle tecnologie informatiche, sono stati sviluppati i Modelli del Sistema Terrestre (ESM, Earth System Models), con progressi anche in termini di risoluzione spaziale e temporale, come da Figura 3.7.

Negli ultimi due Rapporti IPCC il contributo fondamentale sul tema deriva dal Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) del WRCP (World Climate Research Programme), una piattaforma per confrontare numerosi modelli climatici simultaneamente ed elaborare proiezioni più consolidate: nel caso del

[8] Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S.C., Collins, W., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V., Forest, C., Gleckler, P., Guilyardi, E., Jakob, C., Kattsov, V., Reason, C., Rummukainen, M., 2013. Evaluation of Climate Models. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA, p. 746.

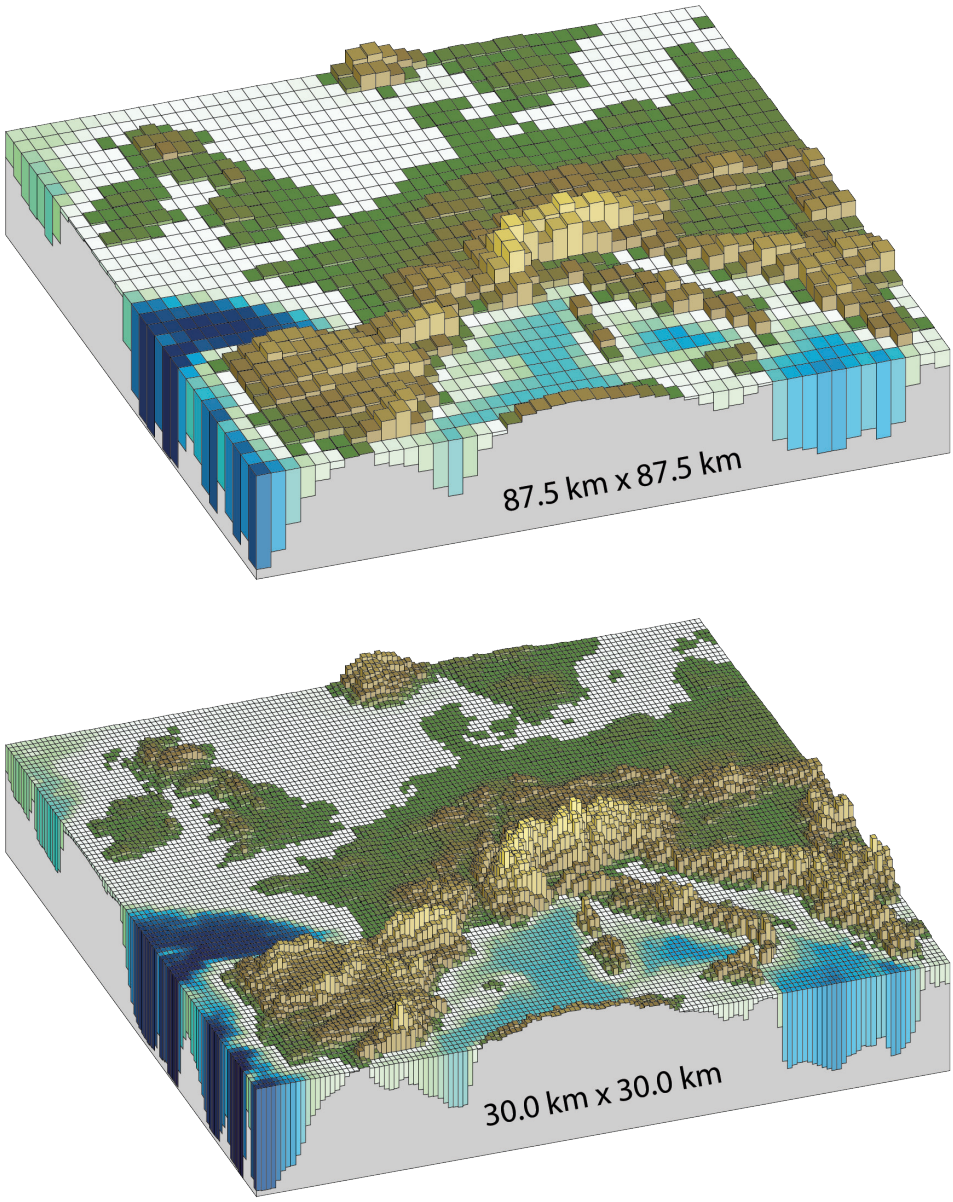


Figura 3.7
Modelli climatici globali a risoluzione crescente di ultima generazione.
Fonte: Cubasch et al., *op. cit.*, p. 145.

AR4 il CMIP3 (terza fase), basato su soli AOGCM, mentre per il più recente AR5 il CMIP5 (quinta fase), che include gli ESM di nuova generazione.
Alcuni esempi di GCM più noti sono l'HadCM3[9] del servizio meteorologico britannico Met Office, il CESM[10] statunitense, e il CESM-NEMO[11] del Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici.

Per valutare i variabili impatti locali del cambiamento climatico e pianificare strategie di adattamento, sono necessari i modelli climatici regionali (RCM), con risoluzioni molto maggiori dei GCM poiché insistono su aree limitate, fornendo dettagli su orografia e uso del suolo, sui cicli glaciali e delle acque e sulla biosfera nel contesto analizzato. Un RCM deriva sempre da un GCM tramite generiche procedure di *downscaling* e i dati e i processi globali rappresentano le condizioni al contorno del modello più dettagliato, che ne diventa molto spesso complementare, con la griglia di risoluzione elevata che si innesta su quella a larga scala.
I modelli in questa categoria sono molto più numerosi al variare delle zone climatiche: si citano l'EURO-CORDEX[12] e il COSMO-CLM[13] del CMCC per l'Europa e l'Italia, e il PRECIS[14] del Met Office britannico.

[9] Met Office. HadCM3, accessibile online al sito https://www.metoffice.gov.uk/research/approach/modelling-systems/unified-model/climate-models/hadcm3.
[10] National Center for Atmospheric Research (NCAR). CESM, accessibile online al sito http://www2.cesm.ucar.edu/models/.
[11] Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC). CESM-NEMO, accessibile online al sito https://www.cmcc.it/it/models/cmcc-cesm-nemo-climate-coupled-model.
[12] EURO-CORDEX, accessibile online al sito https://euro-cordex.net/index.php.en.
[13] CMCC. COSMO-CLM, accessibile online al sito https://www.cmcc.it/it/models/cosmo-clm-climate-limited-area-modelling-community.
[14] Met Office. PRECIS, accessibile online al sito https://www.metoffice.gov.uk/research/applied/international/precis/introduction.

Metodi di generazione

La generazione dei dati climatici futuri è un processo indispensabile per determinarne quantitativamente i rispettivi cambiamenti previsti e per valutarne gli impatti sulle prestazioni energetiche degli edifici nel lungo termine, al fine di elaborare adeguate strategie di intervento e di adattamento. I metodi esposti nel seguito sono rivolti sia alla previsione di tali variabili e parametri, sia alla loro eventuale trasformazione nella forma richiesta, dato che nelle analisi svolte in questo campo è pressoché costante l'impiego della simulazione energetica dinamica (v. cap. 4), che necessita di valori su base oraria quali condizioni al contorno per calcolare gli indicatori prestazionali dell'edificio.[15]

A tal proposito, si distinguono due approcci fondamentali: uno su base "storica" (Guan, 2009)[16] o "relativa" (Cox et al., 2015)[17], che a partire da serie storiche di dati realmente misurati nella specifica località, applica le variazioni medie previste nelle tendenze climatiche globali, l'altro su base esclusivamente "fisica" (Guan) o "assoluta" (Cox et al.), che determina le condizioni future del sito direttamente dai modelli climatici di simulazione, globali o regionali, calibrandoli alla scala adeguata.

Guan suddivide ulteriormente la prima categoria in: metodi di "estrapolazione statistica"[18], tra cui quello dei gradi giorno, finalizzato a una stima rapida delle prestazioni dell'edificio (v. cap. 4), preliminare o alternativa alla simulazione dinamica, e basato soltanto sui valori medi giornalieri della temperatura esterna, storici o attuali, sommandone le differenze rispetto alla soglia di set

[15] de Wilde, P., Coley, D. The Implications of a Changing Climate for Buildings, op. cit., p. 3.
[16] Guan, *op. cit.*
[17] Cox, R.A., Drews, M., Rode, C., Balslev Nielsen, S., 2015. Simple Future Weather Files for Estimating Heating and Cooling Demand. In *Building and Environment*, 83, pp. 104-14.
[18] Guan, *op. cit.*, p. 793.

point dell'ambiente interno; metodi a "variazione imposta"[19], a cui appartiene il già citato *morphing* elaborato da Belcher et al. (2005)[20].

È sicuramente la procedura più diffusa in ambito energetico-edile, poiché garantisce un efficace *downscaling* delle previsioni climatiche dei modelli atmosferici globali o regionali, ad ampio raggio e con diversi gradi di precisione, alla risoluzione spaziale e temporale necessaria per la simulazione dinamica, a fronte di un carico computazionale accettabile ed eseguibile in modo autonomo dai progettisti con vari applicativi software. I profili climatici così ottenuti sono infatti già nella forma oraria dei file di input, e coerenti con la variabilità delle serie storiche consolidate della località in oggetto; ciò può tuttavia rappresentare un limite alla procedura stessa, proprio per il fatto di mantenere l'andamento attuale e di non considerare le possibili diverse variazioni interannuali a causa del cambiamento climatico.[21]

Gli autori definiscono tre algoritmi a seconda del parametro da modificare:

- uno *shift*, ossia una traslazione rigida aggiungendo l'incremento assoluto medio mensile previsto Δx_m al valore attuale orario x_0:

$$x = x_0 + \Delta x_m \tag{3.1}$$

- uno *stretch*, quindi una variazione di ampiezza moltiplicando l'incremento relativo medio mensile previsto α_m per il valore attuale orario x_0:

$$x = \alpha_m x_0 \tag{3.2}$$

- e la combinazione di (3.1) e (3.2):

$$x = x_0 + \Delta x_m + \alpha_m \times (x_0 - \langle x_0 \rangle_m) \tag{3.3}$$

dove $\langle x_0 \rangle_m$ è il valore medio mensile attuale.

[19] *Ivi*, p. 794.
[20] Belcher et al., *op. cit.*
[21] *Ivi*, p. 51.

L'algoritmo *shift* è applicato ad esempio alla pressione atmosferica, di cui è fornita la variazione assoluta; lo *stretch* alla velocità del vento o alla radiazione solare, con sola variazione relativa o valori nulli nel corso della giornata; mentre la combinazione dei due effetti a parametri quali la temperatura a bulbo secco, di cui vanno trasformati sia i valori medi sia la varianza temporale dei valori massimi e minimi.[22]

Per quanto riguarda l'approccio definito di tipo "fisico" o "assoluto", Guan individua i metodi "stocastici"[23] e quelli basati direttamente su specifici modelli climatici globali[24].

La generazione stocastica[25] è impiegata dai cosiddetti generatori di file climatici, che confrontano diversi modelli globali e regionali e ne selezionano i valori più probabili e ricorrenti per la località considerata, creando un database statistico fisicamente più attendibile rispetto a quello ricavabile tramite morphing; un esempio sono le Proiezioni Climatiche per il Regno Unito (UKCP) del servizio meteorologico britannico Met Office, con cui sono stati generati diversi profili climatici da modelli regionali ad altissima risoluzione. La limitata disponibilità di tali strumenti di ricerca in molti Paesi è tuttavia un evidente ostacolo all'applicazione di tale procedura nella progettazione energetica.[26]

Per ricavare i dati direttamente dai modelli climatici, i metodi principali sono il *downscaling* dinamico[27] e l'interpolazione[28], utilizzati per ridurre a scala locale le proiezioni generali.

Nel primo caso sono necessari modelli sempre più raffinati che introducono i dettagli topografici del sito considerato e i processi di circolazione oceanica e atmosferica di *mesoscala*[29], per una previsione molto più realistica che mantiene le correlazioni tra le diverse variabili climatiche locali, ma

[22] *Ivi*, p. 52.
[23] Guan, op. cit., p. 794.
[24] *Ivi*, p. 795.
[25] Belcher et al., *op. cit.*, p. 50.
[26] Cox et al., *op. cit.*, p. 106.
[27] Belcher et al., *op. cit.*, p. 50.
[28] *Ibid.*
[29] *Ibid.*

estremamente più complessa e impegnativa a livello computazionale, soprattutto per ottenere file su base oraria; tale approccio è gestibile da grandi centri di ricerca climatica e poco praticabile in campo edile.[30]
D'altro canto, l'interpolazione in senso spaziale e temporale delle proiezioni grossolane dei GCM, porta con sé gli errori sistematici intrinseci a tali modelli e può generare valori climatici inconsistenti dal punto di vista fisico per la località considerata.[31]

Per generare i dati climatici futuri in applicazione alle prestazioni energetiche degli edifici, alcuni dei software più largamente impiegati sono CCWorldWeatherGen[32] e WeatherShift®[33], entrambi basati sul morphing.
Il primo, sviluppato dall'Università di Southampton, utilizza le previsioni del modello globale HadCM3, secondo lo scenario emissivo A2 dello SRES[34].
Il secondo attinge da 14 diversi GCM del CMIP5, secondo gli scenari RCP 4.5 e 8.5 dell'IPCC, implementando un approccio probabilistico: le previste variazioni dei parametri climatici vengono infatti organizzate in una funzione di distribuzione cumulata (CDF) e i valori selezionati in base al *warming percentile* (WP)[35], la percentuale di modelli climatici che mostra differenze minori o uguali a quelle considerate nello scenario di emissioni[36].

[30] Cox et al., *op. cit.*, p. 106.
[31] Belcher et al., *op. cit.*, p. 50.
[32] University of Southampton – Energy and climate change. CCWorldWeatherGen, accessibile online al sito https://energy.soton.ac.uk/ccworldweathergen/.
[33] WeatherShift®, accessibile online al sito http://www.weathershift.com/.
[34] Jentsch, M.F., James, P.A.B., Bourikas, L., Bahaj, A.B.S., 2013. Transforming Existing Weather Data for Worldwide Locations to Enable Energy and Building Performance Simulation under Future Climates. In *Renewable Energy*, 55, pp. 514–24.
[35] Dickinson, R., Brannon, B., 2016. Generating Future Weather Files for Resilience. In *PLEA 2016 Los Angeles - 36th International Conference on Passive and Low Energy Architecture. Cities, Buildings, People: Towards Regenerative Environment*. 11-13/07/2016, Los Angeles, USA.
[36] Bilardo, M., Ferrara, M., Fabrizio, E., 2019. Resilient Optimal Design of Multi-Family Buildings in Future Climate Scenarios. In *E3S Web of Conferences*, 111, 06006, Congresso CLIMA 2019, Bucarest, Romania, p. 3.

A questo punto emerge l'importanza dei database climatici rappresentativi della località di riferimento, elaborati in forme variabili per tipologia e suddivisione temporale dei valori.
L'anno tipo è la versione più impiegata, poiché composto da valori a cadenza oraria nella forma necessaria alla simulazione energetica dinamica, come noto. La metodologia di selezione dei dati dalle serie storiche è piuttosto condivisa[37]: delle diverse variabili si calcolano i valori mediati su tutti i mesi corrispondenti dell'intervallo di riferimento, solitamente compreso tra i quindici e i trent'anni; i mesi reali dell'intervallo vengono confrontati con i mesi medi così ottenuti, e quelli con i valori più prossimi diventano i mesi tipici del database; l'anno tipo non è quindi un anno reale né un anno medio, ma è formato dagli 8760 valori orari estratti dai mesi tipici, reali ma derivati da anni diversi. In questo modo, l'anno tipo è basato su vere frequenze, con medie e distribuzioni di frequenza più vicine possibili ai valori tipici, vere sequenze, poiché l'evoluzione temporale è reale, e vere correlazioni tra i diversi parametri climatici.

Persistono minime differenze tra i Paesi e i centri di ricerca autori degli anni tipo, legate per lo più alla denominazione e al periodo di riferimento. I più usati sono: l'*International Weather for Energy Calculation* (IWEC) dell'ASHRAE disponibile per oltre 200 località nel mondo e sull'intervallo 1982-1999; il *Typical Meteorological Year* (TMY) statunitense, sviluppato in tre versioni progressive, il TMY sull'intervallo 1948-1980, il TMY2 sul 1961-1990 e il TMY3 sul 1991-2005; il *Test Reference Year* (TRY) e il *Design Summer Year* (DSY) britannici, forniti dal CIBSE (Chartered Institution of Building Services Engineers) sull'intervallo 1984-2013 e anche per diversi orizzonti futuri.

Altri dati climatici, su base giornaliera o mensile, sono utilizzati nei metodi semplificati dei gradi giorno e semi-stazionario per i consumi energetici.

[37] UNI EN ISO 15927-4:2005. *Prestazione Termoigrometrica Degli Edifici. Calcolo e Presentazione Dei Dati Climatici. Parte 4: Dati Orari per La Valutazione Del Fabbisogno Annuale Di Energia per Il Riscaldamento e Il Raffrescamento*.

4. Effetti del cambiamento climatico sulle prestazioni energetiche degli edifici

Processo di costruzione di conoscenza dalla letteratura esistente

> *«While the forecasted rate of change in building energy demand comes with uncertainty, the trend is clear: heating demand in the future will decrease, while the cooling demand will increase».*[1]

Come visto in precedenza, i mutamenti del clima impatteranno in modo decisivo sulla componente energetica degli edifici, con l'effetto più immediato ed evidente ribadito nella frase sopra citata: la diminuzione del fabbisogno per riscaldare gli ambienti in inverno e l'aumento della domanda per raffrescamento nel periodo estivo.

Questa semplice deduzione, logica conseguenza del riscaldamento globale, è alla base del tema dell'influenza del cambiamento climatico sulle prestazioni energetiche degli edifici, un campo di indagine a sé stante e relativamente recente nella letteratura scientifica, in costante aggiornamento e con contributi

[1] «Sebbene il previsto tasso di variazione del fabbisogno energetico dell'edificio sia affetto da incertezza, la tendenza è chiara: il fabbisogno per riscaldamento diminuirà in futuro, mentre quello per raffrescamento aumenterà.»; Andrić, I., Le Corre, O., Lacarrière, B., Ferrão, P., Al-Ghamdi, S.G., 2019. Initial Approximation of the Implications for Architecture Due to Climate Change. In *Advances in Building Energy Research*, pubblicato online 03/01/2019, p. 20.

da ogni parte del mondo; il presente capitolo si propone di analizzare alcune tra le innumerevoli pubblicazioni degli ultimi dieci anni.

Le modalità di selezione di tali fonti sono state fondamentalmente le seguenti: in prima istanza, per indicazione diretta dei docenti relatori della presente tesi, un insieme di studi e applicazioni svolti nell'ambito delle ricerche del Dipartimento DENERG del Politecnico di Torino; quindi, impiegando alcuni degli strumenti tipici di indagine bibliografica in campo scientifico, quali il database di abstract e citazioni Scopus e le piattaforme di raccolta di pubblicazioni *peer-reviewed* ScienceDirect, Google Scholar e MDPI.

A chiusura del capitolo, la Tabella 4.6 cataloga i riferimenti selezionati secondo uno schema definito dall'autore della presente tesi, confrontando alcune revisioni già svolte della letteratura scientifica disponibile (Andrić, Le Corre et al., 2019[2]; Li et. al, 2012[3]; Pérez-Andreu et al., 2018[4]); i grafici illustrati nelle pagine seguenti derivano dall'elaborazione statistica dei dati contenuti in tale tabella.

Nonostante tali studi si concentrino su aspetti più generali o più specifici e interpretino l'argomento secondo varie chiavi di lettura, è possibile individuarne aspetti comuni e passaggi ricorrenti.

Innanzitutto, se dal punto di vista qualitativo le tendenze future sono piuttosto assodate e inequivocabili[5], allora l'obiettivo fondamentale diventa la stima quantitativa della portata del cambiamento climatico, i cui effetti rappresentano la discriminante principale per le ricerche in oggetto rispetto alle semplici analisi della prestazione energetica degli edifici.

L'attenzione all'evoluzione futura del clima è quindi la svolta innovativa da implementare nelle strategie di progettazione e nella pianificazione politica e normativa in ambito energetico, poiché «trascurare del tutto tali aspetti, può

[2] *Ivi.*

[3] Li, D.H.W., Yang, L., Lam, J.C., 2012. Impact of Climate Change on Energy Use in the Built Environment in Different Climate Zones - A Review. In *Energy*, 42, 1, pp. 103–12.

[4] Pérez-Andreu, V., Aparicio-Fernández, C., Martínez-Ibernón, A., Vivancos, J.L., 2018. Impact of Climate Change on Heating and Cooling Energy Demand in a Residential Building in a Mediterranean Climate. In *Energy*, 165, pp. 63–74.

[5] Andrić, Le Corre et al., 2019, *op. cit.*, p. 20.

portare ad una errata valutazione dei risultati attesi e perfino all'incentivazione e adozione di soluzioni potenzialmente controproducenti».[6]

A livello operativo, tale approccio si esprime nel processo chiave di generazione dei dati climatici futuri, che, come discusso al capitolo precedente, richiede estrema attenzione nella scelta e nell'elaborazione degli scenari di previsione e delle serie storiche di riferimento, per limitare l'inevitabile incertezza e variabilità relativa a eventi e condizioni future.

A questo punto, si procede con il calcolo vero e proprio delle performance dell'edificio, svolto nella grande maggioranza dei casi tramite simulazione energetica dinamica; già largamente diffusa nelle comuni valutazioni energetiche degli edifici, richiede valori climatici su base oraria dettagliata, proprio nella forma in cui si ottengono con i metodi di cui sopra, per gestire in modo efficace le complesse e reciproche relazioni tra clima esterno, involucro edilizio, comfort interno e impianti tecnologici[7], e permette di confrontare diverse alternative progettuali variando le suddette condizioni al contorno.

Dalle simulazioni si ottengono i parametri energetici caratterizzanti le performance dell'edificio, quantità numeriche coerenti che consentono di comparare tra loro i diversi risultati in modo univoco.

Negli studi consultati, quasi sempre si determinano per primi i fabbisogni netti di energia per riscaldamento e raffrescamento degli ambienti; si tratta molto spesso degli unici indicatori calcolati, poiché basandosi sulle condizioni climatiche esterne e interne e sulle caratteristiche dell'involucro edilizio, mostrano già gli effetti del previsto cambiamento climatico e di alcune strategie progettuali. In seguito, quando sono considerati i sistemi tecnologici di climatizzazione, si ricavano i consumi energetici, dipendenti dai rendimenti degli impianti installati. Infine, in alcuni casi, viene esplicitata la quantità di energia primaria necessaria a produrre i diversi vettori di fornitura.

---

[6] Pierangioli, L., 2017. *Effetti Dei Cambiamenti Climatici Sulle Prestazioni Energetiche Degli Edifici Residenziali in Clima Mediterraneo. Il Caso Del Patrimonio Residenziale Pubblico INA-Casa e Gescal Della Toscana*. Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Firenze, p. 10.

[7] Li et al., *op. cit.*, p. 105.

Approccio al cambiamento climatico

Nelle ricerche selezionate, è fondamentale valutare l'approccio al cambiamento climatico, inteso da un lato come l'insieme di ipotesi, dati e processi legati all'evoluzione futura del clima, dall'altro come rassegna delle soluzioni progettuali di intervento sull'edificio in risposta a tale fenomeno; come da Figura 4.1, possiamo considerare i due punti di vista quali l'impatto diretto e indiretto del cambiamento climatico.
In questa fase si analizza il primo ambito, con gli studi che vengono discussi e confrontati in base alle condizioni climatiche attuali del contesto considerato e in funzione dei metodi di previsione di quelle future, in cui diventano centrali l'orizzonte temporale delle analisi, gli scenari di emissioni e i modelli atmosferici di simulazione.

Dal punto di vista climatico, i casi studio trattati nei riferimenti si distribuiscono in quasi tutte le zone in cui può essere suddiviso il mondo, almeno secondo due classificazioni fondamentali: quella tradizionale di Köppen-Geiger[8], basata sui valori medi stagionali di temperatura e precipitazioni, e quella della ASHRAE[9] (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), che considera in primo luogo i gradi giorno del sito. Si tratta di un parametro più direttamente improntato alla valutazione energetica degli edifici, definito come «somma, estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura dell'ambiente […] e la temperatura media esterna giornaliera»[10],

[8] Elaborata dal geografo e climatologo W. Köppen nel 1918 e pubblicata in forma cartografica definitiva nel 1961 con la collaborazione del collega R. Geiger; oggetto di revisioni e aggiornamenti continui, è la classificazione più usata a livello internazionale.
[9] Elaborata negli Stati Uniti dal IECC (International Energy Conservation Code) e dal DOE (Department of Energy) nei primi anni 2000 e adottata dalla ASHRAE nel 2004.
[10] Decreto del Presidente della Repubblica 26/08/1993 n. 412. *Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia*.

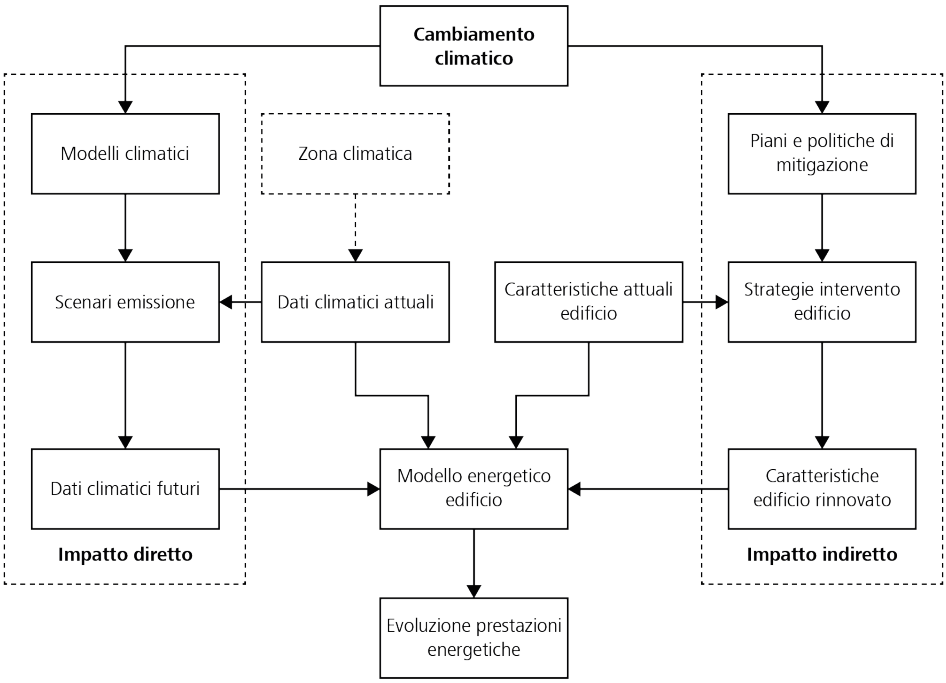


Figura 4.1
Schema generale della metodologia e dei passaggi fondamentali applicati nelle ricerche considerate.
Fonte: Andrić, Le Corre et al., 2019, *op. cit.*, p. 6.

calcolata secondo la formula (4.1):

$$\mathrm{GG} = \sum_{j=ngr} \left(t_{i,j} - t_{e,j}\right) \tag{4.1}$$

Nelle figure che seguono (Figura 4.2-4.3) sono riportate le rappresentazioni cartografiche delle due zonizzazioni, mentre la Tabella 4.1 riporta i valori e le condizioni di riferimento per il sistema ASHRAE. La temperatura dell'ambiente interno, alla base della (4.1), è fissata convenzionalmente per ogni Paese: per gli Stati Uniti è pari 18,3°C (65°F), mentre per l'Italia è di 20°C. Il calcolo dei gradi giorno è infatti impiegato anche nella classificazione italiana[11], di cui la Figura 4.4 e la Tabella 4.2 mostrano la rappresentazione cartografica e i valori di riferimento.

I casi studio ricoprono un totale di 48 località, illustrate in Tabella 4.3 e nelle figure seguenti. Sono prevalentemente situate in Europa, sia per una selezione funzionale all'applicazione svolta nella presente tesi (v. cap. 5), sia per alcune ricerche che confrontano simultaneamente molti luoghi in quest'area (Andrić et al., 2017[12]; Cellura et al., 2018[13]).

Tale prevalenza si riflette analogamente nel tipo di clima analizzato, con una netta maggioranza delle zone temperate Csa (comunemente detta mediterranea), Cfa e Cfb (temperate umide) per il sistema Köppen-Geiger, e di quelle 3A e 4A secondo la ASHRAE (Figura 4.5). A livello generale e qualitativo possiamo anticipare che, come principale effetto del cambiamento climatico, tali aree subiranno uno spostamento evidente dei fabbisogni energetici dal riscaldamento al raffrescamento[14], che nel breve termine produrrà un certo

[11] *Ivi*.

[12] Andrić, I., Pina, A., Ferrão, P., Fournier, J., Lacarrière, B., Le Corre, O., 2017. The Impact of Climate Change on Building Heat Demand in Different Climate Types. In *Energy and Buildings*, 149, pp. 225–34.

[13] Cellura, M., Guarino, F., Longo, S., Tumminia, G., 2018. Climate Change and the Building Sector: Modelling and Energy Implications to an Office Building in Southern Europe. In *Energy for Sustainable Development*, 45, 2018, pp. 46–65.

[14] de Wilde, P., Coley, D. The Implications of a Changing Climate for Buildings, op. cit.

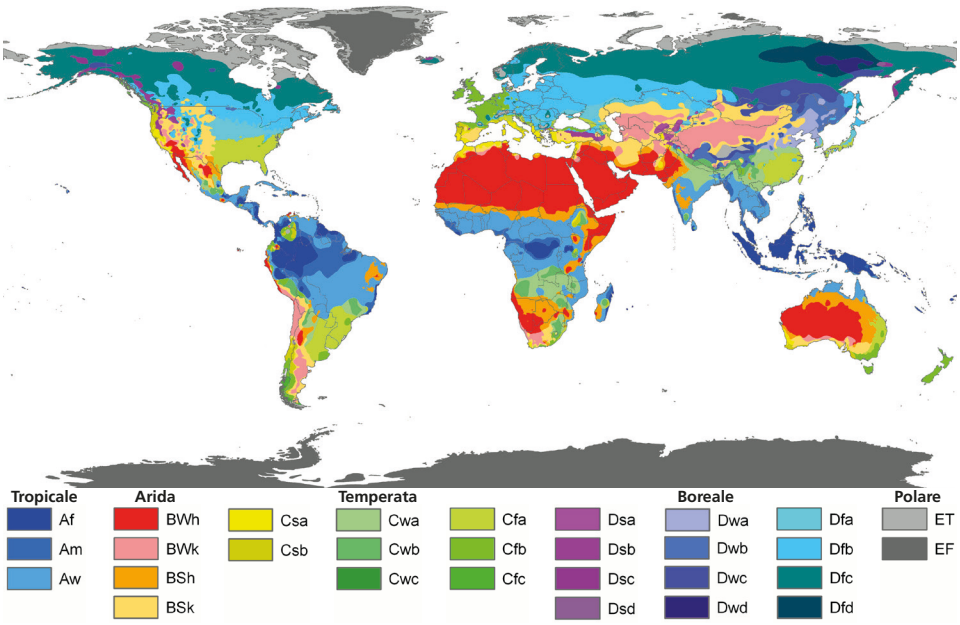


Figura 4.2

Classificazione climatica secondo Köppen-Geiger.
Fonte: Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. In *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, pp. 1633-1644.

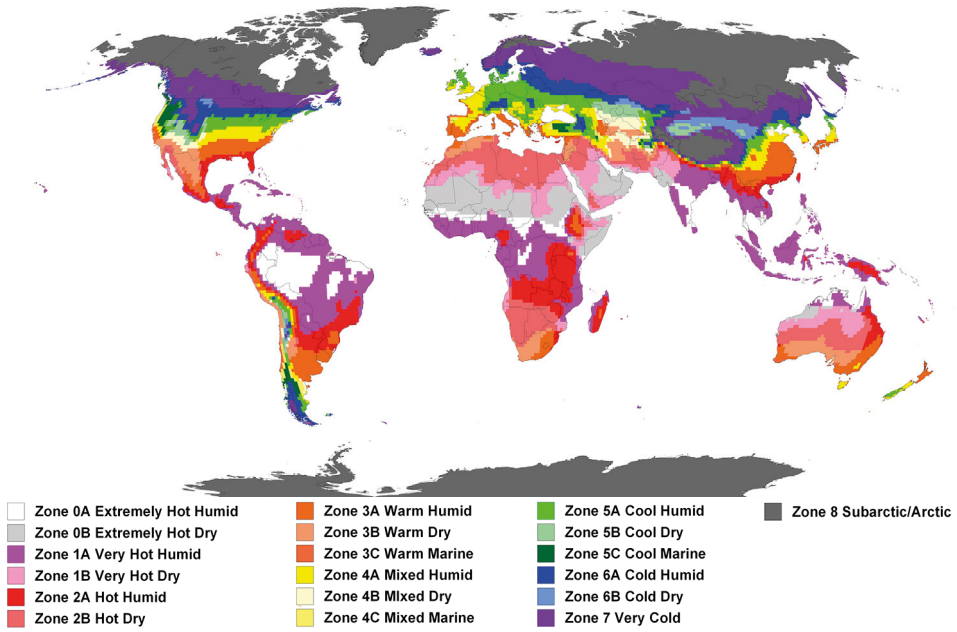
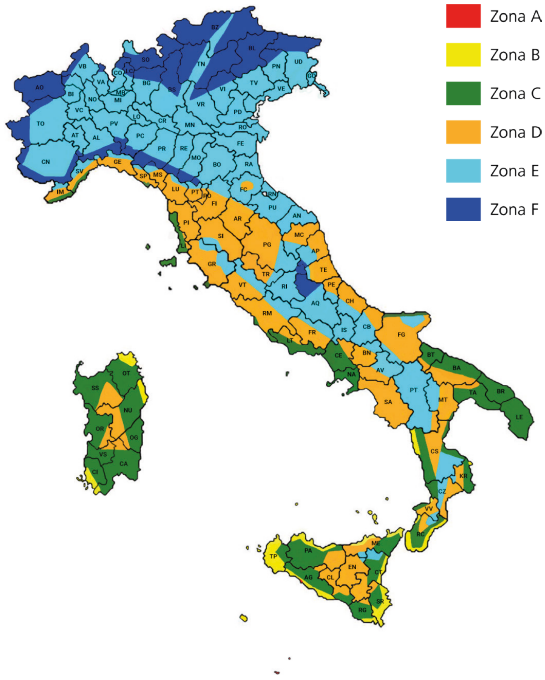


Figura 4.3

Classificazione climatica secondo la ASHRAE.
Fonte: ANSI/ASHRAE Standard 169-2013. *Climatic Data for Building Design Standards*.

Zona	Gradi giorno	Condizioni
0	CDD10°C > 6000	Clima *Marino* (C): 1. Temperatura media mese più freddo tra -3°C e 18°C. 2. Temperatura media mese più caldo < 22°C. 3. Almeno 4 mesi con temperatura media > 10°C. 4. Stagione secca in estate. Il mese più piovoso nella stagione fredda ha un valore di precipitazioni medie almeno triplo di quello del mese meno piovoso dell'anno. La stagione fredda è da ottobre a marzo nell'emisfero boreale e da aprile a settembre nell'emisfero australe. Clima *Secco* (B): non *Marino* (C) e: P < 2.0 × (T + 7) dove: P = precipitazioni annuali (cm) T = temperatura media annua (°C). Clima *Umido* (A): località che non hanno clima *Marino* (C) o *Secco* (B).
1	5000 < CDD10°C ≤ 6000	
2	3500 < CDD10°C ≤ 5000	
3A, 3B	2500 < CDD10°C ≤ 3500 HDD18°C ≤ 2000	
3C	CDD10°C ≤ 2500 HDD18°C ≤ 2000	
4A, 4B	1500 < CDD10°C ≤ 3500 HDD18°C ≤ 3000	
4C	CDD10°C ≤ 1500 2000 < HDD18°C ≤ 3000	
5A, 5B	1000 < CDD10°C ≤ 3500 3000 < HDD18°C ≤ 4000	
5C	CDD10°C ≤ 1000 3000 < HDD18°C ≤ 4000	
6A, 6B	4000 < HDD18°C ≤ 5000	
7	5000 < HDD18°C ≤ 7000	
8	HDD18°C > 7000	

Tabella 4.1
Valori e condizioni di riferimento per la classificazione climatica della ASHRAE.



Zona	Gradi giorno
A	HDD20°C ≤ 600
B	601 ≤ HDD20°C ≤ 900
C	901 ≤ HDD20°C ≤ 1400
D	1401 ≤ HDD20°C ≤ 2100
E	2101 ≤ HDD20°C ≤ 3000
F	HDD20°C ≥ 3001

Figura 4.4 - Tabella 4.2
Classificazione climatica dell'Italia, con rispettivi valori di riferimento.
Fonte: sito web *Luce e Gas Italia*: http://www.luceegasitalia.it/2020/01/22/le-zone-climatiche-italiane-e-i-periodi-di-accensione-degli-impianti-di-riscaldamento/.

Località	Zona (Köppen)	Zona (ASHRAE)	HDD (18°C)	CDD (10°C)
Amburgo (DE)	Temperata Cfb	5C	3514	842
Barcellona (ES)	Temperata Csa	3A	1389	2693
Madrid (ES)	Temperata Csa	3A	1971	2603
Valencia (ES)	Temperata Csa	3A	1088	2827
Vantaa (FI)	Boreale Dfb	6A	4856	637
Marsiglia (FR)	Temperata Csa	3A	1616	2565
Montpellier (FR)	Temperata Csa	3A	1649	2522
Nizza (FR)	Temperata Csa	3A	1383	2554
Parigi (FR)	Temperata Cfb	4A	2649	1521
Atene (GR)	Temperata Csa	3A	1165	3076
Salonicco (GR)	Arida Bsk	3B	1835	2547
Firenze (IT)	Temperata Csa	3A	1684	2558
Genova (IT)	Temperata Csa	3A	1411	2538
Messina (IT)	Temperata Csa	3A	792	3341
Napoli (IT)	Temperata Csa	3A	1218	2800
Palermo (IT)	Temperata Csa	3A	801	3258
Pisa (IT)	Temperata Csa	3A	1783	2559
Roma (IT)	Temperata Csa	3A	1564	2595
San Vincenzo, LI (IT)	Temperata Csa	3A	1536	2588
Milano (IT)	Temperata Cfa	4A	2265	2077
Torino (IT)	Temperata Cfa	4A	2533	1727
Venezia (IT)	Temperata Cfa	4A	2267	1932
Kaunas (LT)	Boreale Dfb	6A	4208	839
De Bilt (NL)	Temperata Cfb	5A	3078	1043
Lisbona (PT)	Temperata Csa	3C	1012	2464
Stoccolma (SE)	Boreale Dfb	6A	4286	725
Smirne (TR)	Temperata Csa	3A	1408	2877

Località	Zona (Köppen)	Zona (ASHRAE)	HDD (18°C)	CDD (10°C)
Montréal (CA)	Boreale Dfb	6A	4849	1064
Yellowknife (CA)	Boreale Dsb	8	8306	482
Resolute (CA)	Polare ET	8	12471	1
Miami, FL (US)	Tropicale Aw	1A	72	5447
Phoenix, AZ (US)	Arida BWh	2B	523	5067
Philadelphia, PA (US)	Temperata Cfa	4A	2679	2034
Baltimora, MD (US)	Temperata Cfa	4A	2537	2145
Chicago, IL (US)	Boreale Dfa	5A	3294	1864
Boston, MA (US)	Boreale Dfa	5A	3123	1632
Massena, NY (US)	Boreale Dfb	6A	4447	1235
Belém (BR)	Tropicale Af	0A	0	6379
Florianópolis (BR)	Temperata Cfa	2A	219	4143
Curitiba (BR)	Temperata Cfb	3A	640	3027
Naha (JP)	Tropicale Af	2A	162	4801
Tokyo (JP)	Temperata Cfa	3A	1611	2671
Sapporo (JP)	Boreale Dfa	5A	3673	1362
Darwin (AU)	Tropicale Aw	1B	0	5988
Alice Springs (AU)	Arida BSh	2B	665	4124
Sydney (AU)	Temperata Cfa	3A	718	2936
Melbourne (AU)	Temperata Cfb	3C	1309	2076
Hobart (AU)	Temperata Cfb	4A	2121	1527

Aree località			
Europa	27	Asia	3
Nord America	10	Oceania	5
Sud America	3		

Tabella 4.3

Località analizzate nei riferimenti.

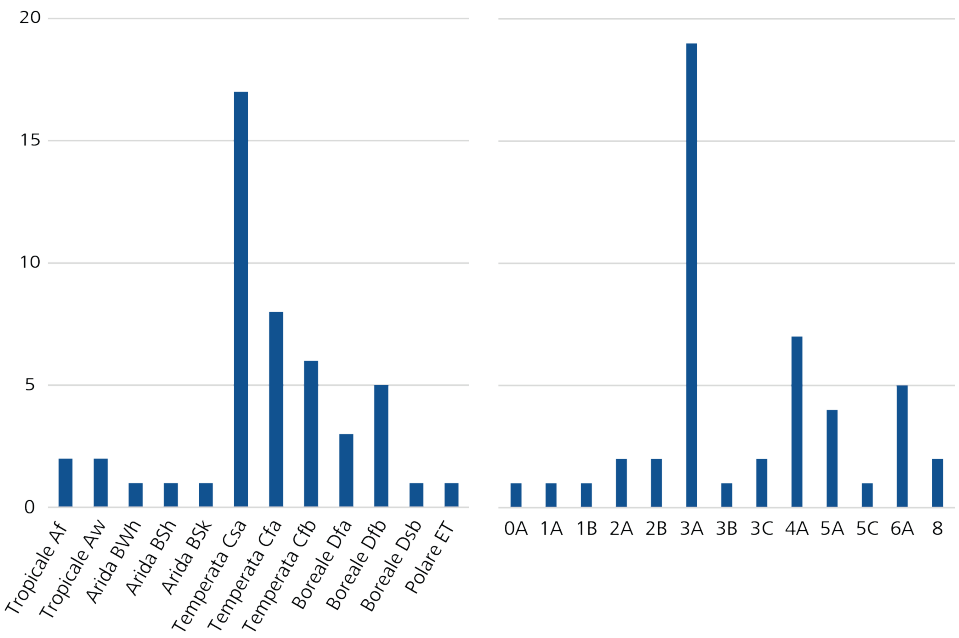


Figura 4.5

Distribuzione per zona climatica delle località analizzate nei riferimenti; a sinistra classificazione di Köppen-Geiger, a destra classificazione ASHRAE.

Figure 4.6-4.7
Localizzazione geografica dei casi studio analizzati nei riferimenti, nel mondo e in Europa.

beneficio in termini assoluti per la riduzione del primo, mentre nel lungo termine, la crescente necessità del secondo determinerà un aumento dei consumi.[15]

Come detto, un processo indispensabile per valutare l'impatto del cambiamento climatico è la generazione dei dati climatici futuri, e il diagramma in Figura 4.8 ne mostra le metodologie fondamentali impiegate nei riferimenti. La più diffusa in applicazione alle prestazioni energetiche degli edifici, non soltanto negli studi analizzati, è il cosiddetto *morphing* (Belcher et al., 2005)[16], descritto nel capitolo precedente. Questo è strettamente connesso alla principale tipologia di previsione dell'orizzonte temporale impiegata nei riferimenti, basata sui cosiddetti *horizon years* tipici[17], con valori medi estrapolati da un periodo più ampio di venti o trent'anni, in modo analogo all'anno tipo nel clima attuale. Nella presente tesi (Figura 4.9), tale previsione è definita come "puntuale", poiché fornisce direttamente i dati relativi a un orizzonte specifico, permettendo di confrontare in modo più rapido le proiezioni del cambiamento climatico rispetto al presente. Si intende invece "ibrida", una previsione ad intervalli più progressivi, ogni dieci (Andrić et al., 2017)[18] o vent'anni (Nik, Sasic Kalagasidis, 2013)[19], per valutare in modo graduale l'evoluzione delle prestazioni energetiche dell'edificio. Infine, la tipologia meno diffusa "continua" si riferisce a dati calcolati a cadenza ravvicinata anno per anno, quindi con indicazione molto più attendibile della possibile variabilità interannuale futura, ma al prezzo di un maggior carico computazionale. Robert e Kummert (2012)[20] applicano tale approccio nella

[15] Aijazi, A.N., Brager, G.S., 2018. Understanding Climate Change Impacts on Building Energy Use. In *ASHRAE Journal*, 60, 10, pp. 24–32.
[16] Belcher, S.E., Hacker, J.N., Powell, D.S. Constructing Design Weather Data for Future Climates, op. cit.
[17] Robert, A., Kummert, M. Designing Net-Zero Energy Buildings for the Future Climate, Not for the Past, op. cit.
[18] Andrić et al., 2017, *op. cit.*
[19] Nik, V.M., Sasic Kalagasidis, A., 2013. Impact Study of the Climate Change on the Energy Performance of the Building Stock in Stockholm Considering Four Climate Uncertainties. In *Building and Environment*, 60, pp. 291–304.
[20] Robert, Kummert, *op. cit.*

valutazione di edifici NZEB, affermando che «net-zero energy buildings include various forms of long-term storage, which would require multi-year design simulations» e che «individual month/year morphing will generate more extreme values, and it seemed interesting to look at the performance of net-zero energy buildings through these more extreme years».[21]

Tra gli altri metodi di generazione dei dati climatici si cita nuovamente il *downscaling* dinamico (Nik, Sasic Kalagasidis, 2013)[22], che, per la maggiore laboriosità richiesta, viene talvolta sostituito dalla stima diretta dei valori, quando già disponibile un modello regionale sufficientemente dettagliato (Shibuya, Croxford, 2016)[23]. Un caso singolare è rappresentato dallo studio di van Hooff et al. (2016)[24], che utilizzano i dati reali del 2006, eccezionalmente superiori alla media tipica e con frequenti ondate di calore registrate, come rappresentativi delle condizioni future, per la loro analogia con le proiezioni del cambiamento climatico per i Paesi Bassi.

Per quanto riguarda la scelta dei modelli atmosferici di simulazione (Figura 4.10), essa dipende molto spesso dal software impiegato per il morphing: ad esempio CCWorldWeatherGen utilizza il modello globale HadCM3, sviluppato dal servizio meteorologico britannico Met Office e usato, tra gli altri, come supporto nei report prodotti dall'IPCC; WeatherShift® confronta invece 14 GCM e seleziona i dati secondo il *warming percentile* (WP), come descritto al precedente capitolo 3; altri studi si basano su RCM già sviluppati per le aree delle località considerate.

[21] «[…] gli edifici a energia netta zero utilizzano varie forme di accumulo a lungo termine, che richiederebbero simulazioni di progetto pluriennali […] il morphing per singoli mesi/anni produrrà valori più estremi, e sembrava interessante osservare le prestazioni di edifici NZEB in tali anni più estremi.»; *ivi*, p. 153.

[22] Nik, Sasic Kalagasidis, *op. cit.*

[23] Shibuya, T., Croxford, B., 2016. The Effect of Climate Change on Office Building Energy Consumption in Japan. In *Energy and Buildings*, 117, pp. 1–11.

[24] van Hooff, T., Blocken, B., Timmermans, H.J.P., Hensen, J.L.M., 2016. Analysis of the Predicted Effect of Passive Climate Adaptation Measures on Energy Demand for Cooling and Heating in a Residential Building. In *Energy*, 94, pp. 811–20.

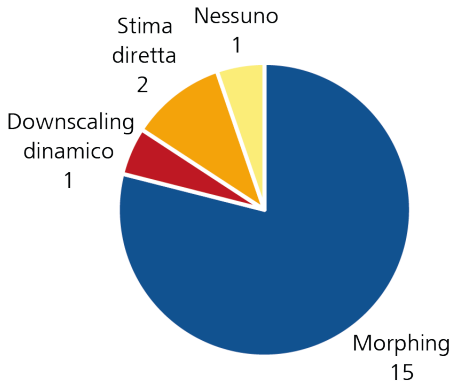


Figura 4.8
Metodi di generazione dei dati climatici futuri impiegati nei riferimenti.

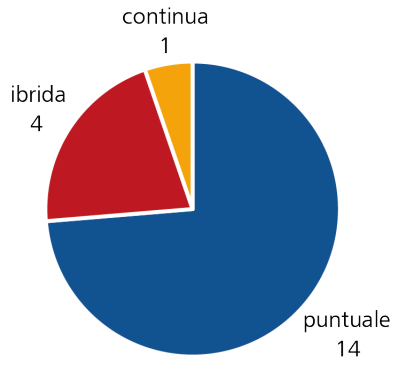


Figura 4.9
Tipologie di previsione dell'orizzonte temporale impiegate nei riferimenti.

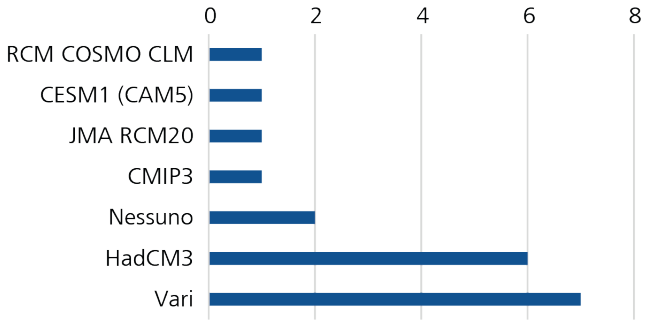


Figura 4.10
Modelli climatici a cui sono applicati i metodi di generazione impiegati nei riferimenti.

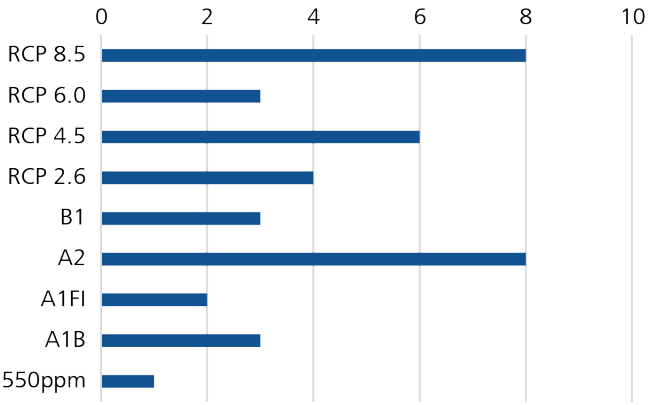


Figura 4.11
Scenari di emissione considerati nei riferimenti per generare i dati climatici futuri.

Gli scenari di emissioni (Figura 4.11) sono la linea guida fondamentale per le previsioni del clima futuro, in quanto forniscono indicazioni sulla portata dei cambiamenti climatici a seconda della direzione presa dallo sviluppo delle attività umane sul pianeta. Come visto nel capitolo 3, si distinguono due gruppi, quelli elaborati nel 2000 nell'ambito dello SRES (*Special Report on Emissions Scenarios*) dell'IPCC, e i RCP (*Representative Concentration Pathways*) che li hanno sostituiti nel 2014 con il Quinto Rapporto di Valutazione dell'IPCC (AR5). Anche in questo caso, i più impiegati nei riferimenti derivano dai software di generazione climatica, e sono l'A2 (SRES), utilizzato da CCWorldWeatherGen, effetto di un modello di sviluppo frammentato e più emissivo, e i RCP 8.5 e 4.5, adottati da WeatherShift®, con emissioni *business as usual* da un lato e moderatamente mitigate dall'altro.
Molto spesso la scelta di scenari climatici ed emissivi estremi avviene per forzare i risultati dello studio con condizioni peggiorative, al fine di evidenziare eventuali criticità delle azioni di riqualificazione energetica ed impiantistica proposte.[25]

[25] Pierangioli, *op. cit.*, p. 70.

Metodi e strumenti di valutazione

L'elemento focale degli studi in oggetto è la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici sotto l'effetto del previsto cambiamento climatico e in queste pagine se ne intendono presentare i metodi e gli strumenti impiegati.
Il grafico in Figura 4.12 mostra le tecniche di calcolo riscontrate nei riferimenti e conferma l'assoluta prevalenza della simulazione energetica dinamica, come anticipato.
Sviluppata in ambito accademico intorno agli anni '80, da strumento di nicchia per la ricerca, si è largamente diffusa nella progettazione, nella verifica dei requisiti di legge e nella certificazione di alcuni standard di efficienza. Permette di gestire la grande mole di variabili e parametri coinvolti nel sistema edificio-impianti-clima-utenza e ne misura le complesse relazioni su base oraria, velocizzando il tempo di computazione e fornendo un'indicazione quanto più realistica della performance dell'edificio.
La generazione dei dati climatici futuri vista al paragrafo precedente produce un database orario dell'anno tipo simulato, analogo a quello attuale di riferimento, che rappresenta le condizioni al contorno per il calcolo dinamico e il file di input per il software impiegato. Le altre variabili riguardano l'involucro edilizio, il comfort dell'ambiente interno, gli impianti termici e di eventuale produzione di energia da fonti rinnovabili, e i profili di occupazione da parte dell'utenza. Negli studi considerati vengono spesso confrontate diverse alternative progettuali, proprio grazie alla simulazione dinamica che consente la reiterazione dei calcoli e la variazione delle suddette condizioni al contorno, con tempi e impegni computazionali ragionevoli.

Nei grafici alle Figure 4.13-4.14 vediamo i software di previsione climatica e di simulazione energetica dinamica usati nei riferimenti; la comunicazione tra le due tipologie di strumenti è consentita da formati condivisi per i dati climatici, tra i quali l'EPW (EnergyPlus Weather), base del più diffuso codice di calcolo

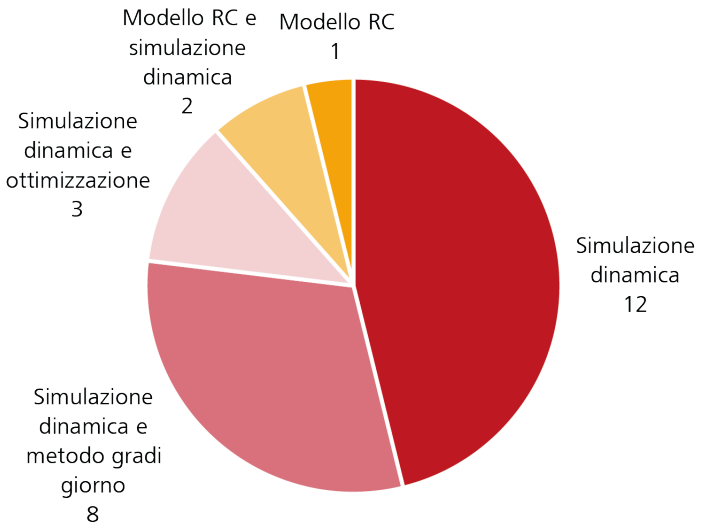


Figura 4.12
Metodi di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici impiegati nei riferimenti.

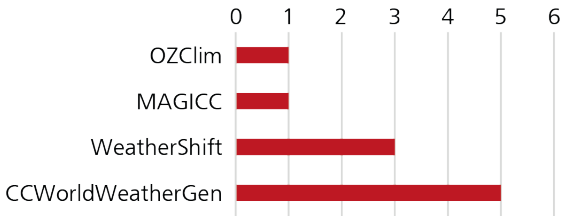


Figura 4.13
Strumenti di generazione dei dati climatici futuri impiegati nei riferimenti.

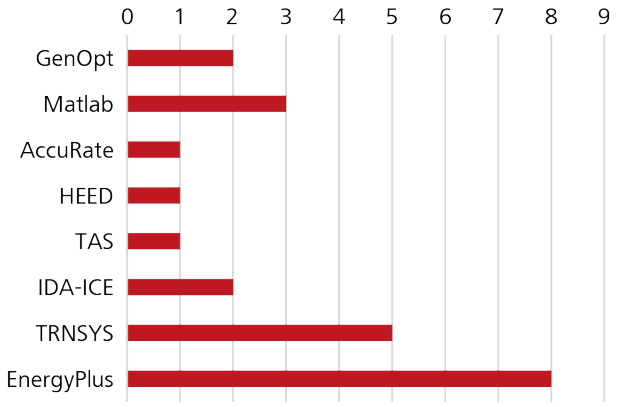


Figura 4.14
Strumenti di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici impiegati nei riferimenti.

EnergyPlus®[27]. Elementi chiave di tale prevalenza sono la sua natura open-source, a discapito di altri software molto costosi, e la grande disponibilità di dati climatici per numerose località in tutto il mondo nel suo database online.[28]

Precedente al calcolo energetico, un passaggio ricorrente nei riferimenti è il confronto tra i valori climatici attuali e quelli previsti in futuro, quali le temperature medie annue e mensili, l'umidità relativa o la radiazione solare.
Invidiata e Ghisi (2016)[29], ad esempio, valutano le tendenze della temperatura media mensile per alcune località in Brasile al variare dell'orizzonte temporale, come visibile in Figura 4.15: i profili conservano l'andamento attuale per effetto del morphing; a Curitiba, i valori mantengono la stagionalità della zona temperata australe, mentre a Belém, quella meno variabile della zona equatoriale.
Alcune ricerche affiancano altri metodi alla simulazione dinamica, estendendo il confronto climatico al parametro già citato dei gradi giorno, più pratico per la valutazione energetica rispetto alle grandezze precedenti. Si distingue in due formulazioni per i periodi di riscaldamento e raffrescamento: la (4.1) si riferisce al primo caso, dove la temperatura media esterna è inferiore a quella convenzionale interna, e fornisce appunto gli *Heating Degree Days* (HDD); nel secondo caso, si calcolano i *Cooling Degree Days* (CDD), con le differenze di temperatura inverse, e la formula diventa:

$$\mathrm{CDD} = \sum_{j=ngr} \left(t_{e,j} - t_{i,j}\right) \tag{4.2}$$

dove la temperatura interna di set point è sempre definita a seconda del Paese o dell'applicazione considerata.

[27] EnergyPlus®, accessibile online al sito https://energyplus.net/.
[28] Andrić, Le Corre et al., 2019, *op. cit.*
[29] Invidiata, A., Ghisi, E., 2016. Impact of Climate Change on Heating and Cooling Energy Demand in Houses in Brazil. In *Energy and Buildings*, 130, 2016, pp. 20–32.

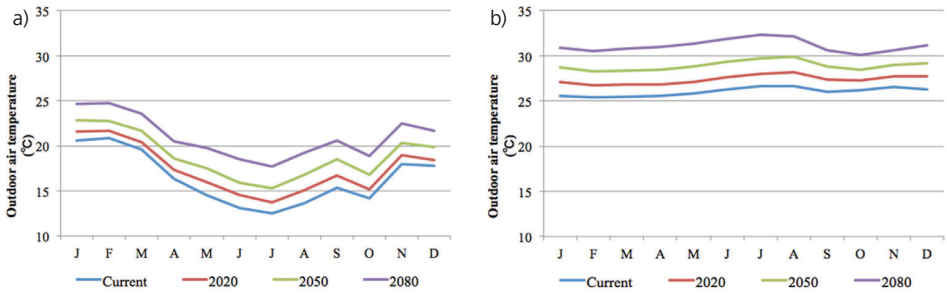


Figura 4.15

Confronto dei valori di temperatura media mensile in divesi orrizzonti temporali; due località in Brasile: a) Curitiba e b) Belém. Fonte: Invidiata, Ghisi, *op. cit.*, p. 25.

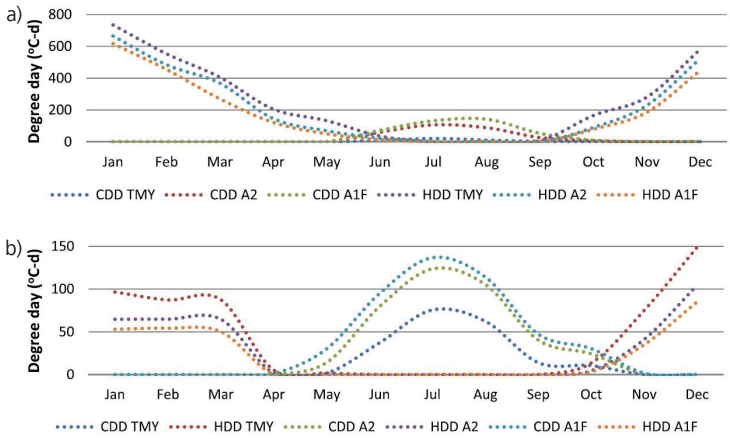


Figura 4.16

Confronto dei gradi giorno per riscaldamento (HDD) e raffrescamento (CDD) su base mensile in diversi scenari futuri; due località negli Stati Uniti: a) Chicago, IL e b) Phoenix, AZ. Fonte: Shen, *op. cit.*, p. 65.

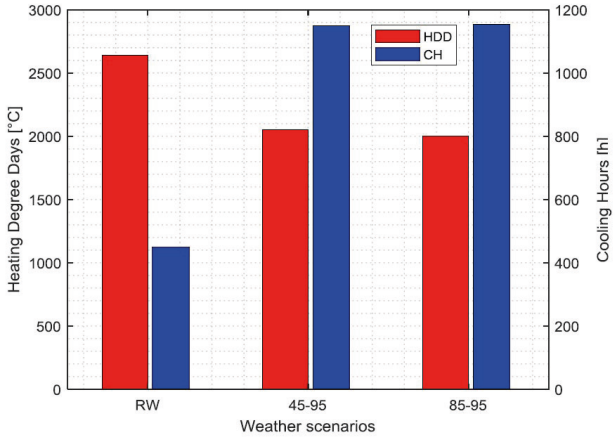


Figura 4.17

Variazione dei gradi giorno per riscaldamento (HDD) e delle ore di raffrescamento (CH) in diversi scenari futuri; città di Milano. Fonte: Bilardo et al., *op. cit.*, p. 4.

Shen (2017) [30] confronta gli HDD a 18°C e i CDD a 26°C dell'anno tipo attuale e dell'*horizon year* futuro per diverse località negli Stati Uniti al variare degli scenari di emissioni (Figura 4.16), anticipando i risultati della simulazione energetica: a Chicago, in zona boreale, gli HDD in inverno diminuiscono, ma mantengono ancora valori elevati, mentre l'aumento dei CDD è netto rispetto ai valori quasi nulli attuali; a Phoenix, il clima desertico provoca un netto calo degli HDD, sebbene già molto bassi, e un aumento consistente dei CDD, già elevati. Bilardo et al. (2019)[31] considerano gli HDD a 18°C e i gradi ora di raffrescamento CH (*Cooling Hours*) a 26°C, calcolati in modo analogo ai CDD, ma attraverso le differenze orarie cumulate. In Figura 4.17 vediamo la netta diminuzione degli HDD e l'imponente aumento di CH rispetto al clima di riferimento, ma con lievi differenze nei due scenari futuri.

La simulazione dinamica offre ulteriori potenzialità nell'analisi energetica, come i processi di ottimizzazione, volti a minimizzare il rapporto costo/prestazione o a massimizzare la produzione di energia da fonti rinnovabili; in tal senso, alcuni studi li utilizzano per confrontare diverse soluzioni progettuali e analizzane la resilienza al cambiamento climatico.
Pierangioli (2017)[32] indaga la robustezza di diverse strategie di retrofit in residenze di edilizia pubblica in Toscana, calcolandone dapprima gli indici di prestazione nei vari scenari climatici attraverso la simulazione dinamica, per poi ricercare quelle ottimali in funzione del minimo costo globale secondo la procedura prescritta dal Regolamento delegato UE n.244/2012[33] e dalla relativa applicazione redatta dal Ministero dello Sviluppo Economico.[34]

[30] Shen, P., 2017. Impacts of Climate Change on U.S. Building Energy Use by Using Downscaled Hourly Future Weather Data. In *Energy and Buildings*, 134, pp. 61–70.
[31] Bilardo, M., et al., Resilient Optimal Design of Multi-Family Buildings (…), op. cit.
[32] Pierangioli, *op. cit.*
[33] Commissione Europea, 2012. *Orientamenti che accompagnano il regolamento delegato (UE) n. 244/2012 del 16 gennaio 2012 della Commissione che integra la direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia*.
[34] Ministero dello Sviluppo Economico, 2013. *Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica (Direttiva 2010/31/UE art. 5)*.

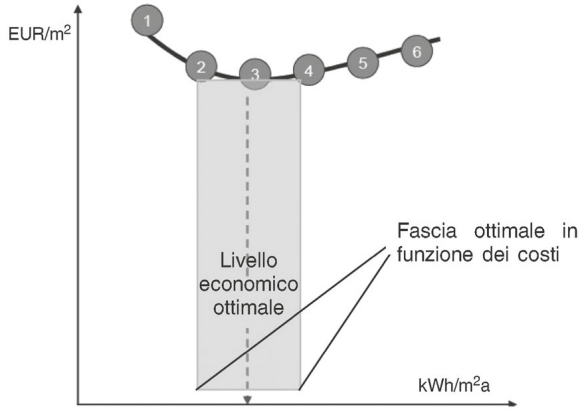


Figura 4.18
Grafico costo/prestazione per identificare il livello economico ottimale delle misure di efficienza energetica.
Fonte: Commissione Europea, *op. cit.*, p. 25.

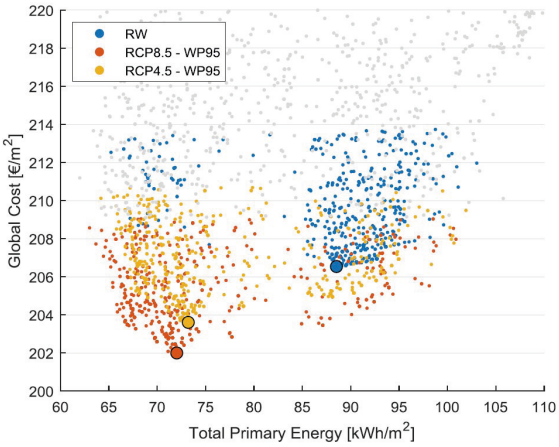


Figura 4.19
Nuvole di punti nell'intorno dei valori ottimali delle misure di efficienza energetica simulate.
Fonte: Bilardo et al., *op. cit.*, p. 5.

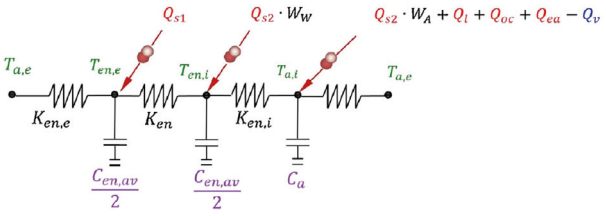


Figura 4.20
Schema modello RC basato su equivalenza termo-elettrica.
Fonte: Andrić et al., 2016, *op. cit.*, p. 81.

La Figura 4.18 mostra un grafico tipo di tale approccio, in cui si individuano i valori economici ottimali o comunque accettabili, in una fascia nell'intorno del minimo valore del costo globale; le soluzioni in tale intervallo saranno quindi le più resilienti al cambiamento climatico.
L'articolo già citato di Bilardo et al. (2019)[35] si colloca nell'ambito del gruppo di ricerca del Dipartimento Energia (DENERG) del Politecnico di Torino, che ha sviluppato la metodologia EDeSSOpt[36] (Energy Demand and Supply Simultaneous Optimization); l'aspetto originale è l'ottimizzazione in contemporanea dei fabbisogni energetici, nelle misure passive dell'involucro edilizio, e della fornitura attraverso gli impianti tecnologici, in un approccio integrato fondamentale nel progetto, per selezionare *a priori* le misure di efficientamento più resilienti, piuttosto che per valutarle *a posteriori*. Attraverso la reiterazione di modifiche random alle variabili di input in GenOpt®[37] e simulazioni dinamiche in TRNSYS®[38], si valutano numerosi scenari di intervento e si individuano quelli più ricorrenti nell'intorno dei valori ottimali, con grafici a nuvole di punti del tipo in Figura 4.19.

Infine, in alcuni casi si utilizza il metodo orario semplificato per valutare le prestazioni energetiche dell'edificio, sviluppando cosiddetti modelli resistivo-capacitivi RC, basati sull'analogia tra variabili termodinamiche ed elettriche. Andrić et al. (2016)[39] impiegano un modello a quattro resistenze e tre capacità, schematizzato in Figura 4.20, calcolando il bilancio termico ai vari nodi, in applicazione a uno studio dei fabbisogni per riscaldamento su larga scala in un quartiere di Lisbona.

[35] Bilardo et al., *op. cit.*
[36] Ferrara, M., Rolfo, A., Prunotto, F., Fabrizio, E., 2019. EDeSSOpt – Energy Demand and Supply Simultaneous Optimization for Cost-Optimized Design: Application to a Multi-Family Building. In *Applied Energy*, 236, December 2018, pp. 1231–48.
[37] GenOpt®, accessibile online al sito: https://simulationresearch.lbl.gov/GO/.
[38] TRNSYS®, accessibile online al sito: http://www.trnsys.com/.
[39] Andrić, I., Gomes, N., Pina, A., Ferrão, P., Fournier, J., Lacarrière, B., Le Corre, O., 2016. Modeling the Long-Term Effect of Climate Change on Building Heat Demand: Case Study on a District Level. In *Energy and Buildings*, 126, pp. 77–93.

Strategie di intervento e risultati

«[…] *the higher the energy performance, the higher is the resilience to the variation of weather conditions».*[43]

Richiamando il precedente schema in Figura 4.1, in queste pagine si intende valutare l'impatto indiretto del cambiamento climatico sulle prestazioni energetiche degli edifici, e quindi analizzare i risultati derivanti dalle caratteristiche costruttive e tecnologiche dei casi studio nei riferimenti, molto spesso attraverso il confronto tra lo stato attuale e gli scenari di intervento in futuro. La citazione iniziale è concettualmente estendibile a tutte le ricerche selezionate ed esprime l'importanza di scegliere soluzioni efficienti e ottimizzate, nel caso specifico in termini di impianti termici, che, anche a fronte di investimenti leggermente superiori, garantiscono prestazioni elevate e più resilienti nel lungo termine.

Il grafico in Figura 4.21 mostra come il campione considerato ricopra diverse destinazioni d'uso, con la netta prevalenza del residenziale, sia poiché si tratta del settore più coinvolto dagli effetti del cambiamento climatico per la prevista variazione nelle proporzioni tra gli usi energetici, sia ancora per la scelta strumentale all'applicazione svolta al capitolo 5 della presente tesi. L'ormai noto spostamento dei fabbisogni dal riscaldamento al raffrescamento, soprattutto in zone temperate, richiederà profondi rinnovamenti e misure di efficientamento, che negli edifici residenziali avranno l'impatto maggiore in termini di modifiche tecnologiche e impiantistiche sul patrimonio esistente e di approccio progettuale per le nuove costruzioni. Si pensi alla grande percentuale di involucri edilizi ancora non isolati o alla necessità di installare

[43] «[…] maggiore è la prestazione energetica, maggiore è la resilienza alla variazione delle condizioni climatiche.»; Ferrara, M., Fabrizio, E., 2017. Cost Optimal NZEBs in Future Climate Scenarios. In *Energy Procedia*, 122, p. 877.

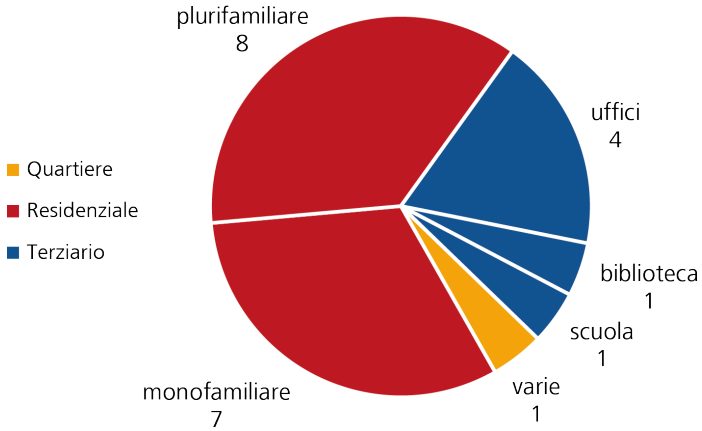


Figura 4.21
Destinazioni d'uso degli edifici analizzati nei riferimenti.

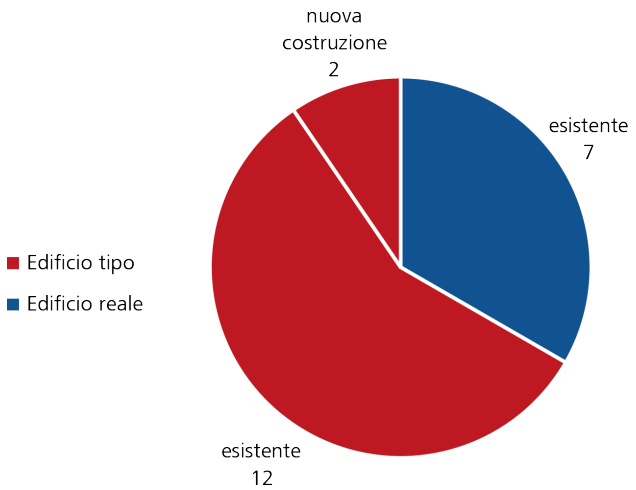


Figura 4.22
Categorie degli edifici analizzati nei riferimenti.

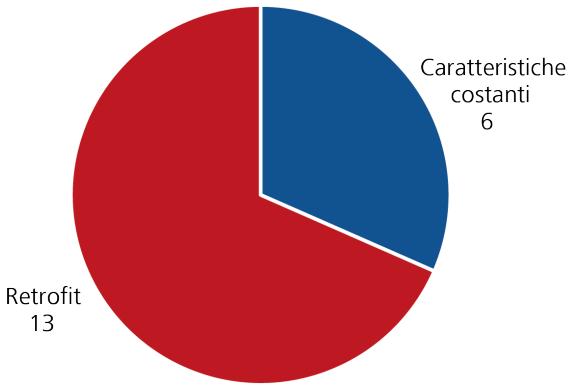


Figura 4.23
Categorie degli interventi sugli edifici analizzati nei riferimenti.

sistemi di raffrescamento meccanico in vista di una sempre meno efficace ventilazione naturale, o, in senso opposto, agli edifici con elevati livelli di coibentazione, soluzione già potenzialmente controproducente in estate.

La Figura 4.22 riporta la distinzione tra edifici reali, sempre preesistenti e con caratteristiche note, ed edifici tipo, non effettivamente costruiti, ma con le soluzioni più ricorrenti nel contesto considerato e intesi anch'essi come esistenti, salvo pochi casi analoghi a nuove realizzazioni.
Successivamente, il grafico in Figura 4.23 evidenzia una macro-divisione tra gli studi che mantengono fisse le condizioni del sistema edificio-impianti e valutano solo gli effetti del cambiamento climatico rispetto allo stato attuale, e quelli che prevedono strategie di retrofit o diverse alternative progettuali.

Nel seguito, i diagrammi alle Figure 4.24-26 sintetizzano i risultati dei calcoli energetici dei vari contributi in esame, cercando di rendere coerenti i diversi parametri prestazionali impiegati per un confronto quantomeno qualitativo e su base comune. Fatte salve le dovute precisazioni sulle differenti tipologie di edifici, destinazioni d'uso, caratteristiche costruttive e impiantistiche, condizioni al contorno climatiche e di orizzonte temporale, si è deciso di analizzare i fabbisogni per riscaldamento e raffrescamento in termini di variazione percentuale, non essendo sempre espliciti i valori assoluti nei diversi periodi; laddove disponibili o comunque ricavabili dai rendimenti degli impianti e dai fattori di conversione dell'energia primaria dei vari Paesi, hanno consentito la redazione del grafico conclusivo, relativo ai soli studi che analizzano entrambe le stagioni di condizionamento, in cui se ne sommano i contributi attuali e futuri.

Come detto, alcune ricerche adottano un approccio che non prevede modifiche alle condizioni di riferimento; ad esempio, Aijazi e Brager (2018)[44], valutano gli effetti del cambiamento climatico sui consumi di due edifici: un condominio residenziale e un complesso di uffici, modelli tipo con

[44] Aijazi, Brager, *op. cit.*

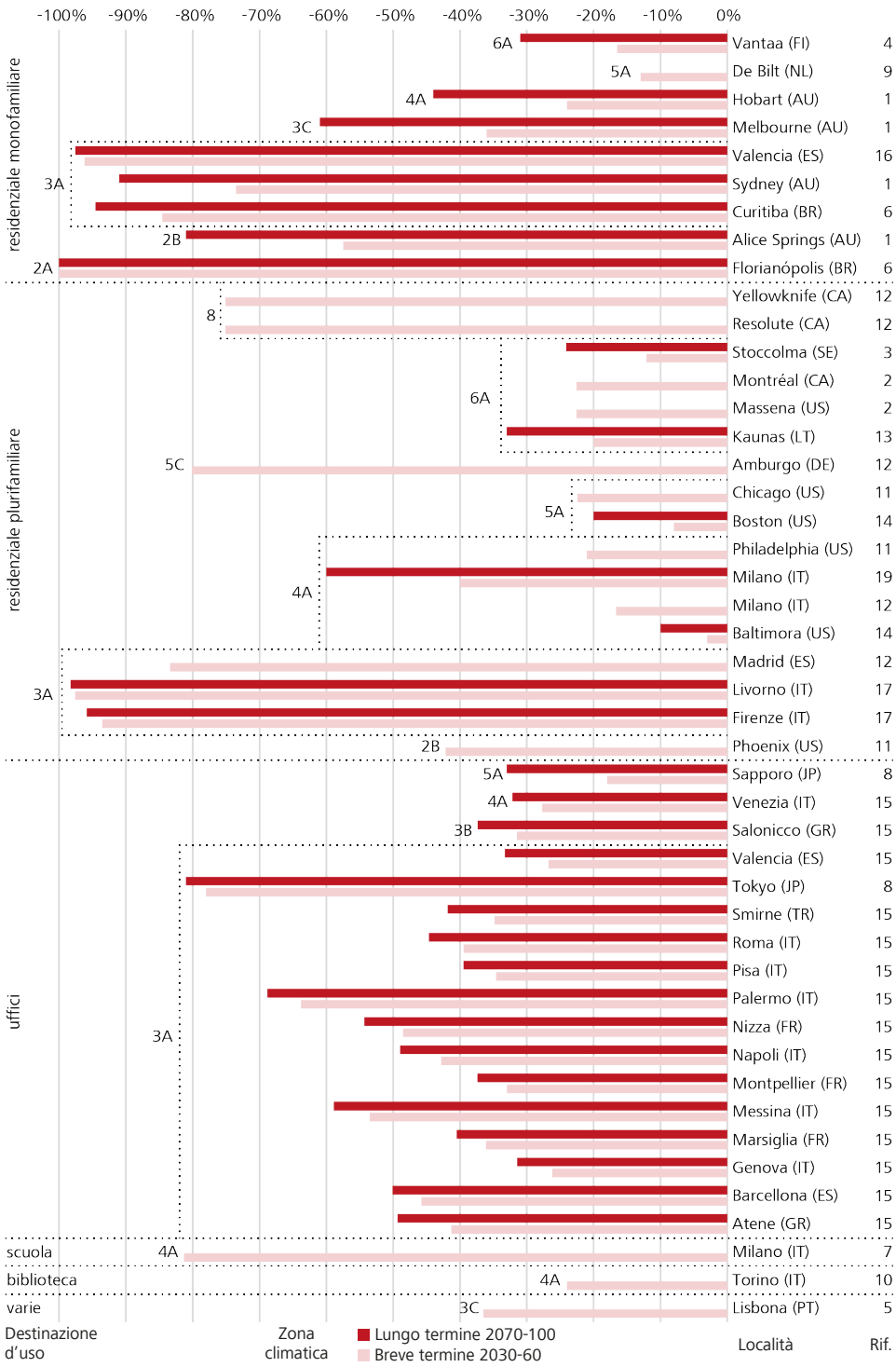


Figura 4.24

Variazione percentuale del fabbisogno per riscaldamento nei casi studio analizzati; i numeri dei riferimenti rimandano alla bibliografia a conclusione della Tabella 4.6.

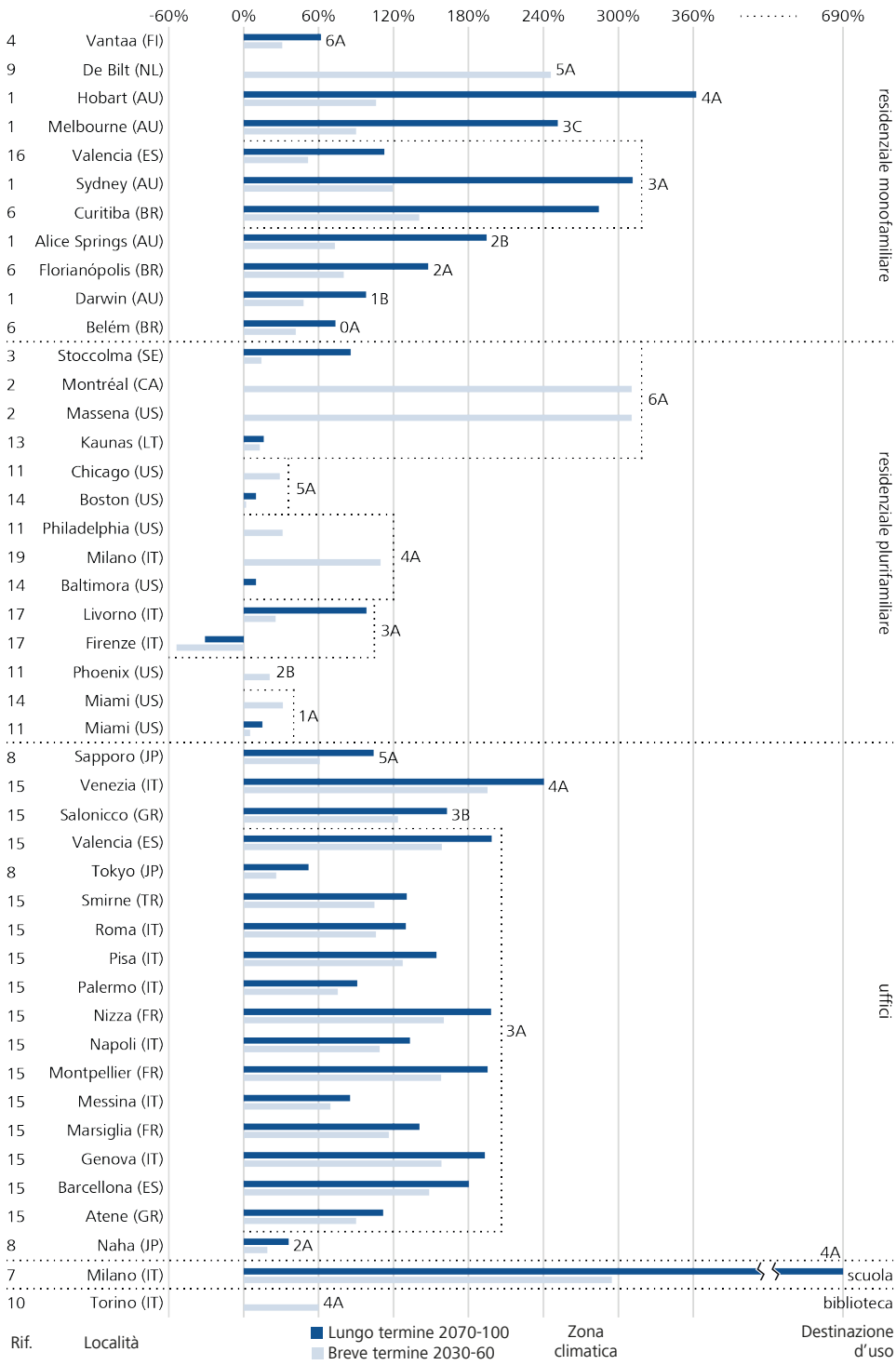


Figura 4.25

Variazione percentuale del fabbisogno per raffrescamento nei casi studio analizzati; i numeri dei riferimenti rimandano alla bibliografia a conclusione della Tabella 4.6.

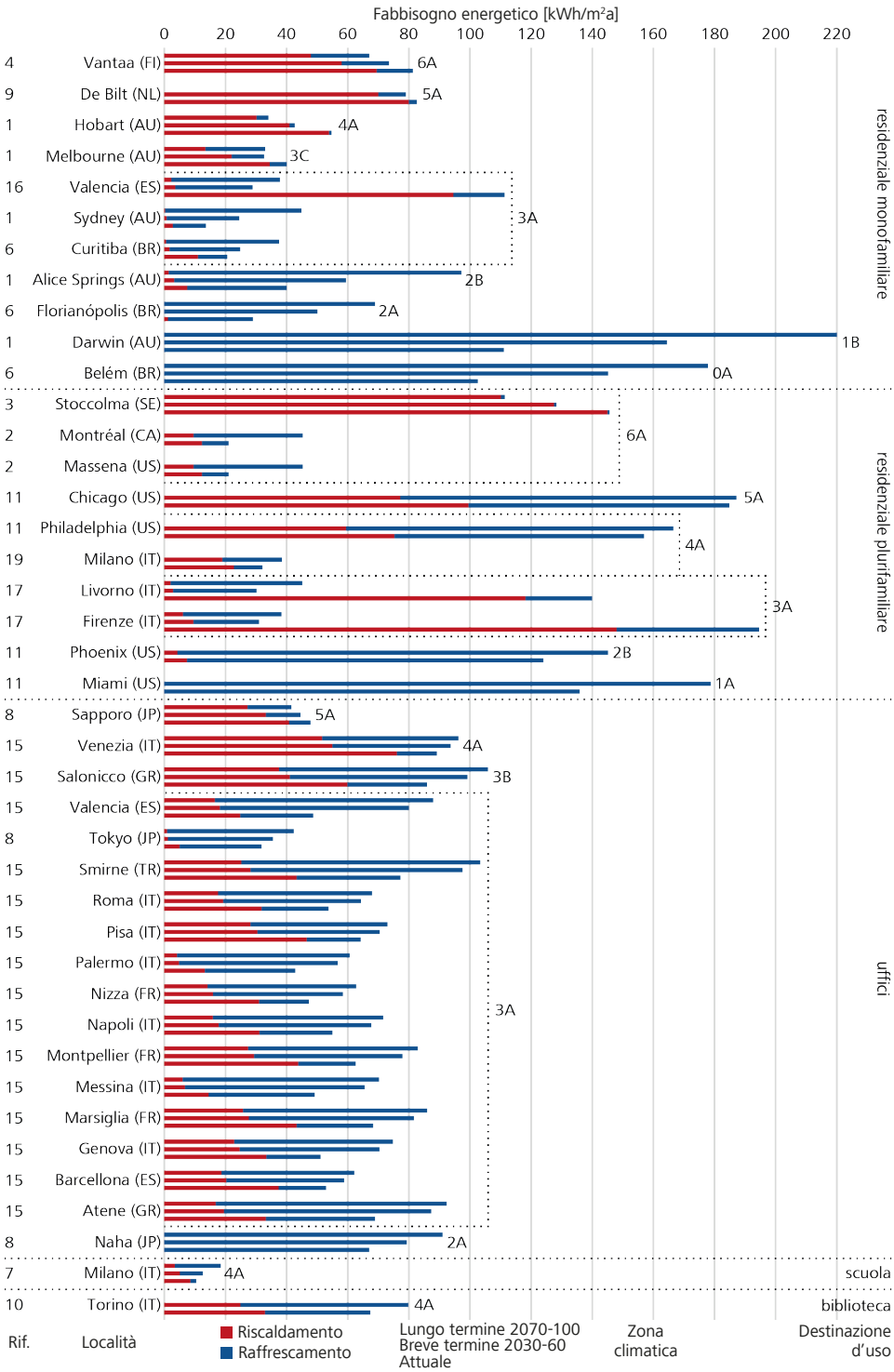


Figura 4.28

Variazione assoluta dei fabbisogni per riscaldamento e per raffrescamento nei casi studio analizzati; i numeri dei riferimenti rimandano alla bibliografia a conclusione della Tabella 4.6.

caratteristiche fissate dagli standard americani del DOE (Department of Energy) e della ASHRAE. Il confronto fra tre località in diverse zone climatiche conferma le tendenze previste, più marcate nel caso dell'uso residenziale: a Boston (zona boreale 5A) la riduzione dei consumi per riscaldamento fa diminuire quelli totali, a Baltimora (zona temperata 4A) il crescente fabbisogno di raffrescamento bilancia quello minore per riscaldamento, con la prevalenza del primo sul lungo termine, mentre a Miami (zona tropicale 1A), già dominata dal raffrescamento, i consumi aumentano considerevolmente.

Cellura et al. (2018)[45] confrontano i fabbisogni energetici di un edificio tipo per uffici in 15 città nel Mediterraneo, con caratteristiche costruttive variabili in funzione del contesto ma costanti in futuro. In tutti i casi, dato il clima temperato più o meno caldo, si calcola un aumento nella domanda totale a causa del raffrescamento, con valori massimi a Valencia (zona 3A) e minimi a Venezia (zona 4A).

Robert e Kummert (2012)[46] analizzano invece la resilienza di edifici NZEB residenziali: nonostante Montréal (CA) e Massena (US) ricadano in clima boreale (6A), suggerendo quindi una diminuzione dei consumi trainata dal riscaldamento, i già elevati livelli di prestazione dell'involucro determinano l'aumento degli stessi a causa del raffrescamento; di conseguenza, l'impianto fotovoltaico attuale, nonostante il lieve aumento di produzione di energia elettrica grazie alla crescente radiazione solare, non è sufficiente a coprire i fabbisogni futuri, facendo mancare l'obiettivo NZEB. Anche lo studio di Moazami et al. (2016)[47], sul retrofit di una scuola materna di Milano (zona temperata 4A) con livelli NZEB, riscontra il medesimo risultato, evidenziando di nuovo il problema di una progettazione basata soltanto sul clima attuale, tuttavia superabile in modo relativamente agevole ampliando la superficie di

[45] Cellura et al., *op. cit.*

[46] Robert, Kummert, *op. cit.*

[47] Moazami, A., Carlucci, S., Causone, F., Pagliano, L., 2016. Energy Retrofit of a Day Care Center for Current and Future Weather Scenarios. In *Procedia Engineering*, 145, 1877, pp. 1330–37.

captazione del fotovoltaico; i due casi, quindi, confermano come tecnologie già efficienti si adattino meglio al cambiamento climatico.

Altri approcci mantengono condizioni fisse per quanto riguarda l'involucro, variando soltanto le tecnologie per coprire i fabbisogni energetici, come nello studio di Nik e Sasic Kalagasidis (2013)[48], in cui si confrontano strategie di raffrescamento naturale e attivo. A Stoccolma (zona boreale 6A) la riduzione del riscaldamento provoca minori consumi totali, e il ridotto aumento del raffrescamento è fronteggiabile ancora con la sola ventilazione naturale, salvo per gli scenari climatici più critici in cui può essere utile integrare un sistema meccanico.
Jylhä et al. (2015)[49] analizzano diverse soluzioni impiantistiche per la città di Vantaa, in Finlandia, con il medesimo clima del caso precedente e le medesime tendenze nei fabbisogni futuri; il sistema con pompa di calore geotermica e free-cooling risulta il più efficiente per i minori consumi finali e il più resiliente al cambiamento climatico, sfruttando l'inerzia termica del sottosuolo.

Le altre ricerche valutano scenari di rinnovamento più profondi, sia per l'involucro edilizio sia per gli impianti, con l'obiettivo di mitigare i consumi e/o di adattarsi al clima futuro.
Nell'analisi di soluzioni passive di efficientamento di una tipica residenza a tre piani olandese a De Bilt (zona 5A), van Hooff et al. (2016)[50] rilevano che l'isolamento maggiore in futuro riduce drasticamente il fabbisogno per riscaldamento, tuttavia richiede il controllo degli apporti solari in estate e una maggiore ventilazione naturale per limitare l'aumento del raffrescamento; altre strategie quali tetti verdi, riduzione dell'inerzia termica o maggiore riflettanza superficiale dell'involucro sono poco efficaci o controproducenti in inverno.

[48] Nik, Sasic Kalagasidis, *op. cit.*
[49] Jylhä, K., Jokisalo, J., Ruosteenoja, K., Pilli-Sihvola, K., Kalamees, T., Seitola, T., Mäkelä, H.M., Hyvönen, R., Laapas, M., Drebs, A., 2015. Energy Demand for the Heating and Cooling of Residential Houses in Finland in a Changing Climate. In *Energy and Buildings*, 99, pp. 104–16.
[50] van Hooff et al., *op. cit.*

Conclusione analoga per Pérez-Andreu et al. (2018)[51], che, per un'abitazione monofamiliare a Valencia (zona 3A), evidenziano l'uso di schermature solari quale l'azione più efficace nella riduzione dei fabbisogni per raffrescamento, aggiungendo come il recupero del calore nella ventilazione meccanica sia molto utile nella riduzione dei consumi invernali.

Invidiata e Ghisi (2016)[52], pur concordando sull'effetto del controllo solare nel caso di una tipica residenza monofamiliare di edilizia sociale in Brasile, rilevano l'inefficacia della ventilazione naturale per il raffrescamento in climi molto più caldi, con l'esigenza di impianti meccanici e un conseguente aumento dei consumi.

Lo studio di Andrić et al. (2017)[53] confronta i soli fabbisogni per riscaldamento di un edificio residenziale plurifamiliare in diverse località, con progressivi interventi sull'involucro in futuro. Nelle zone temperate si osserva una netta riduzione delle ore di riscaldamento, con un carico per gli impianti inferiore al 15% della potenza di picco; in zone boreali e polari le ore di funzionamento non diminuiscono, ma il carico non supera mai il 30% del picco.

Waddicor et al. (2016)[54] valutano in combinazione l'impatto del cambiamento climatico e del degrado dei componenti edilizi ed impiantistici, per una biblioteca a Torino (zona temperata 4A). La perdita di efficienza dei gruppi frigoriferi amplifica i consumi per raffrescamento, e quella del sistema di riscaldamento limita la riduzione dei relativi consumi. Le misure di mitigazione legate agli impianti sono quindi più efficaci rispetto a quelle sull'involucro, mentre l'aumento del consumo di energia primaria è legato al fattore di conversione dell'energia elettrica dei gruppi frigoriferi, in crescita, che prevale sulla riduzione del gas naturale per il riscaldamento, con coefficiente inferiore.

[51] Pérez-Andreu et al., *op. cit.*

[52] Invidiata, Ghisi, *op. cit.*

[53] Andrić et al., 2017, *op. cit.*

[54] Waddicor, D.A., Fuentes, E., Sisó, L., Salom, J., Favre, B., Jiménez, C., Azar, M., 2016. Climate Change and Building Ageing Impact on Building Energy Performance and Mitigation Measures Application: A Case Study in Turin, Northern Italy. In *Building and Environment*, 102, pp. 13–25.

Edificio e localizzazione	*Interventi robusti*	*Frequenza*
Zona climatica C Edificio 1.3 - Orientamento S/N	**Isolamento involucro standard Infissi standard (doppio vetro b.e.) Pompa di calore aria-aria rev.**	**100%**
	-	-
Zona climatica C Edificio 1.3 - Orientamento O/E	**Isolamento involucro standard Infissi standard con schermatura Pompa di calore aria-aria rev.**	**100%**
	-	-
Zona climatica C Edificio 2.1 - Orientamento S/N	**Isolamento involucro avanzato Infissi standard Pompa di calore aria-aria rev.**	**50%**
	Isolamento involucro avanzato Infissi standard con schermatura Pompa di calore aria-aria rev.	**50%**
Zona climatica C Edificio 2.1 - Orientamento O/E	**Isolamento involucro avanzato Infissi standard con schermatura Pompa di calore aria-aria rev.**	**100%**
	-	-
Zona climatica D Edificio 1.3 - Orientamento S/N	**Isolamento involucro avanzato Infissi standard Pompa di calore aria-aria rev.**	**69%**
	Isolamento involucro avanzato Infissi avanzato (triplo vetro b.e.) Pompa di calore aria-aria rev.	**31%**
Zona climatica D Edificio 1.3 Orientamento O/E	**Isolamento involucro avanzato Infissi avanzato con schermatura Pompa di calore aria-aria rev.**	**69%**
	Isolamento involucro avanzato Infissi avanzato con schermatura Pompa di calore aria-aria rev.	**31%**
Zona climatica D Edificio Tipo 2.1 Orientamento S/N	**Isolamento involucro avanzato Infissi standard Pompa di calore aria-aria rev.**	**100%**
	-	-
Zona climatica D Edificio 2.1 - Orientamento O/E	**Isolamento involucro avanzato Infissi standard con schermatura Pompa di calore aria-aria rev.**	**100%**

Tabella 4.4

Soluzioni di efficientamento e relativa frequenza nell'intorno dei valori ottimali.
Fonte: Pierangioli, *op. cit.*

Scenario	OPT_RW		OPT_8.5-95		OPT_4.5-95	
Parameter	Variable value	Relative Frequency (neighbourhood)	Variable value	Relative Frequency (neighbourhood)	Variable value	Relative Frequency (neighbourhood)
ResO-N [(m²K)/W]	1.7165	54%	1.1455	71%	1.1455	63%
ResO-EOS [(m²K)/W]	1.7165	44%	1.1455	71%	1.1455	83%
Res2 [(m²K)/W]	0	89%	0	88%	0	85%
ResR [(m²K)/W]	0.6095	30%	0	89%	0	87%
WTS	Double glazing, low-E, with Argon	93%	Double glazing, low-E, with Argon	92%	Double glazing, low-E, with Argon	92%
WTN	Double glazing, low-E, with Argon	93%	Double glazing, low-E, with Argon	92%	Double glazing, low-E, with Argon	92%
WTEW	Double glazing, low-E, with Argon	88%	Double glazing, low-E, with Argon	78%	Double glazing, low-E, with Argon	69%
WFactor [-]	0.8	98%	0.8	98%	0.8	97%

T-Gen	Heat pump	100%	Heat pump	99%	Heat pump	100%
T-Ter	Fancoils	100%	Fancoils	100%	Fancoils	100%
T-PV	Polycrystalline	99%	Polycrystalline	100%	Polycrystalline	100%
Dim-WS [l/m²]	100	97%	100	97%	100	97%
T-Aux	Gas	100%	Gas	100%	Gas	100%
Perc-PV [%]	36	59%	76	51%	76	47%
Perc-TH [%]	11	91%	11	89%	11	89%
C_G [€/m²]	206.53		202.00		203.60	
EP_{tot} [kWh_{EP}/m^2]	88.52		72.02		73.21	
EP_{uren} [kWh_{EP}/m^2]	68.10		61.02		61.78	
$Q_{H,nd}$ [kWh/m²]	22.79		18.41		19.57	
$Q_{C,nd}$ [kWh/m²]	9.34		19.69		19.33	

Tabella 4.5

Soluzioni di efficientamento e relativa frequenza nell'intorno dei valori ottimali.
Fonte: Bilardo et al., *op. cit.*

Infine si richiamano le ricerche che applicano l'ottimizzazione costo-prestazione descritta al paragrafo precedente.

Pierangioli (2017)[55], analizzando le residenze di edilizia pubblica in Toscana, a Firenze (zona D italiana) e Livorno (zona C italiana), dimostra l'efficacia delle misure di efficientamento su costruzioni attualmente poco performanti, con riduzione dei consumi totali, e in entrambe le stagioni in zona D, dove l'effetto dell'isola di calore urbana è già molto impattante. Le soluzioni ottimali prevedono elevati livelli di isolamento, efficaci anche nel ridurre le rientrate di calore in estate, schermature solari e impianti con pompa di calore aria-aria invertibile, ma risultano influenzabili dal comportamento dell'utenza soprattutto nella ventilazione naturale.

Ferrara e Fabrizio (2017)[56], relatori della presente tesi, insieme a Bilardo (2019)[57], nei loro studi su edifici nZEB residenziali a Parigi e Milano (zona temperata 4A) applicano la citata metodologia EDeSSOpt per individuare le soluzioni più resilienti al cambiamento climatico. Nel primo caso, come detto in apertura del paragrafo, lo scenario con l'impianto più efficiente con pompa di calore aria-aria invertibile si rivela più robusto in futuro, consentendo di ridurre la resistenza dell'involucro opaco; nel secondo articolo, viene confermata la soluzione impiantistica, mentre per l'involucro opaco le prestazioni ottimali si presentano più incerte, poiché con meno frequenza statistica nelle simulazioni, confermando come l'isolamento termico sia da gestire molto attentamente per non produrre effetti negativi; si prevede inoltre l'aumento della superficie di pannelli fotovoltaici, come sostenuto in precedenza per altri edifici nZEB.

[55] Pierangioli, *op. cit.*
[56] Ferrara, Fabrizio, *op. cit.*
[57] Bilardo et al., *op. cit.*

Questioni aperte

La revisione della letteratura scientifica presentata nel capitolo ha evidenziato le numerose differenze di approccio e metodologiche tra i vari studi, a seconda del contesto geografico, dell'obiettivo della ricerca e delle strategie messe in campo a fronte del cambiamento climatico.

A conclusione di tale indagine, si intende a questo punto porre l'accento su alcune questioni aperte, confermate anche dal confronto con altre analisi bibliografiche (de Wilde, Coley, 2012[58]; Li et al., 2012[59]; Andrić, Le Corre et al., 2019[60]), che necessitano di approfondimento e di ulteriori contributi in futuro.

Un elemento di riflessione fondamentale è, come detto, la limitata considerazione del cambiamento climatico nei regolamenti e nelle normative edilizie, rivolti quasi esclusivamente alla mitigazione del fenomeno senza la valutazione degli effetti già in atto e ormai inevitabili, come la diversa evoluzione dei fabbisogni energetici e del tipo di vettori per garantirli.

Ad esempio lo standard nZEB, nell'attenzione alla produzione di energia da fonti rinnovabili, è una buona base di partenza in vista dei crescenti consumi elettrici legati al raffrescamento e a sistemi di riscaldamento più efficienti come le pompe di calore.[61]

In questo senso è da notare l'evidente sviluppo del concetto di resilienza dell'edificio e la proliferazione di ricerche maggiormente improntate all'adattamento al cambiamento climatico, soprattutto attraverso i processi di ottimizzazione delle soluzioni progettuali analizzati in precedenza (Ferrara, Fabrizio, 2017[62]; Bilardo et al., 2019[63]).

[58] de Wilde, Coley, *op. cit.*
[59] Li et al., *op. cit.*
[60] Andrić, Le Corre et al., 2019, *op. cit.*
[61] Li et al., *op. cit.*, p. 107.
[62] Ferrara, Fabrizio, *op. cit.*
[63] Bilardo et al., *op. cit.*

Dal punto di vista climatico, un aspetto ancora poco considerato nelle ricerche in oggetto è il fenomeno dell'isola di calore urbana, anche se il suo effetto è spesso incluso implicitamente nei dati climatici attuali delle località analizzate. Dal punto di vista operativo, invece, è necessario approfondire le implicazioni del comportamento dell'utenza valutando diversi profili di occupazione e di gestione dei componenti edilizi e degli impianti.
Il lavoro di Pierangioli (2017)[64] emerge nuovamente per l'attenzione a tali questioni, nello specifico sia per l'utilizzo di un file climatico per la città di Firenze «che incorpori l'effetto Isola di Calore Urbana, in grado di amplificare ulteriormente gli effetti del cambiamento climatico»[65], sia per l'impiego di «condizioni d'uso non standardizzate (*tailored rating*)»[66] nella ulteriore verifica della resilienza delle soluzioni ottimizzate al cambiamento climatico.

La corretta scelta degli interventi sull'edificio e la continua manutenzione degli stessi sono fondamentali, soprattutto nel garantire l'adeguatezza delle prestazioni energetiche a lungo termine, in relazione sia al ciclo di vita utile dell'edificio sia all'orizzonte temporale delle simulazioni climatiche; a tal proposito, si rileva ancora lo studio di Waddicor et al. (2016)[67] per la valutazione di progressivi scenari di degrado temporale in aggiunta al cambiamento climatico.

Infine, molti studi esprimono la necessità di affiancare agli usuali valori di fabbisogno netto e consumo di energia fornita e di energia primaria, altri indicatori più qualitativi, secondo l'approccio del comfort termico adattivo. Tenendo conto della possibile evoluzione degli attuali standard in vista delle future condizioni climatiche, parametri quali le ore di comfort (Invidiata, Ghisi, 2016)[68] e l'indice di discomfort a lungo termine (Moazami et al., 2016)[69] sono

[64] Pierangioli, *op. cit.*
[65] *Ivi*, p. 22.
[66] *Ibid*.
[67] Waddicor et al, *op. cit.*
[68] Invidiata, Ghisi, *op. cit.*
[69] Moazami et al., *op. cit.*

sempre più frequenti in letteratura, in particolare per valutare sistemi di climatizzazione naturale derivati dalla bioclimatica.

Un ultimo appunto sulla rilettura dei riferimenti riguarda i risultati ottenuti nelle varie ricerche, in particolare il loro confronto su base comune e coerente per poterne sviluppare un'analisi critica. Se i dati climatici di riferimento e quelli generati per il futuro sono pressoché sempre dichiarati, è auspicabile la stessa specificazione più esplicita per gli indicatori di prestazione energetica utilizzati, non sempre disponibili e altrimenti difficilmente ricavabili, oppure espressi solo sottoforma di variazione percentuale o di rapporto tra riscaldamento e raffrescamento. Nel caso di calcolo dei soli fabbisogni netti o dei soli consumi, sono altresì necessari i fattori di conversione e i rendimenti degli impianti termici considerati.

Di seguito la Tabella 4.6 che cataloga gli studi analizzati per una lettura sinottica dei risultati e delle conclusioni fondamentali.

Effetti del cambiamento climatico sulle prestazioni energetiche degli edifici							
Rif.	**Anno**	**Argomento**	**Localizzazione**	**Zona climatica (Köppen)**	**Zona climatica (ASHRAE)**	**Destinazione d'uso**	**Categoria intervento**
1	2010	Impatto del CC sui fabbisogni energetici dell'edificio	Darwin (AU)	Tropicale Aw	1B	Residenziale, monofamiliare	Edificio tipo esistente; nuova costruzione
			Alice Springs (AU)	Arida BSh	2B		
			Sydney (AU)	Temperata Cfa	3A		
			Melbourne (AU)	Temperata Cfb	3C		
			Hobart (AU)	Temperata Cfb	4A		
2	2012	Impatto del CC su prestazioni energetiche NZEBs	Montréal (CA)	Boreale Dfb	6A	Residenziale, plurifamiliare	NZEBs con caratteristiche prefissate
			Massena, NY (US)				
3	2013	Impatto del CC sui fabbisogni energetici dell'edificio	Stoccolma (SE)	Boreale Dfb	6A	Stock edifici residenziali	Edificio esistente
4	2015	Impatto del CC sui fabbisogni energetici dell'edificio	Vantaa (FI)	Boreale Dfb	6A	Residenziale, monofamiliare	Edificio esistente
5	2016	Impatto del CC sul fabbisogno per riscaldamento di un quartiere	Lisbona (PT)	Temperata Csa	3C	Quartiere (diverse destinazioni d'uso)	Edifici esistenti
6	2016	Impatto del CC sui fabbisogni energetici dell'edificio	Belém (BR)	Tropicale Af	0A	Residenziale, monofamiliare	Edificio tipo esistente
			Florianópolis (BR)	Temperata Cfa	2A		
			Curitiba (BR)	Temperata Cfb	3A		
7	2016	Impatto del CC su consumi energetici NZEB	Milano (IT)	Temperata Cfa	4A (zona E - IT)	Terziario, scuola	Edificio esistente

Tabella 4.6

Riferimenti bibliografici sul tema degli effetti del cambiamento climatico sulle prestazioni energetiche degli edifici, con applicazione a casi studio reali, catalogati secondo uno schema definito dall'autore della presente tesi. La selezione non si intende chiaramente esaustiva, ma utile a introdurre i metodi più diffusi e i risultati salienti delle ricerche.

Effetti del cambiamento climatico sulle prestazioni energetiche degli edifici									
Generazione dati climatici futuri	**Orizzonte temporale**	**Scenari emissioni**	**Parametri climatici**	**Metodo analisi energetica**	**Strumenti impiegati**	**Soluzioni involucro**	**Soluzioni impianti**	**Risultati**	**Conclusioni**
Morphing da 9 GCM; previsione puntuale su *horizon years* tipici	TMY 1990; 2050; 2100	A1B, A1FI, 550ppm stabilisation (SRES)	Temperatura media annua; umidità relativa; radiazione solare	Simulazione dinamica	MAGICC; OZClim; AccuRate	Diverse soluzioni per 3 livelli di rating definiti da NatHERS: 1) 2 stars (esistenti); 2) 5 stars (nuove costruzioni standard); 3) 7 stars (nuove costruzioni alta efficienza)	Solo sistema di ventilazione meccanica; impianti non specificati (soli fabbisogni)	$Q_{H,nd}$ = ±0%; $Q_{C,nd}$ = +40/135%; $Q_{H+C,nd}$ = +40/135% $Q_{H,nd}$ = -50/94%; $Q_{C,nd}$ = +62/283% $Q_{H+C,nd}$ = +41/213% $Q_{H,nd}$ = -66/99%; $Q_{C,nd}$ = +93/462% $Q_{H+C,nd}$ = +61/350% $Q_{H,nd}$ = -30/78%; $Q_{C,nd}$ = +69/380% $Q_{H+C,nd}$ = -14/22% $Q_{H,nd}$ = -20/58%; $Q_{C,nd}$ = +79/572% $Q_{H+C,nd}$ = -19/48%	Climi caldi: aumento Q_C prevale su diminuzione Q_H e provoca aumento Q_{H+C}; in val. assoluto aumento Q_{H+C} maggiore in zone 1B e 2B e in soluzioni "2 stars"; in % aumento maggiore in zona 3A e in soluzioni "7 stars". Climi freddi: diminuzione Q_H prevale su aumento di Q_C e provoca diminuzione Q_{H+C}; in val. assoluto diminuzione Q_{H+C} maggiore in zona 4A e in soluzioni "2 stars"; in % diminuzione maggiore in soluzioni "7 stars"; in zona 3C minore diminuzione Q_{H+C}, ma tendenza inversa e crescente al 2100 a causa di Q_C.
Morphing da HadCM3; previsione puntuale su *horizon years* tipici; previsione continua con evoluzione anno per anno	CWEC; TMY2; TMY3; 2011-40; 2041-70; 2011>2060	A2 (SRES)	Temperatura media annua; giorni più caldi estate; giorni più freddi inverno; umidità relativa; radiazione solare	Simulazione dinamica	Matlab; TRNSYS	R_{Wall} = 8; R_{Roof} = 12; W = tripli vetri b-e + kripton	Pompa di calore geotermica acqua-aria invertibile; distribuzione canali ad aria + recuperatori di calore + free cooling; ventilazione meccanica; PV con η = 18%	$E_{el,tot}$ = +6/9%; $E_{el,PV}$ = +2,6/1,5% $E_{el,exc}$ = -127/276% (+375 > -660 kWh) $E_{el,H}$ = -28/40%; $E_{el,C}$ = +154/219%	Aumento $E_{el,C}$ prevale su diminuzione $E_{el,H}$ e free-cooling, con aumento $E_{el,tot}$; leggero aumento produzione da PV, ma insufficiente e in calo al 2050 per minore radiazione solare (da previsioni); aumento $E_{el,rete}$ implica mancato target NZEB.
RCA3: downscaling dinamico da 5 GCM; previsione "ibrida": *horizon years* ad intervalli di 20 anni	1961-80 > 2081-100 (intervalli di 20 anni)	B1, A1B, A2 (SRES)	Temperatura media annua	Modello RC basato su equivalenza termo-elettrica	Simulink (Matlab)	U_{media} = da 0,3 a 1,2; valore più frequente U = 0,5	Impianti non specificati (soli fabbisogni); 3 modalità raffrescamento: 1) naturale; 2) ibrido; 3) solo meccanico ($P_{C,max} = P_{H,max}$)	$Q_{H,nd}$ = -20/25% (130/160 > 95/125) 2) $Q_{C,nd}$ = +50/90% (0,2/1,2 > 0,3/2,3) 3) $Q_{C,nd}$ = +75/62% (0,8/3,2 > 1,4/5,5)	Diminuzione $Q_{H,nd}$ prevale molto su aumento $Q_{C,nd}$, con minor $Q_{H+C,nd}$; raffrescamento 1) sempre efficace solo per alcuni modelli climatici, altri prediligono la modalità 2); raffrescamento 3) sconsigliato per maggior aumento consumi.
Morphing da CMIP3; previsione puntuale su *horizon years* tipici	TRY2012 1980-2009; 2030; 2050; 2100	B1, A1B, A2 (SRES)	HDD; CDD; temperatura media annua; temperatura media mensile; radiazione solare	Simulazione dinamica; metodo gradi giorno	IDA-ICE	Standard National Building Code of Finland: U_{wall} = 0,21; U_{roof} = 0,14; U_{floor} = 0,27; U_w = 1	A) Riscaldamento elettrico diretto e raffrescamento meccanico; ventilazione meccanica e recuperatori di calore B) Teleriscaldamento e raffrescamento meccanico; ventilazione meccanica e recuperatori di calore C) Pompa di calore geotermica e free cooling geotermico; ventilazione meccanica e recuperatori di calore	$Q_{H+V,nd}$ = -11 / -17 / -35% (69,5 > 61,9 / 57,7 / 45,2 kWh/m^2) $Q_{C,nd}$ = +21 / +30 / +70% (11,8 > 14,3 / 15,3 / 20,1 kWh/m^2) A) $E_{del,H+V+C}$ = -9 / -15 / -30% (76,5 > 69,6 / 65 / 53,6 kWh/m^2) B) $E_{del,H+V+C}$ = -10 / -16 / -31% (93,5 > 84,2 / 78,5 / 64,5 kWh/m^2) C) $E_{del,H+V+C}$ = -10 / -17 / -35% (27,5 > 24,8 / 22,8 / 17,9 kWh/m^2)	Diminuzione $Q_{H+V,nd}$ prevale molto su aumento $Q_{C,nd}$; in tutti i casi diminuzione E_{del}, con differenti valori a seconda dei rendimenti globali degli impianti: A) $\eta_{g,H+V}$ = 0,96 / COP = 3 B) $\eta_{g,H+V}$ = 0,7 / COP = 3 C) SEER = 3,1 / COP = 30 Alla luce del crescente $Q_{C,nd}$, il sistema C) risulta il più efficiente e sostenibile, soprattutto grazie al free cooling, più resiliente al CC in clima freddo.
Morphing da HadCM3; previsione puntuale su *horizon years* da intervalli di 10 anni	TMY2 2010; 2020; 2030; 2040; 2050;	RCP 2.6, RCP 6.0, RCP 8.5	Temperatura media mensile; radiazione solare	Modello RC basato su equivalenza termo-elettrica; validazione con simulazione dinamica	CCWorldWeatherGen; ArcGIS; LiDAR; Design Builder (EnergyPlus)	Diverse soluzioni per 3 scenari di rinnovamento, articolati secondo 4 livelli di prestazione: minimo (standard 2010); moderato; profondo; NZEB	Teleriscadamento (inclusi solo gli edifici del quartiere collegabili a tale rete)	Nessun intervento (2050): $Q_{H,nd}$ = -6 / -21 / -37%; Rinnovamento leggero (2050): $Q_{H,nd}$ = -21 / -35 / -48%; Rinnovamento profondo (2050): $Q_{H,nd}$ = -28 / -41 / -52%	Riduzione $Q_{H,nd}$ maggiore con scenari di efficientamento più profondi, per riduzione trasmittanze involucri edilizi. Il fabbisogno del quartiere è espresso come densità di richiesta termica (GWh/km^2), per valutare la sostenibilità economica della rete di teleriscaldamento: il valore si mantiene sempre sopra la soglia accettabile di 50 GWh/km^2, ma con lo scenario più profondo aumenta il tempo di ritorno dell'investimento.
Morphing da HadCM3; previsione puntuale su *horizon years* tipici	TRY; 2011-40; 2041-70; 2071-100	A2 (SRES)	Temperatura media mensile; umidità relativa; radiazione solare	Simulazione dinamica	CCWorldWeatherGen; EnergyPlus	Diverse soluzioni: riduzione assorbimento sup. opache = 0,5 / 0,3; U_{wall} = 2,46 / 0,6; U_{roof} = 1,75 / 0,59; U_{floor} = 4; U_W = 5 (vetro singolo) + schermature avvolgibili	1) Ventilazione naturale 2) Sistema di condizionamento meccanico	1) h_{comf} = -21/-93% 2) $Q_{H+C,nd}$ = -11% / +111% (102 > 91 / 217) 1) h_{comf} = -14/+15% 2) $Q_{H+C,nd}$ = +7% / +186% (29 > 31 / 82) 1) h_{comf} = +22/+60% 2) $Q_{H+C,nd}$ = -25% / +140% (20 > 14 / 48)	1) continua diminuzione ore comfort a causa di T crescente; 2) aumento $Q_{H+C,nd}$ corrisponde ad aumento $Q_{C,nd}$ ($Q_{H,nd}$ nullo). 1) ore comfort variano per soluzioni passive, in diminuzione sul lungo periodo; 2) aumento $Q_{H+C,nd}$ corrisponde ad aumento $Q_{C,nd}$ ($Q_{H,nd}$ quasi trascurabile). 1) continuo aumento ore comfort grazie a T crescente; 2) diminuzione $Q_{H,nd}$ breve termine, poi prevale aumento $Q_{C,nd}$ e aumento $Q_{H+C,nd}$.
Morphing da HadCM3; previsione puntuale su *horizon years* tipici	TMY; 2014 reale; 2020; 2050; 2080	A2 (SRES)	HDD; CDD	Simulazione dinamica; metodo gradi giorno	CCWorldWeatherGen; EnergyPlus	Pre-retrofit / post-retrofit: U_{wall} = 1,2 / 0,1; U_{roof} = 1,3 / 0,1; U_{floor} = 1,3 / 0,3; U_W = 5,8 / 0,73	Pre-retrofit = Post-retrofit / NZEB: riscaldamento: caldaia a gas + radiatori ad acqua ad alta T e raffrescamento naturale / Pompa di calore aria-aria invertibile + PV con η = 13%	1) ΔEP_{tot} = da 117 a 93 kWh/m^2; ΔLDI = da 18 a 35%; 2) EP_H = -40 / -60%; EP_C = +233 / +700%; EP_{tot} = +13 / +40%; $E_{el,PV}$ = da 100/94% a 80% $E_{del,tot}$	Il retrofit limitato all'involucro (1) produce riduzione EP_{tot} per riduzione riscaldamento, ma tendenza crescente nel lungo termine; l'indice di comfort adattivo migliora, ma nel lungo periodo raffrescamento naturale insufficiente. Cambiando impianti (2), aumento EP_C prevale su riduzione EP_H, e altri consumi elettrici costanti, con aumento EP_{tot}; nel lungo termine la superficie di PV riesce a coprire solo 80% E_{del}.

Effetti del cambiamento climatico sulle prestazioni energetiche degli edifici							
Rif.	**Anno**	**Argomento**	**Localizzazione**	**Zona climatica (Köppen)**	**Zona climatica (ASHRAE)**	**Destinazione d'uso**	**Categoria intervento**
8	2016	Impatto del CC sui consumi energetici dell'edificio	Naha (JP)	Tropicale Af	2A	Terziario, uffici	Edificio tipo esistente
			Tokyo (JP)	Temperata Cfa	3A		
			Sapporo (JP)	Boreale Dfa	5A		
9	2016	Impatto misure passive di adattamento al CC sui fabbisogni energetici dell'edificio	De Bilt (NL)	Temperata Cfb	5A	Residenziale, monofamiliare	Edificio tipo esistente
10	2016	Impatto del CC e del degrado da invecchiamento sui consumi energetici dell'edificio	Torino (IT)	Temperata Cfa	4A (zona E - IT)	Terziario, biblioteca	Edificio esistente
11	2017	Impatto del CC sui consumi energetici dell'edificio	Miami, FL (US)	Tropicale Aw	1A	Residenziale, plurifamiliare; Terziario, uffici	Edificio tipo esistente
			Phoenix, AZ (US)	Arida BWh	2B		
			Philadelphia, PA (US)	Temperata Cfa	4A		
			Chicago, IL (US)	Boreale Dfa	5A		
12	2017	Impatto del CC sul fabbisogno per riscaldamento	Madrid (ES)	Temperata Csa	3A	Residenziale, plurifamiliare	Edificio tipo esistente
			Milano (IT)	Temperata Cfa	4A (zona E - IT)		
			Amburgo (DE)	Temperata Cfb	5C		
			Yellowknife (CA)	Boreale Dsb	8		
			Resolute (CA)	Polare ET	8		
13	2017	Impatto del CC sui consumi energetici dell'edificio	Kaunas (LT)	Boreale Dfb	6A	Residenziale, plurifamiliare	Edificio tipo esistente; nuova costruzione
14	2018	Impatto del CC sui consumi energetici dell'edificio	Miami, FL (US)	Tropicale Aw	1A	Residenziale, plurifamiliare; Terziario, uffici	Edificio tipo esistente
			Baltimora, MD (US)	Temperata Cfa	4A		
			Boston, MA (US)	Boreale Dfa	5A		
15	2018	Impatto del CC sui fabbisogni energetici dell'edificio	15 città nel Mediterraneo	Arida BSk	3B	Terziario, uffici	Edificio tipo esistente
				Temperata Csa	3A		
				Temperata Cfa	4A		

Effetti del cambiamento climatico sulle prestazioni energetiche degli edifici									
Generazione dati climatici futuri	**Orizzonte temporale**	**Scenari emissioni**	**Parametri climatici**	**Metodo analisi energetica**	**Strumenti impiegati**	**Soluzioni involucro**	**Soluzioni impianti**	**Risultati**	**Conclusioni**
Anni tipo futuri sviluppati da JMA da modello regionale RCM20; previsione puntuale su *horizon years* tipici	RWY 1981-2000; 2031-50; 2081-100	A2 (SRES)	Temperatura media mensile; temperatura media annua	Simulazione dinamica	TAS	Diverse soluzioni: ed. 1990 / mod.1 / mod.2 U_{wall} = 0,6 / 0,4 / 0,2; U_{roof} = 0,4 / 0,3 / 0,2; U_W = 5,7 (vetro singolo) / 2 (vetro doppio) / 1,5 (vetro doppio b-e)	UTA + pompe di calore ad aria; Rendimento variabile: ed. 1990 / mod.1 / mod.2 COP = 2,7 / APF = 5,7 / 5,7 Diverse soluzioni di efficientamento: riduzione carichi interni / variazione $T_{int,set}$ / schermature / ventilazione notturna	$Q_{H,nd}$ = ±0%; $Q_{C,nd}$ = -41 / -32%; +19 / +36%; $Q_{H+C,nd}$ = -41 / -32%; +19 / +36%; $E_{del,H+C}$ = -72 / -68%; -44 / -36% $Q_{H,nd}$ = -72 / -75%; -78 / -81%; $Q_{C,nd}$ = -53 / -43%; +26 / +52%; $Q_{H+C,nd}$ = -54 / -45%; +9 / +31%; $E_{del,H+C}$ = -78 / -74%; -50 / -42% $Q_{H,nd}$ = -13 / -29%; -18 / -33%; $Q_{C,nd}$ = -68 / -59%; +61 / +104%; $Q_{H+C,nd}$ = -39 / -43%; -7 / -14%; $E_{del,H+C}$ = -71 / -73%; -55 / -61%	Se misure di efficientamento applicate solo in futuro (primi 2 valori), valori Qnd sempre in diminuzione rispetto ai livelli 1990, ma con tendenze crescenti in zone 2A e 3A. Se applicate subito (ultimi 2 valori), tendenze diverse: - in zona 2A, con QH,nd assente, aumento QC,nd = aumento QH+C,nd; - in zona 3A aumento QC,nd prevale su riduzione QH,nd; - in zona 5A riduzione QH,nd prevale su aumento QC,nd. E_{del} in futuro diminuisce grazie a rendimento migliore, ma ancora tendenza crescente in zona 2A e 3A.
Nessun metodo applicato: anno 2006 usato come anno tipo per i dati climatici futuri	NEN 5060: 1986-2005; 2006 (anno tipo futuro)	n.d.	HDD	Simulazione dinamica; metodo gradi giorno	EnergyPlus	Diverse soluzioni: ed. 1970 / standard 2012 / RC50 / RC65: U_{wall} = 2,5/0,29/0,2/0,15; U_{roof} = 1,25/0,29/0,2/0,15; U_W = 5,2 (vetro singolo)/1,62 (vetro doppio)	Sistema a tutt'aria per riscaldamento e raffrescamento	$Q_{H,nd}$ = -58/13% (165/80 > 70) $Q_{C,nd}$ = +800/246% (1/2,6 > 9) $Q_{H+C,nd}$ = -52/4% (166/82,6 > 79)	Diminuzione $Q_{H,nd}$ prevale molto su aumento $Q_{C,nd}$, con minor $Q_{H+C,nd}$; soluzioni con più isolamento aumentano $Q_{C,nd}$, riducibile aggiungendo schermature solari; altre soluzioni passive (tetti verdi, ventilazione naturale) insufficienti da sole.
Stima diretta da previsioni IPCC; previsione "ibrida": *horizon years* ad intervalli di 10 anni	IWEC2 2010; 2020; 2030; 2040; 2050; 2060	B1, A2 (SRES)	Temperatura media annua; radiazione solare	Simulazione dinamica	IDA-ICE	Crescenti livelli di degrado / diverse soluzioni di mitigazione: $U_{wall,roof}$ = +30% / aumento spessore isolante U_w = 1,1 / 0,6 / 0,6 g_w = 0,65 / 0,49 / 0,16	Crescenti livelli di degrado / diverse soluzioni di mitigazione: aumento perdite, diminuzione efficienze / aumento $T_{int,set}$ e COP; Impianti: UTA + VAV; 2 caldaie a gas e gruppo frigorifero condensato ad aria	2010 > 2030 / Retrofit 2040 > 2060 $E_{del,H}$ = +21% / -24% (37 > 45 / 28 kWh/m^2) $E_{del,C}$ = +87% / +60% (15 > 28 / 24 kWh/m^2) EP_{tot} = +17% / +5% (230 > 270 / 240 kWh/m^2)	Effetto combinato del CC e del degrado provoca aumento dei consumi, ma misure di efficientamento ne riducono la portata. Aumento $E_{del,C}$ si riduce migliorando COP e aumentando $T_{int,set}$ estiva; riduzione $E_{del,H}$ favorita da serramenti migliori, aumento isolamento superfici opache meno efficace. In EP_{tot} pesa aumento consumi elettrici, con fattore di conversione sfavorevole, rispetto a diminuzione consumi da combustibile.
Morphing da HadCM3; previsione puntuale su *horizon years* tipici	TMY3 1976-2005; 2040-69	A1FI, A2 (SRES)	Temperatura media annua; irradianza solare; umidità relativa; HDD; CDD	Simulazione dinamica; metodo gradi giorno	EnergyPlus	Edifici tipo USA: 1) Low-rise residential building; 2) 6-storey office building Caratteristiche costanti e nessun intervento in futuro	1) Riscaldamento: caldaia a gas; Raffrescamento: condizionatore terminale monoblocco;	$E_{del,H}$ = ±0%; -35/49%; -15/27%; -16/29% $E_{del,C}$ = +27/36%; +17/24%; +27/35%; +25/33% $E_{del,tot}$ = +14/19%; +5/7%; -2/6%; -4/9%	1) Diminuzione $E_{del,H}$ prevale su aumento $E_{del,C}$ nei climi freddi-temperati, con diminuzione $E_{del,tot}$; nei climi caldi avviene l'opposto, con aumento $E_{del,tot}$.
							2) UTA + VAV; gruppi frigoriferi e caldaie a gas	$E_{del,H}$ = -18/24%; -10/14%; -9/15%; -9/15% $E_{del,C}$ = +12/16%; +7/9%; +7/9%; +7/10% $E_{del,tot}$ = -0,1%; -2/3%; -3/6%; -4/6%	2) Diminuzione $E_{del,H}$ prevale su aumento $E_{del,C}$ in tutti i climi, con leggera diminuzione di $E_{del,tot}$, ma che mantiene valori elevati per gli uffici.
Morphing da HadCM3; previsione "ibrida": *horizon years* ad intervalli di 10 anni	TMY2 2010; 2020; 2030; 2040; 2050	RCP 2.6, RCP 6.0, RCP 8.5	Ore riscaldamento (HH)	Modello RC basato su equivalenza termo-elettrica; validazione con simulazione dinamica	CCWorldWeatherGen; Matlab; Design Builder (EnergyPlus)	Miglioramenti progressivi nel tempo: U_{media} = da 2,46 a 0,08	Teleriscaldamento e radiatori ad acqua ad alta T Nessun intervento in futuro	$Q_{H,nd}$ = -40/-66% $Q_{H,nd}$ = -50/-70% $Q_{H,nd}$ = -54/-72% $Q_{H,nd}$ = -50/-75% $Q_{H,nd}$ = -44/-66%	Diminuzione consumi riscaldamento in tutti i climi con tendenze simili, a parità di interventi; differenze minime tra gli scenari di emissioni; impatto maggiore nel breve termine delle prime misure di isolamento; per climi caldi diminuzione netta delle ore di riscaldamento e carico < 15% del picco; per climi freddi diminuzione trascurabile HH ma carico < 30% del picco.
Morphing da 5 GCM; previsione puntuale su *horizon years* tipici	DATSAV3 1980-99; 2011-40; 2041-70; 2071-100	RCP 2.6, RCP 8.5	Temperatura media mensile	Simulazione dinamica	CCWorldWeatherGen; HEED	3 soluzioni: U_{wall} = 0,36 / 0,1 / 0,05 U_W = 0,4 + schermature	Sistema di condizionamento: SEER = 13 / 19,5; Ventilazione: ACH = 5 / 4 / 0,6 SLA = 2,5 / 2 / 0,3	$E_{p,tot}$ = -8,5/-29,6% $Q_{H,nd}$ = -8/-33% $Q_{C,nd}$ = +10/+16%	Diminuzione $Q_{H,nd}$ prevale molto su aumento $Q_{C,nd}$, con diminuzione consumi totali.
Morphing da 14 GCM: intervallo compreso tra WP 10% e WP 95%; previsione puntuale su *horizon years* tipici	TMY3 attuale; 2045; 2075; 2099	RCP 4.5, RCP 8.5	Temperatura media mensile;	Simulazione dinamica	WeatherShift; EnergyPlus	Edifici tipo DOE secondo standard ASHRAE 90.1-2004: 1) Mid-rise apartment building; 2) Medium office building Caratteristiche costanti e nessun intervento in futuro	Edifici tipo DOE secondo standard ASHRAE 62.1-2004: 1) Mid-rise apartment building; 2) Medium office building Caratteristiche costanti e nessun intervento in futuro	EP_{tot} 1) = +5/20% EP_C 1) = +5/18%	Necessità sempre maggiore raffrescamento influisce sull'aumento dei consumi totali; riscaldamento già attualmente poco impattante.
								EP_{tot} 1) = -2/+2% EP_H 1) = -3/10% EP_C 1) = 0/+10%	Consumi totali piuttosto stabili; calo riscaldamento compensa aumento raffrescamento.
								EP_{tot} 1) = -5/10% EP_H 1) = -8/20% EP_C 1) = +2/10%	Diminuzione consumi totali grazie al calo del riscaldamento, nonostante leggero aumento raffrescamento.
Morphing da CESM1 (CAM5); previsione puntuale su *horizon year* tipici;	IWEC attuale; 2035; 2065; 2090	RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5	Temperatura media annua; temperatura media mensile	Simulazione dinamica	TRNSYS	Diversi valori per località: 3B / 3A / 4A U_{wall} = 1÷0,8 / 0,7÷0,3 / 0,28; U_{roof} = 0,45÷0,4 / 0,36÷0,26 / 0,24; U_{floor} = 0,9÷0,7 / 0,5÷0,3 / 0,28; U_W = 5,7÷2 / 4÷1,8 / 1,4	Impianti non specificati (soli fabbisogni); ventilazione naturale	$Q_{H,nd}$ = -19 / -46 / -56%; $Q_{C,nd}$ = +88 / +181 / +258%; $Q_{H+C,nd}$ = +14 / +24 / +38%	In tutte le zone climatiche aumento $Q_{H+C,nd}$ per prevalenza aumento $Q_{C,nd}$. In zona 3A (Valencia) aumento più marcato, mentre in zona 4A (Venezia) aumento lieve, contenuto da riduzione $Q_{H,nd}$.
								$Q_{H,nd}$ = -8 / -41 / -58%; $Q_{C,nd}$ = +109 / +187 / +317%; $Q_{H+C,nd}$ = +47 / +85 / +120%	
								$Q_{H,nd}$ = -18 / -38 / -43%; $Q_{C,nd}$ = +123 / +277 / +377%; $Q_{H+C,nd}$ = +3 / +8 / +18%	

Effetti del cambiamento climatico sulle prestazioni energetiche degli edifici							
Rif.	**Anno**	**Argomento**	**Localizzazione**	**Zona climatica (Köppen)**	**Zona climatica (ASHRAE)**	**Destinazione d'uso**	**Categoria intervento**
16	2018	Impatto del CC sui fabbisogni energetici dell'edificio	Valencia (ES)	Temperata Csa	3A	Residenziale, monofamiliare	Edificio tipo esistente

Studi con metodologia di ottimizzazione costo-prestazione							
Rif.	**Anno**	**Argomento**	**Localizzazione**	**Zona climatica (Köppen)**	**Zona climatica (ASHRAE)**	**Destinazione d'uso**	**Categoria intervento**
17	2017	Ottimizzazione edificio in scenari climatici futuri e resilienza al CC	Firenze (IT)	Temperata Csa	3A (zona D - IT)	Stock edilizia residenziale pubblica (plurifamiliare)	Edificio esistente
			San Vincenzo, Livorno (IT)	Temperata Csa	3A (zona C - IT)		
18	2017	Ottimizzazione edificio in scenari climatici futuri e resilienza al CC	Parigi (FR)	Temperata Cfb	4A	Residenziale, monofamiliare	Edificio tipo esistente
19	2019	Ottimizzazione edificio in scenari climatici futuri e resilienza al CC	Milano (IT)	Temperata Cfa	4A (zona E - IT)	Residenziale, plurifamiliare	Edificio tipo esistente

Riferimenti bibliografici

1. Wang, X., Chen, D., Ren, Z., 2010. Assessment of Climate Change Impact on Residential Building Heating and Cooling Energy Requirement in Australia. In *Building and Environment*, 45, 7, pp. 1663–82.

2. Robert, A., Kummert, M., 2012. Designing Net-Zero Energy Buildings for the Future Climate, Not for the Past. In *Building and Environment*, 55, pp. 150–58.

3. Nik, V.M., Sasic Kalagasidis, A., 2013. Impact Study of the Climate Change on the Energy Performance of the Building Stock in Stockholm Considering Four Climate Uncertainties. In *Building and Environment*, 60, pp. 291–304.

4. Jylhä, K., Jokisalo, J., Ruosteenoja, K., Pilli-Sihvola, K., Kalamees, T., Seitola, T., Mäkelä, H.M., Hyvönen, R., Laapas, M., Drebs, A., 2015. Energy Demand for the Heating and Cooling of Residential Houses in Finland in a Changing Climate. In *Energy and Buildings*, 99, pp. 104–16.

5. Andrić, I., Gomes, N., Pina, A., Ferrão, P., Fournier, J., Lacarrière, B., Le Corre, O., 2016. Modeling the Long-Term Effect of Climate Change on Building Heat Demand: Case Study on a District Level. In *Energy and Buildings*, 126, pp. 77–93.

6. Invidiata, A., Ghisi, E., 2016. Impact of Climate Change on Heating and Cooling Energy Demand in Houses in Brazil. In *Energy and Buildings*, 130, 2016, pp. 20–32.

7. Moazami, A., Carlucci, S., Causone, F., Pagliano, L., 2016. Energy Retrofit of a Day Care Center for Current and Future Weather Scenarios. In *Procedia Engineering*, 145, 1877, pp. 1330–37.

8. Shibuya, T., Croxford, B., 2016. The Effect of Climate Change on Office Building Energy Consumption in Japan. In *Energy and Buildings*, 117, pp. 1–11.

9. van Hooff, T., Blocken, B., Timmermans, H.J.P., Hensen, J.L.M., 2016. Analysis of the Predicted Effect of Passive Climate Adaptation Measures on Energy Demand for Cooling and Heating in a Residential Building. In *Energy*, 94, pp. 811–20.

10. Waddicor, D.A., Fuentes, E., Sisó, L., Salom, J., Favre, B., Jiménez, C., Azar, M., 2016. Climate Change and Building Ageing Impact on Building Energy Performance and Mitigation Measures Application: A Case Study in Turin, Northern Italy. In *Building and Environment*, 102, pp. 13–25.

Effetti del cambiamento climatico sulle prestazioni energetiche degli edifici									
Generazione dati climatici futuri	**Orizzonte temporale**	**Scenari emissioni**	**Parametri climatici**	**Metodo analisi energetica**	**Strumenti impiegati**	**Soluzioni involucro**	**Soluzioni impianti**	**Risultati**	**Conclusioni**
Morphing da 2 RCM (ottenuti per downscaling dinamico da 2 GCM); previsione puntuale su *horizon years* tipici	TMY 1961-90; 2048-52; 2096-100	RCP 4.5, RCP 8.5	Temperatura media annua e mensile; HDD; CDD	Simulazione dinamica; metodo gradi giorno	TRNSYS	8 soluzioni: U_{wall} = 1 / 0,23; U_{roof} = U_{floor} = 0,65 / 0,19; $U_{W,g}$ = 3,4 / 2,5; $U_{W,f}$ = 5,7 / 2,2; variazione A_f; con/senza schermature	1) Ventilazione naturale 2) Ventilazione meccanica + recuperatori di calore; impianti non specificati (soli fabbisogni)	$Q_{H,nd}$ = -58% / -90% / -99%; $Q_{C,nd}$ = +66% / +233% / +33%; $Q_{H+C,nd}$ = -50% / -66% / -65% / -88%	Le soluzioni passive permettono di ridurre $Q_{H,nd}$ e in modo drastico sul lungo periodo se si aggiunge recupero di calore; l'aumento di $Q_{C,nd}$ è più marcato se aumenta isolamento, ma può essere molto ridotto con schermature; la ventilazione meccanica non riduce molto i fabbisogni, è sufficiente il recupero del calore.

Studi con metodologia di ottimizzazione costo-prestazione									
Generazione dati climatici futuri	**Orizzonte temporale**	**Scenari emissioni**	**Parametri climatici**	**Metodo analisi energetica**	**Strumenti impiegati**	**Soluzioni involucro**	**Soluzioni impianti**	**Risultati**	**Conclusioni**
Morphing da RCM COSMO CLM (CMCC); previsione puntuale su *horizon years* tipici	TRY 2015-2035; 2036-2065; 2066-2095	RCP 4.5 (solo confronto file climatici); RCP 8.5 (anche per simulazione)	Temperatura media mensile; HDD; CDD;	Simulazione dinamica e ottimizzazione; metodo gradi giorno	Design Builder (EnergyPlus)	Attuale: Op = nessun isolamento; W = con/senza schermature	Attuale: caldaia a gas tipo B o C; radiatori ad acqua ad alta T; multi-split	EP_{H+C} D = -8/16% EP_H D = -20/49%; EP_C D = +44/163%; EP_{H+C} C = -19/28%; EP_H C = -34/66%; EP_C C = +64/247%	Necessità raffrescamento in futuro per entrambe zone D e C; in zona C livelli standard efficaci con S/V ridotto, isolamento avanzato più efficace con S/V maggiore; isolamento avanzato sempre costo-ottimale in zona D; le soluzioni costo-ottimali prevedono quasi sempre serramenti standard con schermature; maggiore resilienza e convenienza dell'impianto avanzato a pompa di calore; misure più robuste influenzate dall'utenza se prevedono ventilazione naturale e schermature manuali.
						Standard (DM 26/06/2015): U_{op} D = 0,28÷0,36; U_{op} C = 0,34÷0,42; W = doppi vetri b-e + aria, con/senza schermature	Standard: caldaia a gas a condensazione; radiatori ad acqua a bassa T; multi-split	Soluzioni ottimali con tendenze simili in funzione del CC; mentre rispetto allo stato non riqualificato: EP_{H+C} D = -85/88%; EP_H D = -93/96%; EP_C D = -67/70%	
						Avanzato (2019-21): U_{op} D e C = 0,20÷0,24 W = tripli vetri b-e + aria, con/senza schermature	Avanzato: pompa di calore aria-aria invertibile; multi-split		
Morphing da 14 GCM: WP 95% e WP 50%; previsione puntuale su *horizon years* tipici	IWEC attuale; 2026-2045	RCP 4.5, RCP 8.5	HDD; CH; giorni più caldi estate; giorni più freddi inverno	Simulazione dinamica e ottimizzazione; metodo gradi giorno	WeatherShift; TRNSYS; GenOpt	R_{op} = 2,5÷1 decrescente; W = doppi vetri / tripli vetri, dim. costante	ELE: radiatori elettrici e sistema multi-split	EP_{tot} = -8,5/14% (140 > 122/129); C_G = -1,6/+4,5% (440 > 433/461)	Necessità raffrescamento in futuro; alta resilienza soluzioni HP; incertezza e minore resilienza soluzioni ELE; costi simili; EP_{tot} in ELE quasi tre volte maggiore di EP_{tot} in HP, nonostante nel primo caso diminuisca e nel secondo aumenti.
						R_{op} = 0,5÷0,25 costante; W = doppi vetri, dim. costante	HP: pompa di calore aria-aria invertibile	EP_{tot} = +11% (46 > 51); C_G = +1% (485 > 490)	
Morphing da 14 GCM: WP 95%; previsione puntuale su *horizon years* tipici	IWEC attuale; 2026-2045	RCP 4.5, RCP 8.5	HDD; CH; giorni più caldi estate; giorni più freddi inverno	Simulazione dinamica e EDeSSOpt; metodo gradi giorno	WeatherShift; TRNSYS; GenOpt	R_{op} = 1,72÷1,15 decrescente; W = doppi vetri b-e + argon	Pompa di calore aria-acqua invertibile; fancoil; gas aux; PV policr. + aumento superficie PV	EP_{tot} = -17/18%; C_G = -1,4/2,2%; $Q_{H,nd}$ = -14/19%; $Q_{C,nd}$ = +107/111%	Necessità raffrescamento in futuro; alta resilienza impianti; importanza fotovoltaico per ridurre EP; incertezza e minore resilienza isolamento termico; buona resilienza serramenti.

11. Shen, P., 2017. Impacts of Climate Change on U.S. Building Energy Use by Using Downscaled Hourly Future Weather Data. In *Energy and Buildings*, 134, pp. 61–70.

12. Andrić, I., Pina, A., Ferrão, P., Fournier, J., Lacarrière, B., Le Corre, O., 2017. The Impact of Climate Change on Building Heat Demand in Different Climate Types. In *Energy and Buildings*, 149, pp. 225–34.

13. Sabunas, A., Kanapickas, A., 2017. Estimation of Climate Change Impact on Energy Consumption in a Residential Building in Kaunas, Lithuania, Using HEED Software. In *Energy Procedia*, 128, pp. 92–99.

14. Aijazi, A.N., Brager, G.S., 2018. Understanding Climate Change Impacts on Building Energy Use. In *ASHRAE Journal*, 60, 10, pp. 24–32.

15. Cellura, M., Guarino, F., Longo, S., Tumminia, G., 2018. Climate Change and the Building Sector: Modelling and Energy Implications to an Office Building in Southern Europe. In *Energy for Sustainable Development*, 45, 2018, pp. 46–65.

16. Pérez-Andreu, V., Aparicio-Fernández, C., Martínez-Ibernón, A., Vivancos, J.L., 2018. Impact of Climate Change on Heating and Cooling Energy Demand in a Residential Building in a Mediterranean Climate. In *Energy*, 165, pp. 63–74.

17. Pierangioli, L., 2017. Effetti Dei Cambiamenti Climatici Sulle Prestazioni Energetiche Degli Edifici Residenziali in Clima Mediterraneo. Il Caso Del Patrimonio Residenziale Pubblico INA-Casa e Gescal Della Toscana. Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Firenze.

18. Ferrara, M., Fabrizio, E., 2017. Cost Optimal NZEBs in Future Climate Scenarios. In *Energy Procedia*, 122, pp. 877–82.

19. Bilardo, M., Ferrara, M., Fabrizio, E., 2019. Resilient Optimal Design of Multi-Family Buildings in Future Climate Scenarios. In *E3S Web of Conferences*, 111, 06006. Atto di congresso *CLIMA 2019*, Bucharest, Romania.

5. Effetti del cambiamento climatico in area torinese

Applicazione a un caso studio locale

In quest'ultimo capitolo si intende analizzare gli effetti del cambiamento climatico sulle prestazioni energetiche degli edifici residenziali in area torinese, applicando alcune delle metodologie di valutazione e delle strategie di intervento trattate precedentemente.

L'ormai improrogabile adeguamento del patrimonio costruito esistente al clima attuale e agli scenari previsti per il futuro, oltre che ai requisiti di efficienza energetica e di mitigazione delle emissioni di gas serra, pone come obiettivo fondamentale della presente ricerca la dimostrazione della necessità di un controllo sempre più attivo e flessibile delle condizioni termiche degli ambienti interni in ambito residenziale, soprattutto dal punto di vista del raffrescamento estivo. Come sostenuto finora e largamente evidente dalla revisione della letteratura scientifica sul tema, infatti, per effetto delle crescenti temperature tale fabbisogno aumenterà progressivamente a discapito del riscaldamento invernale, peraltro già più facilmente riducibile attraverso soluzioni passive di isolamento termico.

Il primo passaggio essenziale è la selezione di un caso studio di cui valutare le prestazioni energetiche nei diversi scenari climatici. A tal fine, ci si è basati sugli esiti del progetto europeo TABULA[1] (Typology Approach for BUiLding stock energy Assessment), finalizzato alla «creazione di una struttura armonizzata delle tipologie edilizie europee»[2], e condotto, per l'Italia, dal Gruppo di ricerca

[1] Progetto TABULA, accessibile online al sito https://episcope.eu/iee-project/tabula/.

[2] Sintesi del Progetto TABULA per l'Italia, accessibile online al sito ufficiale del Politecnico di Torino https://areeweb.polito.it/ricerca/episcope/tabula/.

TEBE del Dipartimento DENERG del Politecnico di Torino, che ha definito la *Tipologia Edilizia Nazionale*.[3] Si tratta di una classificazione del patrimonio costruito in edifici tipo, ciascuno rappresentativo di un'epoca di costruzione e di una dimensione edilizia e caratteristici, inizialmente, della Regione Piemonte, e, per estensione, della zona climatica E, a sua volta ipotizzata come "area climatica media" italiana, poiché comprendente oltre la metà dei comuni nazionali. Per la città di Torino in oggetto, è stato quindi coerente considerare uno di tali casi-tipo, specificamente l'edificio multifamiliare di grandi dimensioni, definito "blocco di appartamenti", della "classe di epoca di costruzione" 4, dal 1946 al 1960. Al capitolo precedente, è già stata illustrata la frequenza di tale approccio per tipi in questo campo di indagine, funzionale a rendere i risultati energetici replicabili e validi alla scala macroscopica di un settore o dell'intero stock residenziale, senza focalizzarsi su un particolare caso reale.

A questo punto, la seconda sezione del capitolo riguarda i dati climatici attuali e previsti per il futuro nel territorio torinese, e si basa sul confronto tra due diversi anni tipo forniti dal database online del software EnergyPlus®, in formato EPW, come introdotto in precedenza, destinato alla successiva simulazione energetica dinamica: il già citato file IWEC (International Weather for Energy Calculations) dell'ASHRAE e il file ad opera italiana IGDG (Italian Climatic data collection "Giovanni De Giorgio")[4], entrambi relativi alle misurazioni della stazione meteorologica dell'aeroporto di Torino-Caselle (WMO 16059), ma basati rispettivamente sul periodo 1982-1999 (IWEC) e 1951-1970 (IGDG).

Per la generazione dei profili climatici futuri è stato impiegato l'applicativo gratuito CCWorldWeatherGen, che, come già presentato al capitolo 3, utilizza

[3] Corrado, V., Ballarini, I., Corgnati, S.P., 2014. *Building Typology Brochure – Italy. Fascicolo Sulla Tipologia Edilizia Italiana*, Politecnico di Torino - DENERG, Gruppo di ricerca TEBE, Torino.

[4] Dati climatici per 66 località italiane elaborati dal Prof. L. Mazzarella del Politecnico di Milano e dedicati al nome di Giovanni de Giorgio.

il metodo del morphing (Belcher et al., 2005)[5], lo scenario emissivo A2 (SRES) e il modello climatico globale HadCM3.

La trattazione prosegue quindi con la revisione delle metodologie e degli strumenti destinati all'analisi energetica dell'edificio tipo selezionato, sintetizzati dall'ormai nota simulazione energetica dinamica, svolta in questa occasione tramite il codice di calcolo EnergyPlus®, grazie a una delle sue interfacce grafiche, OpenStudio®[6], per la definizione delle componenti termo-fisiche, e al plug-in per il software SketchUp®, per la modellazione geometrica tridimensionale.

Il paragrafo conclusivo è il contributo principale della presente tesi, ossia la valutazione di diverse strategie di intervento sulla tipologia edilizia multifamiliare considerata e delle relative performance energetiche a fronte degli scenari di cambiamento climatico previsti a Torino: il crescente stato di discomfort termico rilevato in estate negli ambienti interni dell'edificio, per effetto sia del riscaldamento globale sia della riqualificazione dell'involucro edilizio, dimostra la necessità di implementare un impianto di raffrescamento attivo, di cui vengono ulteriormente indagate le implicazioni progettuali, i consumi energetici e le emissioni di gas serra, estendendone i risultati anche alla scala del patrimonio costruito esistente.

[5] Belcher, S.E., et al., Constructing Design Weather Data for Future Climates, op. cit.
[6] OpenStudio®, accessibile online al sito https://www.openstudio.net/.

Caso studio

Come anticipato, per la selezione del caso studio si è assunto l'approccio tipologico elaborato dalle ricerche italiane per il progetto europeo TABULA, sviluppato dal 2009 al 2012.

In questo contesto, le tipologie edilizie europee sono state preliminarmente classificate in quattro "classi di dimensione edilizia", comuni a tutti i Paesi del programma: "casa monofamiliare", "casa a schiera", "edificio multifamiliare" e "blocco di appartamenti"; invece, le "zone climatiche di riferimento" e le "classi di epoca di costruzione" sono state lasciate variabili a seconda del Paese considerato. La definizione dei campioni edilizi delle rispettive categorie può svolgersi secondo indagini empiriche e/o statistiche, sia per quanto riguarda le caratteristiche dimensionali e geometriche degli edifici, sia dal punto di vista degli elementi costruttivi e impiantistici.

La citata *Tipologia Edilizia Nazionale* considera come "area climatica media" la zona E, caratterizzata da un intervallo compreso tra 2100 e 3000 gradi giorno (su base 20°C), cui appartiene oltre il 50% dei comuni italiani e il 74% di quelli della Regione Piemonte, territorio su cui è stata effettivamente condotta l'analisi; è stata codificata in entrambi i modi empirico e statistico per le dimensioni geometriche dei campioni, tramite edifici reali o archetipi astratti, mentre soltanto su base empirica per gli aspetti costruttivi, con caratteristiche tecnologiche desunte dall'esperienza.

A partire dai dati del censimento nazionale del 2001 sul patrimonio edilizio residenziale, di cui le Figure 5.1-5.2 riportano quelli relativi alla Regione Piemonte, sono invece state redatte le otto "classi di epoca di costruzione", consentendo di costruire la *Matrice della Tipologia Edilizia* italiana in Figura 5.3.[7] Data la consistenza numerica degli edifici multifamiliari nelle epoche dal secondo Dopoguerra agli anni '70 e la loro necessità di efficientamento energetico, dovuta alle scarse prestazioni di involucri edilizi realizzati prima

[7] Corrado et al., 2014, *op. cit.*, p. 19.

dell'emanazione della Legge n.373 del 1976 sull'isolamento termico, nella presente tesi è stato selezionato il "blocco di appartamenti" dell'epoca di costruzione 4, dal 1946 al 1960; pur trattandosi dell'edificio reale in Figura 5.4, situato nel comune di Moncalieri (TO), è stato considerato rappresentativo della sua categoria.

I disegni in Figura 5.5 e la Tabella 5.1 presentano le caratteristiche compositive, distributive, dimensionali e geometriche di tale edificio tipo: la tipologia edilizia è in linea e il fabbricato è orientato sull'asse N-E/S-O, con dimensioni planimetriche esterne lorde pari a 37,45m x 12,60m e una conseguente superficie lorda per piano di circa 472m^2, ripetuta regolarmente per quattro piani fuori terra di residenze, di altezza di interpiano pari a 3,35m e interna netta di 3,10m, un piano seminterrato ad uso cantina e un sottotetto non abitabile, per un'altezza complessiva di gronda di 14,60m; è composto da 24 unità abitative uguali di superficie lorda pari a circa 72m^2, articolate in sei appartamenti per piano, serviti da tre corpi scala di distribuzione verticale; la Tabella 5.1 sintetizza inoltre le diverse ripartizioni ed estensioni delle classi di unità tecnologiche dell'edificio.

I valori reali illustrati sono poi completati dalle caratteristiche costruttive, termo-fisiche e impiantistiche questa volta tipiche dell'epoca di costruzione e della tipologia edilizia considerata, organizzate in Tabella 5.2 per elementi tecnici: la struttura portante è in calcestruzzo armato su sistema puntuale, le pareti perimetrali di tamponamento sono realizzate in muratura a cassa-vuota in mattoni forati in laterizio, i solai in latero-cemento, la copertura a falde in legno e manto in laterizio e i serramenti esterni sono formati da un vetro singolo e un telaio in legno; l'unico impianto termico è di riscaldamento, con un sistema di generazione a caldaia a gas naturale, di distribuzione idronica ad alta temperatura e centralizzata a colonne montanti verticali, e con radiatori ad acqua in ghisa quali terminali di emissione in ambiente.

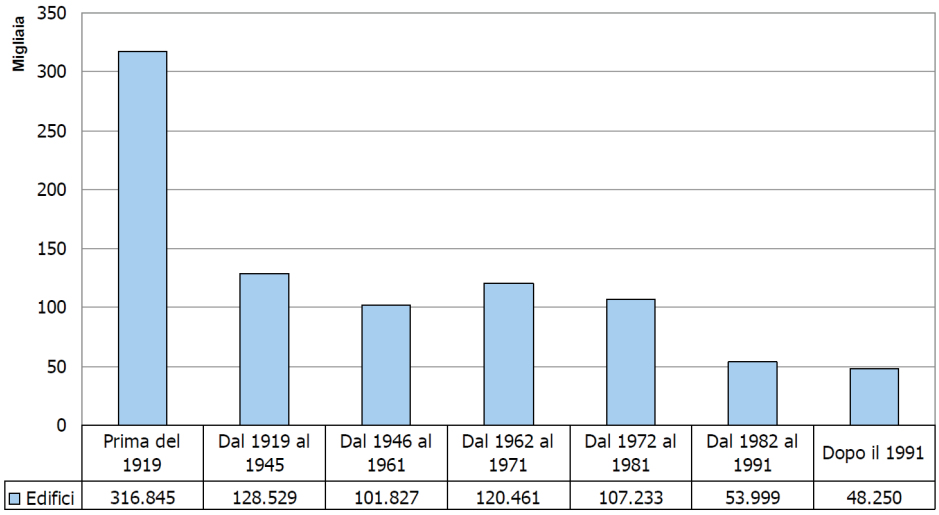


Figura 5.1

Elaborazione dati ISTAT. Numero di edifici ad uso abitativo per epoca di costruzione in Piemonte (dati censimento 2001). Fonte: Corrado et al., *op. cit.*, p. 9.

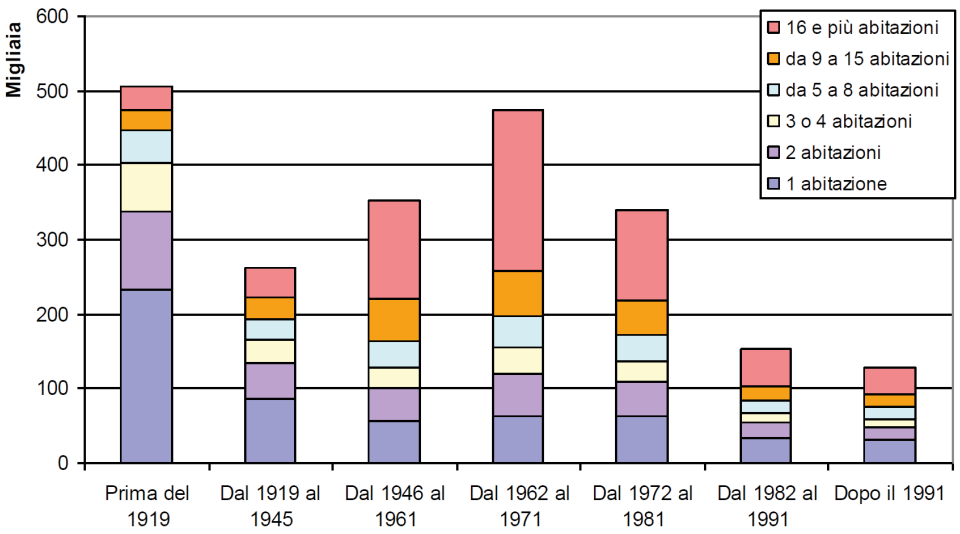


Figura 5.2

Elaborazione dati ISTAT. Abitazioni in edifici ad uso abitativo per epoca di costruzione e per numero di abitazioni nell'edificio, in Piemonte (dati censimento 2001). Fonte: Corrado et al., *op. cit.*, p. 10.

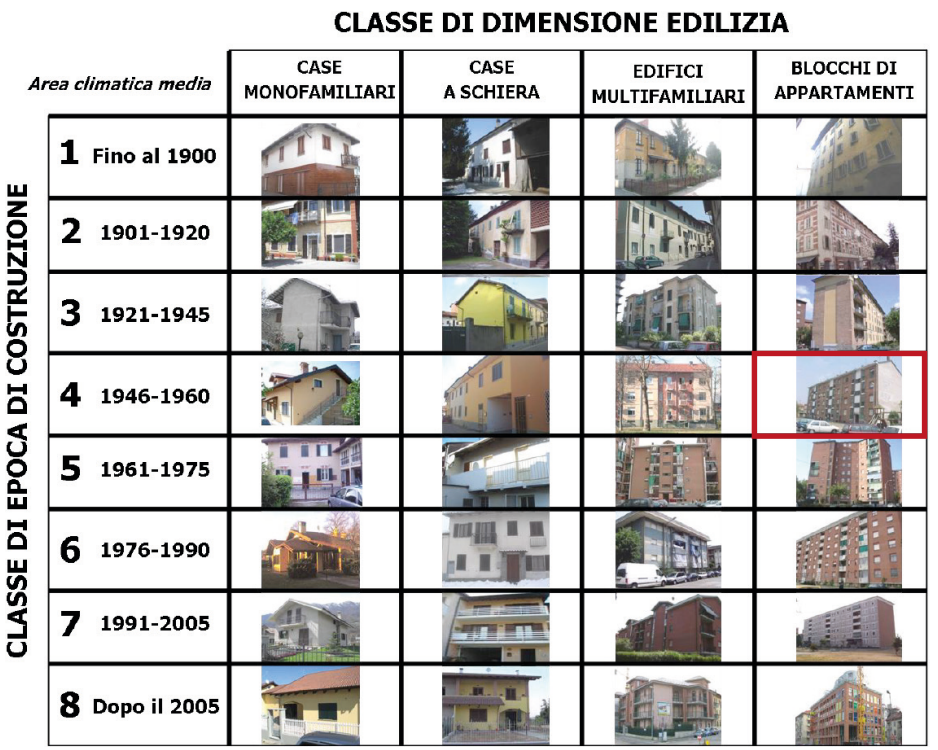


Figura 5.3
Matrice della Tipologia Edilizia italiana con l'illustrazione degli edifici tipo; in evidenza il blocco di appartamenti del periodo 1946-1960 selezionato come caso studio. Fonte: Corrado et al., *op. cit.*, p. 19.

Figura 5.4
Vista del fronte N-O dell'edificio tipo selezionato, realmente esistente e situato nel comune di Moncalieri (TO), ma assunto come rappresentativo dell'epoca di costruzione 1946-1960 per la zona climatica E.

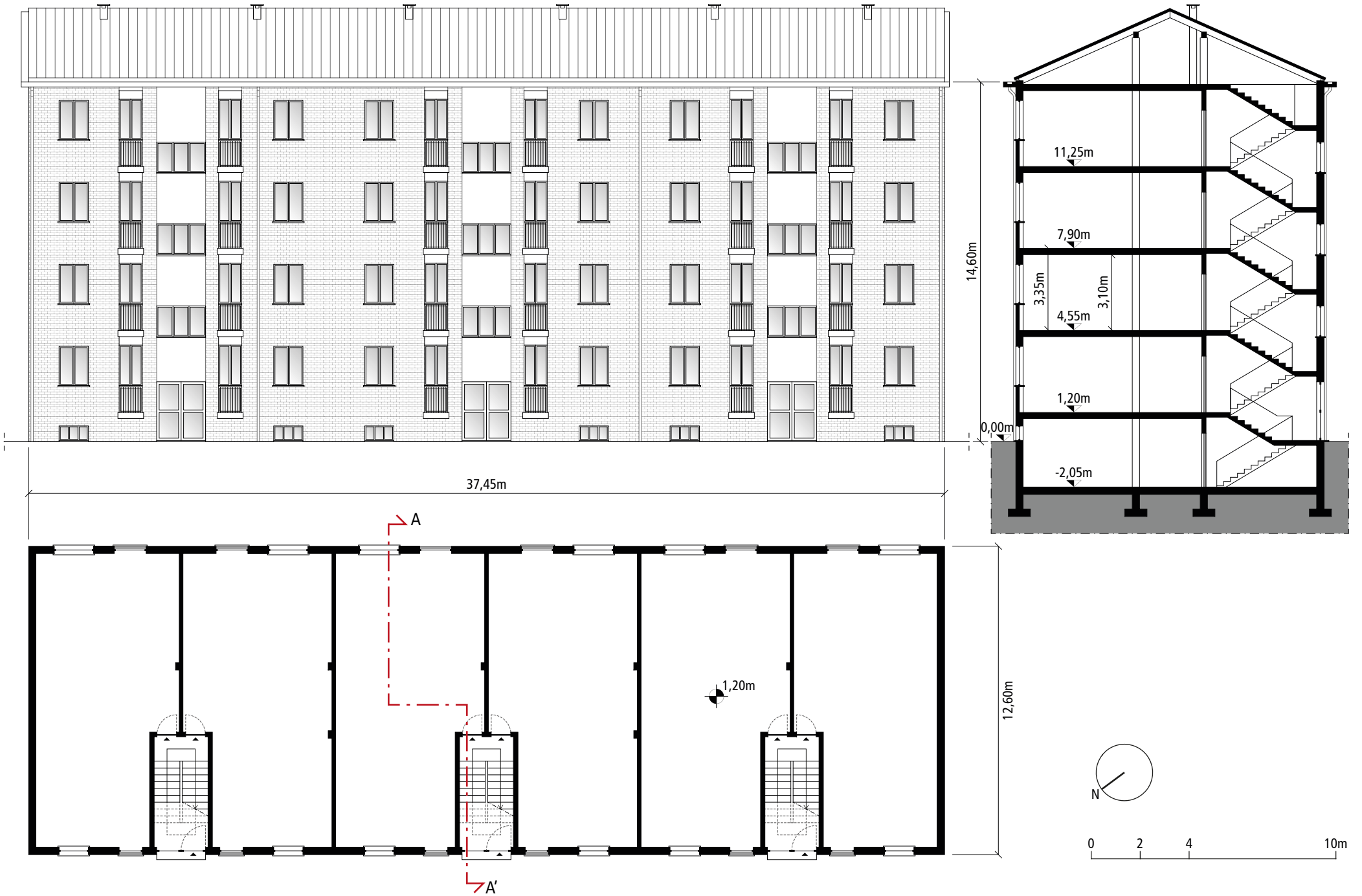


Figura 5.5
Pianta del piano terra, prospetto N-O e sezione trasversale AA' dell'edificio tipo selezionato - scala 1:200.

Geometria edificio		
parametro	valore	u
Larghezza esterna lorda	12,60	m
Lughezza esterna lorda	37,45	m
Altezza interpiano	3,35	m
Altezza interna netta	3,10	m
Altezza edificio (gronda)	14,60	m
Superficie lorda piano	471,87	m^2
Superficie lorda unità abitativa	72,19	m^2
Superficie lorda climatizzata	1732,56	m^2
Superficie lorda non climatizzata	1098,66	m^2
Superficie lorda totale	2831,22	m^2
Volume lordo climatizzato	5804,08	m^3
Volume lordo non climatizzato	2819,35	m^3
Volume lordo totale	8623,42	m^3

Geometria unità tecnologiche		
classe unità tecnologiche	unità tecnologica	A [m^2]
Chiusure spazio climatizzato verso esterno	Chiusure verticali opache N-O	314,84
	Chiusure verticali trasparenti N-O	83,68
	Chiusure verticali opache N-E	168,84
	Chiusure verticali opache S-E	382,79
	Chiusure verticali trasparenti S-E	119,04
	Chiusure verticali opache S-O	168,84
Partizioni interne spazio climatizzato verso spazio non climatizzato	Partizione interna orizzontale superiore verso sottotetto	433,14
	Partizione interna orizzontale inferiore verso seminterrato	433,14
	Partizioni interne verticali verso vani scala	168,44
Chiusure spazio non climatizzato verso esterno e terreno	Chiusura inclinata superiore sottotetto verso esterno	522,40
	Chiusure verticali opache sottotetto verso esterno	37,80
	Chiusura orizzontale inferiore seminterrato verso terreno	471,87
	Chiusure verticali opache seminterrato verso terreno	215,22
	Chiusure verticali opache seminterrato verso esterno	120,12
	Chiusure verticali opache vani scala verso esterno	95,49
Partizioni interne spazio climatizzato (adiabatiche)	Partizioni interne orizzontali interpiano	1415,61
	Partizioni interne verticali tra unità abitative	562,46

Tecnologie costruttive e caratteristiche termo-fisiche elementi tecnici			
elemento tecnico	tecnologia costruttiva	s [m]	U [W/m^{2}K]
Pareti perimetrali	Muratura a cassa-vuota in mattoni forati in laterizio; finitura ad intonaco	0,30	1,15
Solaio superiore verso sottotetto	Solaio in latero-cemento; estradosso non pavimentato; finitura intradosso ad intonaco	0,25	1,65
Solaio inferiore verso seminterrato	Solaio in latero-cemento; estradosso pavimentato; finitura intradosso ad intonaco	0,26	1,30
Pareti interne verso vani scala	Muratura in calcestruzzo; finitura ad intonaco	0,18	2,60
Copertura	Tetto a falde con struttura in legno e manto in laterizio	0,12	1,80
Solai interpiano	Solaio in latero-cemento; estradosso pavimentato; finitura intradosso ad intonaco	0,26	1,30
Solaio a terra seminterrato	Solaio in calcestruzzo armato; estradosso non pavimentato	0,30	2,60
Pareti interne tra unità abitative	Muratura in mattoni forati in laterizio; finitura ad intonaco	0,12	1,75
elemento tecnico	tecnologia costruttiva	$g_{gl,n}$ [-]	U_w [W/m^{2}K]
Serramenti esterni	Serramento a vetro singolo e telaio in legno	0,85	4,90

Tecnologie impiantistiche di climatizzazione			
uso finale	tecnologia impiantistica	$\eta_{H,gn}$ [-]	$\eta_{H,d}$ [-]
Riscaldamento	Generazione: caldaia standard a gas naturale con bruciatore ad aria soffiata	0,85	0,83
	Distribuzione: idronica ad alta T e centralizzata a colonne montanti verticali		
	Terminali emissione: radiatori ad acqua		

Tabelle 5.1-5.2

A sinistra: caratteristiche dimensionali e geometriche dell'edificio tipo selezionato; valori reali edificio reale. Sopra: caratteristiche tecnologico-costruttive, termo-fisiche e impiantistiche dell'edificio tipo selezionato; valori scelti secondo l'esperienza, dalle ricerche del Progetto TABULA.

Dati climatici attuali e futuri

È stato introdotto che per la città di Torino sono state confrontate due versioni di anni tipo per valutare le condizioni climatiche attuali e generarne l'evoluzione futura. Si tratta, come visto in precedenza, di file in formato EPW forniti dal database online di EnergyPlus® e destinati alla successiva simulazione energetica dinamica per le prestazioni dell'edificio, formulati quindi su base oraria per tutti i parametri climatici fondamentali, selezionati statisticamente sulle serie storiche di misurazioni disponibili per la località (v. cap.3). Questi record climatici rappresentano le condizioni al contorno dell'ambiente esterno e diventano decisivi, insieme alle caratteristiche termo-fisiche dell'edificio, nel determinare le performance energetiche.

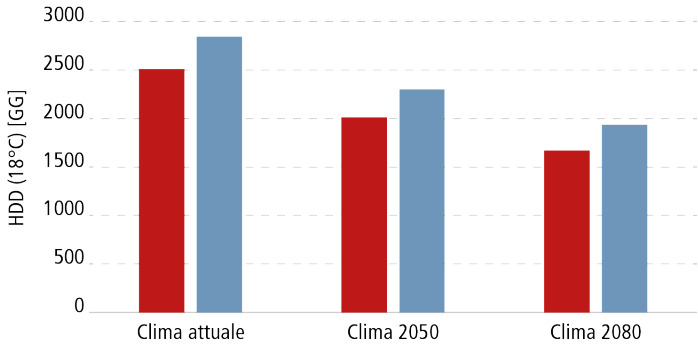
Nella presente ricerca sono stati considerati il file IWEC dell'ASHRAE e il file IGDG "De Giorgio", i cui dati derivano per entrambi dalla stazione meteorologica dell'aeroporto di Torino-Caselle (WMO 16059), ma differiscono per il periodo di riferimento, ossia 1982-1999 per il primo e 1951-1970 per il secondo; tale distinzione risulta fondamentale per i valori delle variabili climatiche ed è evidente già allo stato attuale in Tabella 5.3 e nelle Figure 5.6-5.8, suggerendo, pur qualitativamente, alcuni effetti del cambiamento climatico a trent'anni di distanza tra i due database.

La previsione dei dati futuri, ampiamente descritta nel capitolo 3, è qui avvenuta tramite il software CCWorldWeatherGen, un applicativo su foglio di calcolo Microsoft® Excel che, ricevendo in input un file climatico attuale, permette di scegliere quale *horizon year* simulare tra 2020, 2050 e 2080; in questo caso sono stati generati gli anni tipo futuri 2050 e 2080 di entrambi i file climatici attuali, confrontati nelle Figure 5.6-5.10.

Un aspetto subito rilevabile è che, dalla situazione iniziale al 2080, la diminuzione dei gradi giorno di riscaldamento (HDD) e l'aumento degli opposti di raffrescamento (CDD) sono tali da provocare un cambio di zona climatica per la città di Torino, da 4A a 3A stando alla classificazione ASHRAE.

Confronto file climatici attuali e futuri

Parametro climatico	Clima attuale	Clima 2050	Clima 2080	Clima attuale	Clima 2050	Clima 2080
	File IWEC			File IGDG		
HDD (18°C)	2506	2010	1668	2842	2298	1934
CDD (10°C)	1648	2289	2815	1433	2042	2555
Zona climatica (ASHRAE)	4A	4A	3A	4A	4A	3A



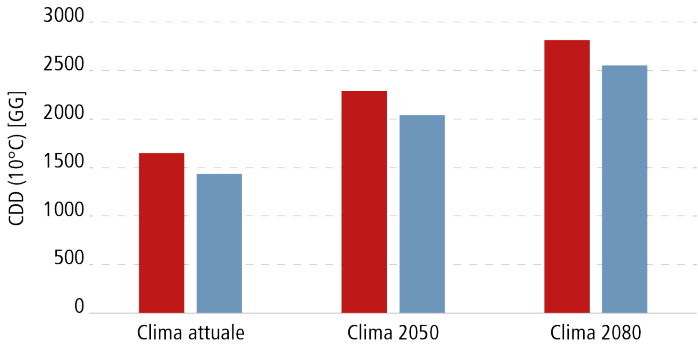


Tabella 5.3 - Figure 5.6-5.7

Confronto tra i parametri climatici degli HDD (18°C) e dei CDD (10°C) dei due diversi file climatici IWEC e IGDG di Torino (WMO 16059), in condizioni attuali e negli scenari futuri generati tramite CCWorldWeatherGen.

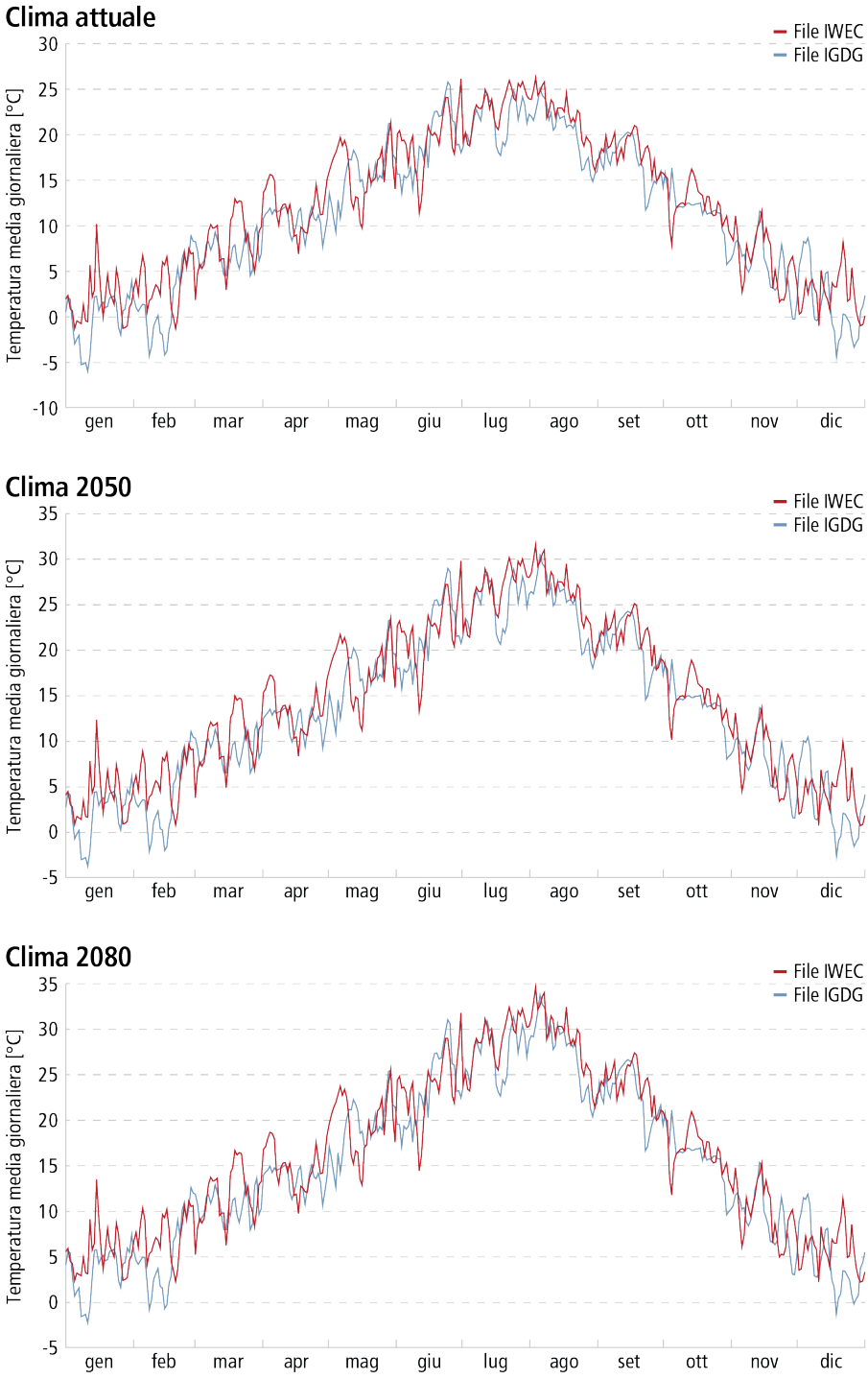


Figure 5.8-5.10

Confronto tra le temperature medie giornaliere dei due file climatici IWEC e IGDG di Torino (WMO 16059), in condizioni attuali e negli scenari futuri generati tramite CCWorldWeatherGen.

Metodi e strumenti di valutazione

Per quanto concerne il calcolo delle prestazioni energetiche dell'edificio tipo in oggetto, si è anticipato l'impiego della simulazione energetica dinamica, metodologia che, come noto, fornisce risultati realistici e consente la variazione dei diversi parametri di input e condizioni al contorno in modo rapido, al fine di confrontare alternative progettuali o prettamente climatiche.

La prima fase propedeutica a tale processo è la definizione delle caratteristiche dimensionali, geometriche e termo-fisiche dell'edificio e dipende dagli strumenti specifici utilizzati: sebbene il codice di calcolo vero e proprio EnergyPlus® supporti l'immissione diretta dei suddetti valori, è di complessa gestione per i progettisti poiché in linguaggio di programmazione informatica, ed è stato quindi necessario l'appoggio all'interfaccia grafica *user friendly* OpenStudio®, sviluppata dai medesimi creatori di EnergyPlus®, il National Renewable Energy Laboratory (NREL) negli Stati Uniti.

OpenStudio® permette da un lato la modellazione tridimensionale degli spazi e delle zone termiche dell'edificio grazie al plug-in per SketchUp®, dal punto di vista geometrico e di alcune prime indicazioni energetiche, dall'altro, nella propria interfaccia effettiva, l'attribuzione di tutte le proprietà climatiche, tecnologico-costruttive, termo-fisiche, impiantistiche, dei profili di gestione degli stessi impianti o dei carichi interni, per poi avviare il processo di simulazione sfruttando EnergyPlus®.

Per la modellazione geometrica, l'edificio tipo è stato semplificato come in Figura 5.11, accorpando le unità abitative centrali con le medesime condizioni di esposizione e confini di adiacenza, trasformando il piano seminterrato in completamente interrato e riunendo le superfici disperdenti vetrate in un unico serramento per lato dell'appartamento; sono quindi stati individuati gli spazi climatizzati delle residenze e quelli non climatizzati dei vani scala, dell'interrato, e del sottotetto.

Dal punto di vista climatico, sono stati considerati come *Weather Files* gli anni tipo IWEC poiché di elaborazione più recente, alternando la versione attuale e quelle future al 2050 e 2080, generate come descritto in precedenza.
Altro step essenziale è la corretta definizione degli *Schedules*, ossia i vari profili di occupazione, di attività degli occupanti, di temperatura di set point e di funzionamento degli impianti, di ricambio dell'aria per ventilazione o infiltrazione, con diverse regole di pianificazione nel periodo di calcolo desiderato. Dopo aver impostato le caratteristiche degli elementi costruttivi (sezione *Construction*), i carichi interni (*Loads*) e le tipologie di spazi (*Space Types*), si vanno quindi ad attribuire tutte le suddette configurazioni preliminari agli effettivi spazi dell'edificio (*Spaces*) e alle relative zone termiche (*Thermal Zones*), spesso coincidenti e, per il caso studio in oggetto, illustrate nelle Figure 5.11-5.12.
A questo punto il modello termo-energetico completo permette lo svolgimento della simulazione vera e propria, a cui, oltre i valori dei fabbisogni o dei consumi energetici a seconda dell'analisi, è possibile richiedere specifici *Output* dei parametri dell'ambiente interno, per confrontare i risultati di diversi scenari climatici o progettuali, come nel caso studio della presente tesi.

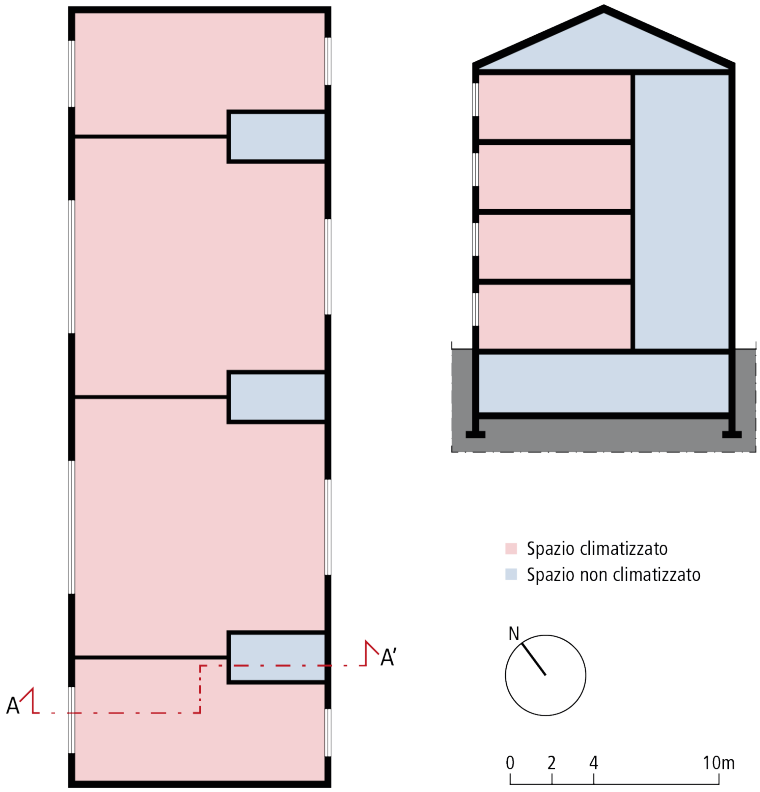


Figura 5.11
Semplificazione dell'edificio tipo per la modellazione termo-energetica destinata alla simulazione dinamica.

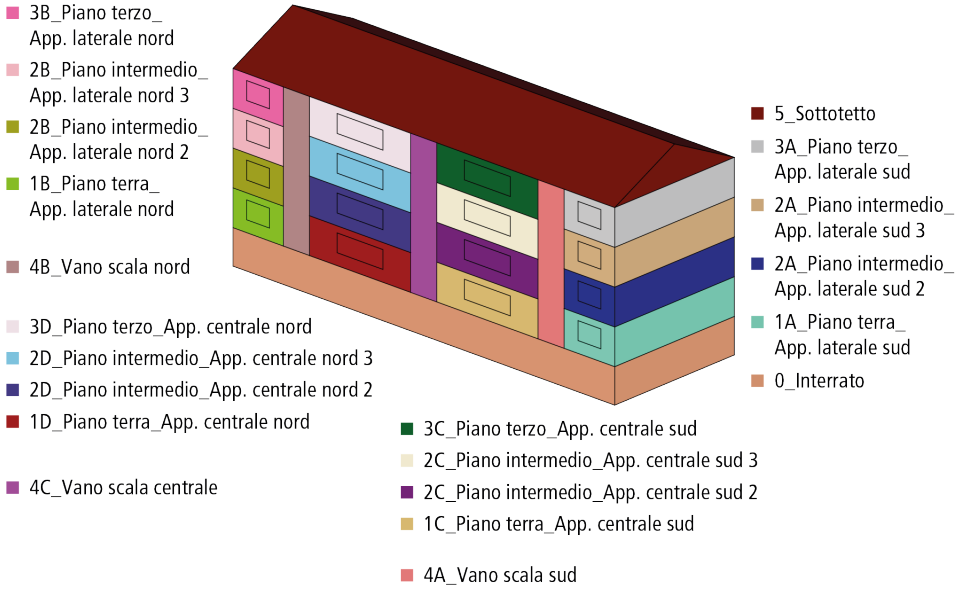


Figura 5.12
Suddivisione del modello termo-energetico in *Thermal Zones* in ambiente SketchUp®-OpenStudio®.

Strategie di intervento e risultati

Vengono a questo punto presentati i risultati delle simulazioni energetiche dinamiche relative a diversi scenari di intervento sull'edificio tipo, valutando gli effetti combinati del cambiamento climatico e di tali strategie al variare delle condizioni al contorno previste in futuro.

La tesi da dimostrare, come accennato, è la necessità di implementare un sistema di raffrescamento attivo per controllare le condizioni di comfort dell'ambiente interno in estate, previste in peggioramento a causa dell'aumento globale delle temperature, di sempre più frequenti ondate di calore e influenzate dal fenomeno dell'isola di calore urbana in un contesto come quello torinese.

L'analisi inizia dallo stato di fatto dell'edificio tipo, definito "Scenario 0" e in cui è stato calcolato il solo fabbisogno di riscaldamento e valutato il comfort termico estivo negli orizzonti temporali attuale, 2050, 2080; il riferimento per il secondo aspetto è rappresentato dai criteri del modello del comfort adattivo stabiliti dalla norma UNI EN 16798-1:2019.[8]

Alcune impostazioni prefissate rimangono inalterate negli scenari successivi descritti dettagliatamente nel seguito, per quanto riguarda:

- la ventilazione naturale/infiltrazione dall'involucro, dal profilo costante e con un ricambio d'aria pari a 0,6vol/h per gli spazi climatizzati e 0,4vol/h per quelli non climatizzati;
- il carico termico legato agli apporti interni, inclusivo di occupanti, illuminazione e usi elettrici, presente solo negli spazi climatizzati e costante, pari a 4W/m^2;
- la temperatura di set point dell'impianto di riscaldamento, costante e pari a 26°C.

[8] UNI EN 16798-1:2019. *Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica*.

Scenario 0: stato di fatto

La Tabella 5.4 riporta le caratteristiche costruttive e termo-fisiche degli elementi tecnici costituenti l'edificio tipo, riadattando alcuni parametri rispetto alla configurazione originaria stabilita dal Progetto TABULA illustrata nella precedente Tabella 5.2; la modifica più rilevante riguarda il coefficiente di trasmissione solare dei serramenti vetrati esterni, che da g_{gl} = 0,85 diventa g_{gl+sh} = 0,47, inclusivo di una schermatura solare non considerata in TABULA.

Le successive Tabella 5.5 e Figura 5.13 mostrano i risultati energetici di tali dati di input al variare degli anni tipo climatici futuri: come detto, i valori sono relativi al solo fabbisogno di riscaldamento. La stima attuale di 81,60kWh/m^2 diminuisce a 62,44kWh/m^2 (-23%) nell'orizzonte 2050, e a 51,68kWh/m^2 (-37%) nel 2080, confermando le prevedibili tendenze legate al cambiamento climatico.

Nelle pagine seguenti, le Figure 5.14-5.19 considerano le condizioni di comfort termico nel periodo 1 maggio-30 settembre, con i valori maggiori di temperatura esterna nel corso dell'anno. I grafici a sinistra esprimono la temperatura operativa interna, combinazione della temperatura dell'aria interna e della Temperatura Media Radiante delle superfici rivolte verso l'ambiente interno, in funzione della *Running Outdoor Mean Temperature*, una media pesata delle temperature medie giornaliere della settimana precedente, indice del graduale adattamento del benessere psico-fisico umano alle condizioni climatiche esterne. I grafici a destra mostrano invece l'evoluzione delle medesime temperature operative nel periodo di riferimento.
I risultati di tali valutazioni, al variare degli anni tipo futuri, dimostrano il progressivo peggioramento delle condizioni di comfort, fino a temperature operative di oltre 43°C e l'80% delle ore complessive come non confortevole al 2080, rispetto ai limiti della Categoria II, stabiliti da normativa come:

$$\Theta_o = 0{,}33\ \Theta_{rm} + 18{,}8 + 3 \qquad [°C] \tag{5.1}$$

Scenario 0: stato di fatto

Involucro		
elemento tecnico	tecnologia costruttiva	U [W/m^{2}K]
Pareti perimetrali	Muratura a cassa-vuota in mattoni forati in laterizio	1,15
Solaio superiore verso sottotetto	Solaio in latero-cemento	1,53
Solaio inferiore verso interrato	Solaio in latero-cemento	1,38
Pareti interne verso vani scala	Muratura in calcestruzzo	2,87
Serramenti	Vetro singolo e telaio in legno; g_{gl+sh} = 0,47	4,90
Copertura	Struttura in legno e manto in laterizio	1,97
Solai interpiano	Solaio in latero-cemento	1,27
Solaio a terra	Solaio in calcestruzzo armato	2,60
Pareti interne tra unità abitative	Muratura in mattoni forati in laterizio	1,90

Infiltrazioni/ventilazione	
spazi climatizzati	0,6 vol/h
spazi non climatizzati	0,4 vol/h

Apporti interni
4 W/m^2

T set point riscaldamento	
20 °C	costante

Dati climatici	$Q_{H,nd}$ [MJ/m^2]	$Q_{H,nd}$ [kWh/m^2]
Clima attuale	293,76	81,60
Clima 2050	224,79	62,44
Clima 2080	186,06	51,68

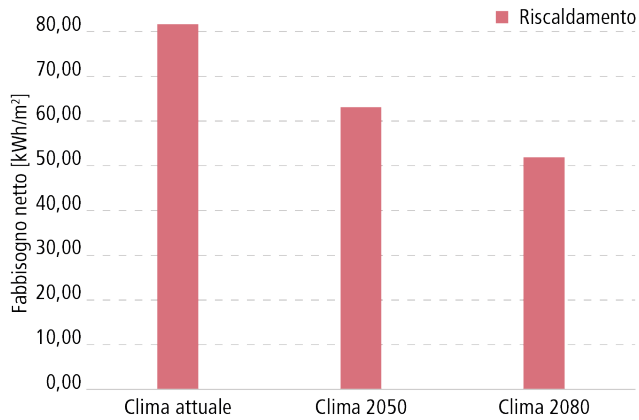


Tabelle 5.4-5.5 - Figura 5.13

In alto: dati di input relativi allo stato di fatto dell'edificio tipo.
Al centro e in basso: valori di output da simulazione dinamica; fabbisogno di riscaldamento attuale e futuro.

Rispetto a cat.II:

Rispetto a cat.II:

Rispetto a cat.II:

Figure 5.14-5.16

Distribuzione delle 3672 ore del periodo 1 maggio-30 settembre in funzione della *running outdoor mean temperature*, della temperatura operativa interna e rispetto ai limiti di comfort termico definiti dalla norma UNI EN 16798-1:2019; valori attuali e futuri relativi allo stato di fatto dell'edificio tipo.

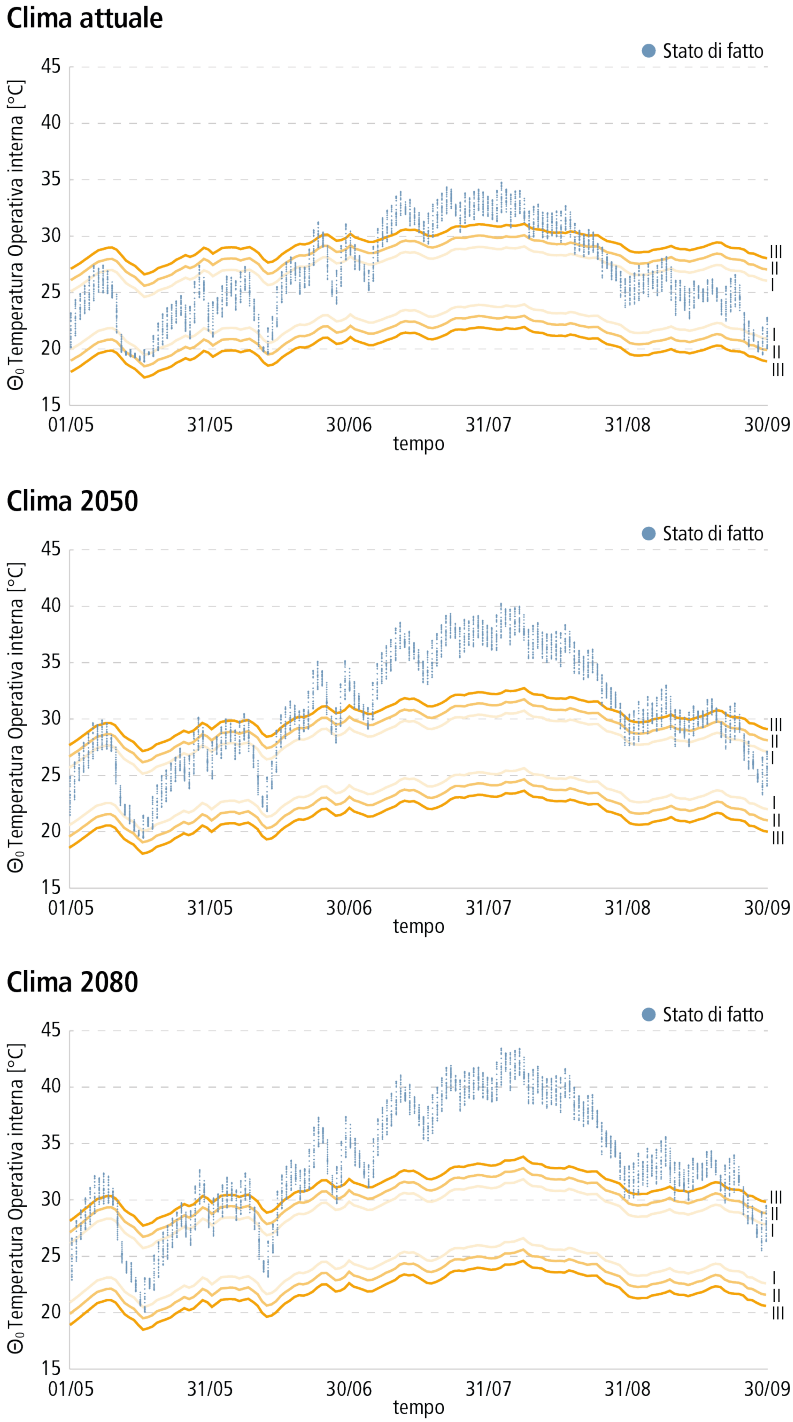


Figure 5.17-5.19

Distribuzione nel tempo delle 3672 ore del periodo 1 maggio-30 settembre in funzione della temperatura operativa interna e rispetto ai limiti di comfort termico definiti dalla norma UNI EN 16798-1:2019; valori attuali e futuri relativi allo stato di fatto dell'edificio tipo.

Scenario 1: edificio riqualificato

Lo "Scenario 1" si riferisce a un pacchetto di interventi di riqualificazione dell'edificio tipo finalizzati a raggiungere i requisiti del cosiddetto "edificio di riferimento", come sanciti dall'Appendice A[9] dell'Allegato 1 al D.M. 26/06/2015[10], noto comunemente appunto come "Requisiti Minimi".
Dal punto di vista costruttivo, tali livelli di prestazione energetica sono stati ipotizzati ottenibili tramite l'aggiunta di opportuni spessori di materiale isolante, per le componenti opache, e la sostituzione dei serramenti a vetro singolo originari con altri provvisti di vetro-camera e telaio a taglio termico; i dati di input sono riportati in Tabella 5.6.

Anche in questo scenario l'unico impianto termico previsto è di riscaldamento, il cui fabbisogno attuale e futuro è sintetizzato in Tabella 5.7 e in Figura 5.20: la stima attuale di 37,09kWh/m^2 corrisponde a una riduzione del 55% rispetto allo stato di fatto grazie all'isolamento termico, e diminuisce a 28,14kWh/m^2 (-24%) nell'orizzonte 2050, e a 22,68kWh/m^2 (-39%) nel 2080, confermando le tendenze precedenti nel medio e lungo termine.

Analogamente allo "Scenario 0", nelle successive Figure 5.21-5.23 sono state valutate le condizioni di comfort rispetto al cambiamento climatico e all'intervento di riqualificazione: prevedibilmente, il risultato è un ulteriore peggioramento delle stesse, a causa del noto impatto dell'isolamento termico sulle prestazioni estive dell'edificio, che riduce le dispersioni anche quando sarebbero perdite utili; se i valori massimi di temperatura operativa sono uguali ai precedenti, aumentano considerevolmente le ore di discomfort, fino all'85% del totale rispetto al limite di Categoria II.

[9] Decreto Interministeriale 26/06/2015 - Allegato 1 - Appendice A. *Descrizione dell'edificio di riferimento e parametri di verifica*.
[10] Decreto Interministeriale 26/06/2015. *Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*.

Scenario 1: edificio riqualificato

Involucro		
elemento tecnico	tecnologia costruttiva	U [W/m^{2}K]
Pareti perimetrali	Stato di fatto + isolamento termico a cappotto esterno	0,26
Solaio superiore verso sottotetto	Stato di fatto + isolamento termico estradosso	0,22
Solaio inferiore verso interrato	Stato di fatto + isolamento termico intradosso	0,26
Pareti interne verso vani scala	Stato di fatto + isolamento termico simmetrico	0,26
Serramenti	Vetro-camera; $g_{gl+sh} = 0,40$	1,40
Copertura	Stato di fatto	1,97
Solai interpiano	Stato di fatto + isolamento termico intradosso	0,80
Solaio a terra	Solaio in calcestruzzo armato	2,60
Pareti interne tra unità abitative	Stato di fatto + isolamento termico simmetrico	0,80

Infiltrazioni/ventilazione	
spazi climatizzati	0,6 vol/h
spazi non climatizzati	0,4 vol/h

Apporti interni
4 W/m^2

T set point riscaldamento	
20 °C	costante

Dati climatici	$Q_{H,nd}$ [MJ/m^2]	$Q_{H,nd}$ [kWh/m^2]
Clima attuale	133,52	37,09
Clima 2050	101,32	28,14
Clima 2080	81,63	22,68

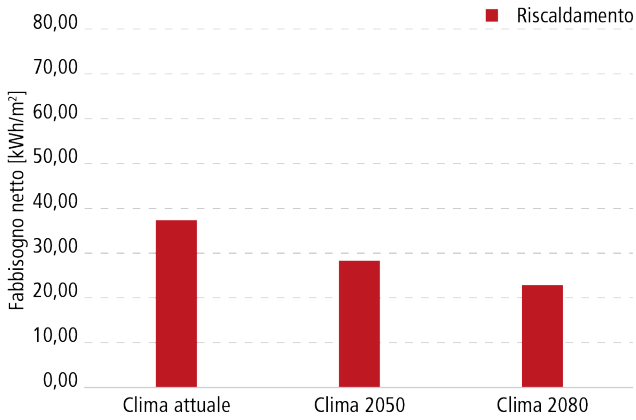


Tabelle 5.6-5.7 - Figura 5.20

In alto: dati di input relativi all'edificio riqualificato secondo i "requisiti minimi" del D.M. 26/06/2015.
Al centro e in basso: valori di output da simulazione dinamica; fabbisogno di riscaldamento attuale e futuro.

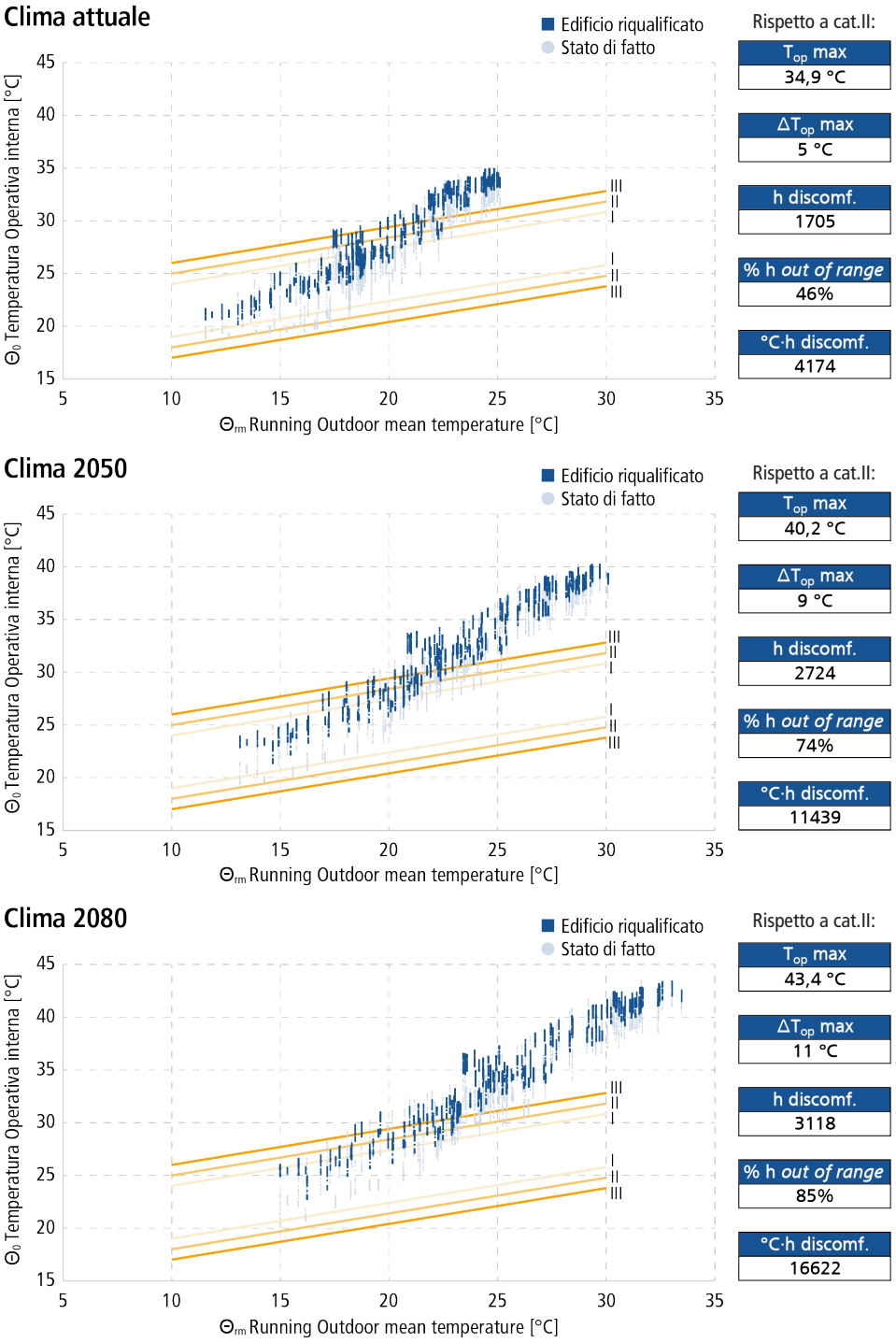


Figure 5.21-5.23

Distribuzione delle 3672 ore del periodo 1 maggio-30 settembre in funzione della *running outdoor mean temperature*, della temperatura operativa interna e rispetto ai limiti di comfort termico definiti dalla norma UNI EN 16798-1:2019; valori attuali e futuri relativi all'edificio riqualificato rispetto allo stato di fatto.

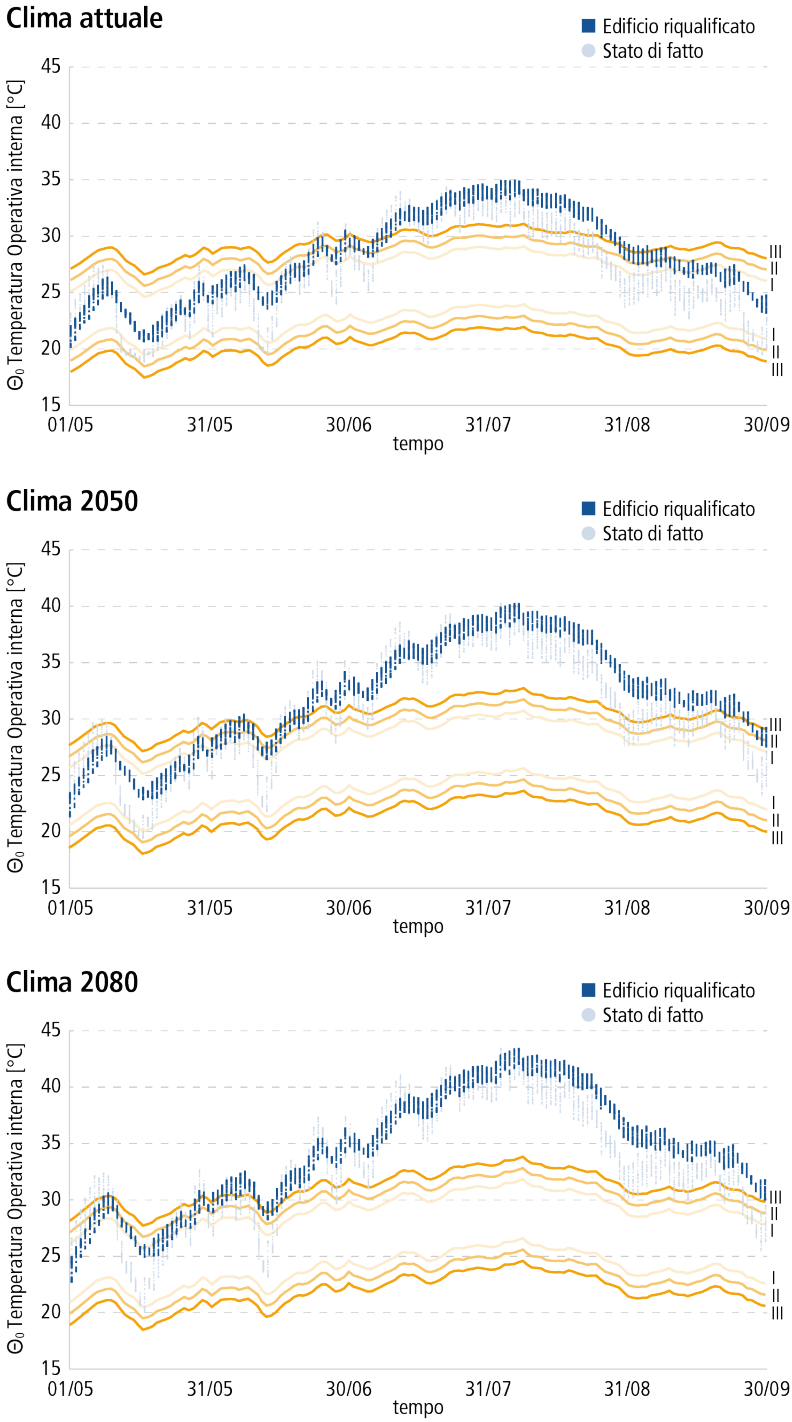


Figure 5.24-5.26

Distribuzione nel tempo delle 3672 ore del periodo 1 maggio-30 settembre in funzione della temperatura operativa interna e rispetto ai limiti di comfort termico definiti dalla norma UNI EN 16798-1:2019; valori attuali e futuri relativi all'edificio riqualificato rispetto allo stato di fatto.

Comfort termico: valutazione e confronto

Stato di fatto
Edificio riqualificato

Indice comfort	Clima attuale	Clima 2050	Clima 2080	Clima attuale	Clima 2050	Clima 2080
Ore discomfort (cat.II)	1245	2373	2928	1705	2724	3118
% Ore *out of range* (cat.II)	34%	65%	80%	46%	74%	85%
Gradi ora discomfort (cat.II)	2633	8602	13260	4174	11439	16622

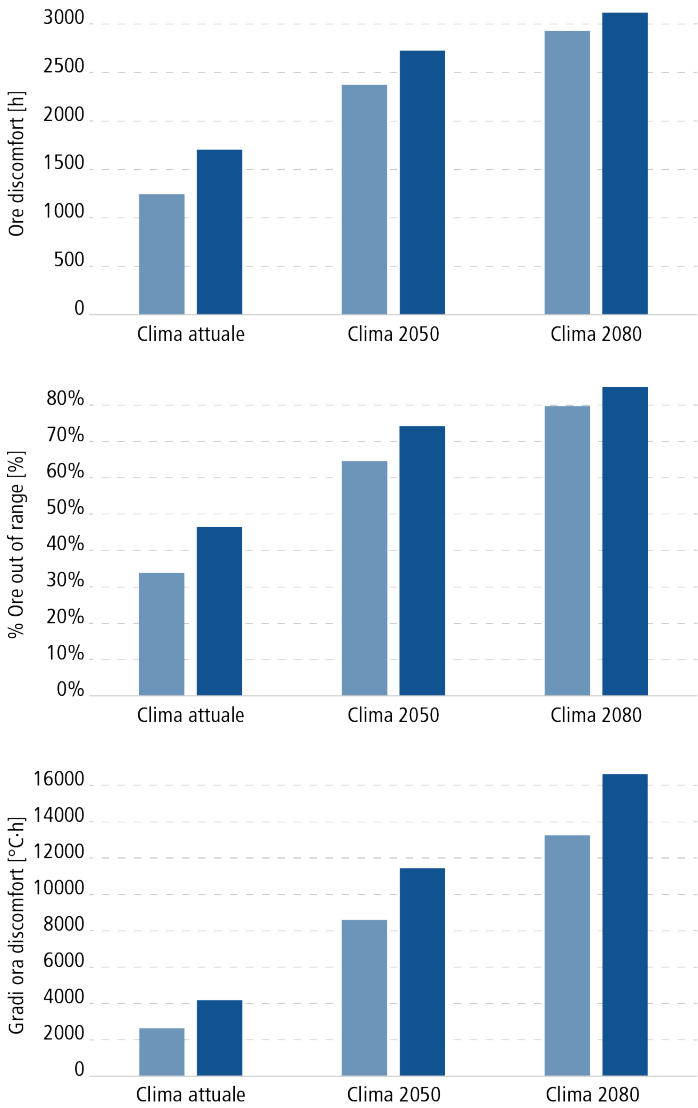


Tabella 5.8 - Figure 5.27-5.29
Valutazione e confronto degli indici di comfort termico negli Scenari 0 e 1 nei diversi anni tipo climatici.

Scenario 2: stato di fatto + impianto di raffrescamento attivo

È stato definito "Scenario 2" quello relativo allo stato di fatto dell'edificio tipo con l'implementazione di un impianto di raffrescamento attivo per la stagione estiva, operante alla temperatura costante di set point di 26°C; i dati di input e i risultati energetici sono riportati nelle Tabelle 5.9-5.10 e in Figura 5.30 a pagina seguente.

Il fabbisogno di raffrescamento, da un valore attuale stimato in 16,04kWh/m^2, aumenta progressivamente a 40,21kWh/m^2 (+151%) al 2050, e a 58,33kWh/m^2 (+264%) al 2080.

Scenario 3: edificio riqualificato + impianto di raffrescamento attivo

Lo "Scenario 3" prevede l'inserimento di un impianto di raffrescamento attivo nell'edificio riqualificato dello "Scenario 1"; i dati di input e i risultati energetici sono riportati nelle Tabelle 5.11-5.12 e in Figura 5.31 a pagina seguente.

Il fabbisogno di raffrescamento, ha un valore attuale stimato in 14,02kWh/m^2, corrispondente a un lieve calo del 13% rispetto allo "Scenario 2", che aumenta progressivamente a 30,05kWh/m^2 (+114%) al 2050, e a 42,16kWh/m^2 (+201%) al 2080.

Scenario 2: stato di fatto + impianto di raffrescamento attivo

Involucro		
elemento tecnico	tecnologia costruttiva	U [W/m^{2}K]
Pareti perimetrali	Muratura a cassa-vuota in mattoni forati in laterizio	1,15
Solaio superiore verso sottotetto	Solaio in latero-cemento	1,53
Solaio inferiore verso interrato	Solaio in latero-cemento	1,38
Pareti interne verso vani scala	Muratura in calcestruzzo	2,87
Serramenti	Vetro singolo e telaio in legno; $g_{gl+sh} = 0,47$	4,90
Copertura	Struttura in legno e manto in laterizio	1,97
Solai interpiano	Solaio in latero-cemento	1,27
Solaio a terra	Solaio in calcestruzzo armato	2,60
Pareti interne tra unità abitative	Muratura in mattoni forati in laterizio	1,90

Infiltrazioni/ventilazione	
spazi climatizzati	0,6 vol/h
spazi non climatizzati	0,4 vol/h

Apporti interni
4 W/m^2

T set point riscaldamento	
20 °C	costante

T set point raffrescamento	
26 °C	costante

Dati climatici	$Q_{H,nd}$ [MJ/m^2]	$Q_{H,nd}$ [kWh/m^2]	$Q_{C,nd}$ [MJ/m^2]	$Q_{C,nd}$ [kWh/m^2]
Clima attuale	293,76	81,60	57,75	16,04
Clima 2050	224,79	62,44	144,77	40,21
Clima 2080	186,06	51,68	209,98	58,33

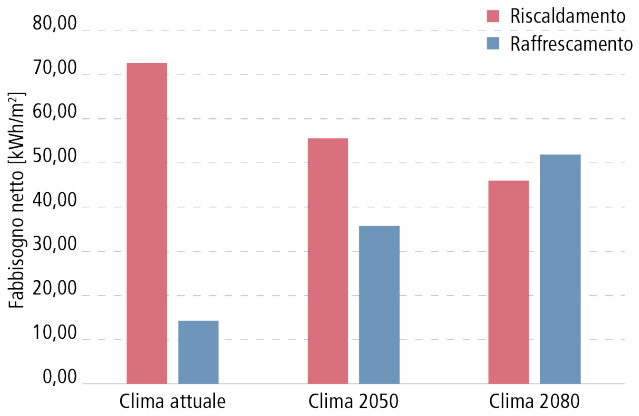


Tabelle 5.9-5.10 - Figura 5.30

In alto: dati di input relativi allo stato di fatto con l'inserimento di un impianto di raffrescamento attivo. Al centro e in basso: valori di output da simulazione dinamica; fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento attuali e futuri.

Scenario 3: edificio riqualificato + impianto di raffrescamento attivo

Involucro		
elemento tecnico	tecnologia costruttiva	U [W/m^{2}K]
Pareti perimetrali	Stato di fatto + isolamento termico a cappotto esterno	0,26
Solaio superiore verso sottotetto	Stato di fatto + isolamento termico estradosso	0,22
Solaio inferiore verso interrato	Stato di fatto + isolamento termico intradosso	0,26
Pareti interne verso vani scala	Stato di fatto + isolamento termico simmetrico	0,26
Serramenti	Vetro-camera; $g_{gl+sh} = 0,40$	1,40
Copertura	Stato di fatto	1,97
Solai interpiano	Stato di fatto + isolamento termico intradosso	0,80
Solaio a terra	Solaio in calcestruzzo armato	2,60
Pareti interne tra unità abitative	Stato di fatto + isolamento termico simmetrico	0,80

Infiltrazioni/ventilazione	
spazi climatizzati	0,6 vol/h
spazi non climatizzati	0,4 vol/h

Apporti interni
4 W/m^2

T set point riscaldamento	
20 °C	costante

T set point raffrescamento	
26 °C	costante

Dati climatici	$Q_{H,nd}$ [MJ/m^2]	$Q_{H,nd}$ [kWh/m^2]	$Q_{C,nd}$ [MJ/m^2]	$Q_{C,nd}$ [kWh/m^2]
Clima attuale	133,52	37,09	50,48	14,02
Clima 2050	101,32	28,14	108,18	30,05
Clima 2080	81,63	22,68	151,76	42,16

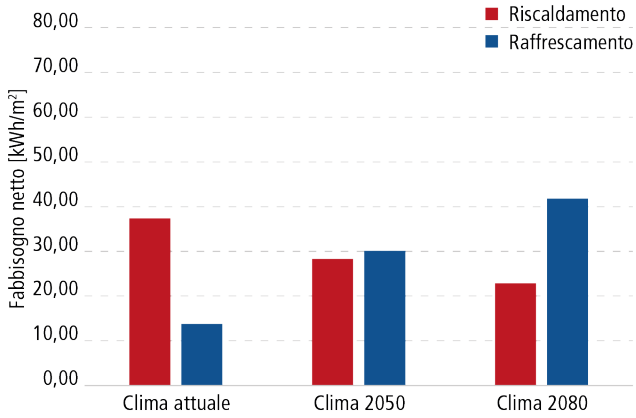


Tabelle 5.11-5.12 - Figura 5.31

In alto: dati di input relativi all'edificio riqualificato con l'inserimento di un impianto di raffrescamento attivo. Al centro e in basso: valori di output da simulazione dinamica; fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento attuali e futuri.

Consumi Scenario 0: stato di fatto

Dai valori di fabbisogno energetico calcolati tramite simulazione dinamica, è a questo punto utile calcolare i consumi di energia finale, legata ai rendimenti degli impianti, ed energia primaria, legata alla produzione dei vettori di fornitura.

Nello "Scenario 0" è presente il solo impianto di riscaldamento originario definito dal Progetto TABULA, costituito da caldaia a gas naturale, con rendimento di generazione pari a 0,85, e da un sistema di distribuzione idronica ad alta temperatura centralizzato a colonne montanti verticali e radiatori ad acqua come terminali di emissione, per un rendimento medio dei sottosistemi di utilizzazione pari a 0,81. Il fattore di conversione in energia primaria del vettore gas naturale è pari a 1,05 EP/E_{del}.

I conseguenti consumi sono riportati in Tabella 5.14 e nelle Figure 5.32-5.33: da una stima attuale di 118,kWh/m^2, l'energia finale decresce a 90,69kWh/m^2 nel 2050, e a 75,07kWh/m^2 nel 2080; la relativa energia primaria cala dagli attuali 124,44kWh/m^2 a 95,23kWh/m^2 nel 2050, e a 78,82kWh/m^2 nel 2080.

Consumi Scenario 1: edificio riqualificato

Nell'edificio riqualificato, il rendimento di generazione dell'impianto di riscaldamento diventa 0,95, valore relativo a una caldaia a gas naturale più efficiente dell'"edificio di riferimento", mantenendo 0,81 per i sottosistemi di utilizzazione.

I valori in Tabella 5.16 e nelle Figure 5.34-5.35 riportano un consumo di energia finale attuale di 48,20kWh/m^2, che scende a 36,57kWh/m^2 nel 2050, e a 29,47kWh/m^2 nel 2080; per l'energia primaria, la stima attuale di 50,61kWh/m^2 diminuisce a 38,40kWh/m^2 nel 2050, e a 30,94kWh/m^2 nel 2080.

Scenario 0: stato di fatto

Tecnologie impiantistiche di climatizzazione			
uso finale	tecnologia impiantistica	η_{gn} [-]	η_u [-]
Riscaldamento	Vettore fornitura: gas naturale	0.85	0.81
	Distribuzione: idronica		
	Terminali emissione: radiatori ad acqua		

Dati climatici	$E_{del,H}$ [kWh/m^2]	$EP_{H,tot}$ [kWh/m^2]	$EP_{gl,tot}$ [kWh/m^2]
Clima attuale	118.52	124.44	124.44
Clima 2050	90.69	95.23	95.23
Clima 2080	75.07	78.82	78.82

Tabelle 5.13-5.14 - Figure 5.32-5.33
In alto: impianti e rendimenti Scenario 0. Al centro e in basso: consumi di E_{del} e di EP_{tot} attuali e futuri.

Scenario 1: edificio riqualificato

Tecnologie impiantistiche di climatizzazione			
uso finale	tecnologia impiantistica	η_{gn} [-]	η_u [-]
Riscaldamento	Vettore fornitura: gas naturale	0.95	0.81
	Distribuzione: idronica		
	Terminali emissione: radiatori ad acqua		

Dati climatici	$E_{del,H}$ [kWh/m^2]	$EP_{H,tot}$ [kWh/m^2]	$EP_{gl,tot}$ [kWh/m^2]
Clima attuale	48.20	50.61	50.61
Clima 2050	36.57	38.40	38.40
Clima 2080	29.47	30.94	30.94

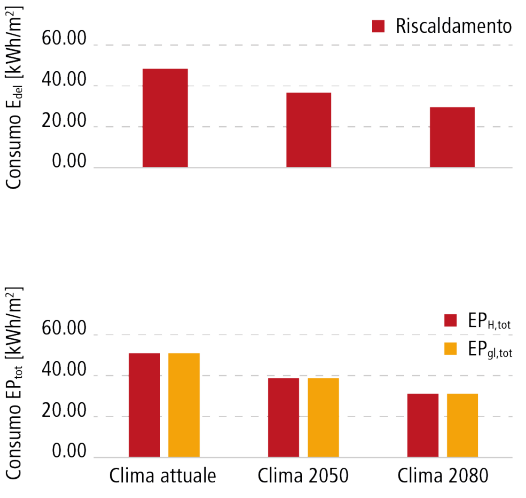


Tabelle 5.15-5.16 - Figure 5.34-5.35
In alto: impianti e rendimenti Scenario 1. Al centro e in basso: consumi di E_{del} e di EP_{tot} attuali e futuri.

Consumi Scenario 2: stato di fatto + impianto di raffrescamento attivo

L'impianto di raffrescamento attivo implementato negli Scenari 2 e 3 è un sistema aria-aria con macchina frigorifera a compressione di vapore a motore elettrico, con rendimento di generazione pari a 2,50, e terminali multi-split in ambiente, con un rendimento globale dei sottosistemi di utilizzazione pari a 0,81. Il fattore di conversione in energia primaria del vettore energia elettrica da rete è pari a 2,42 EP/E_{del}.

La Tabella 5.18 e le Figure 5.36-5.37 riportano i consumi di energia finale per raffrescamento e di energia primaria globale: nel primo caso, i valori variano da 7,92kWh/m^2 a 19,86kWh/m^2 nel 2050, e a 28,80kWh/m^2 nel 2080; nel secondo, combinando i due usi finali, l'energia primaria richiesta rimane piuttosto costante, da 143,62kWh/m^2, a 143,29kWh/m^2 nel 2050, a 148,53kWh/m^2 nel 2080.

Consumi Scenario 3: edificio riqualificato + impianto di raffrescamento attivo

La Tabella 5.20 e le Figure 5.38-5.39 riportano i consumi di energia finale per raffrescamento e di energia primaria globale: nel primo caso, i valori variano da 6,92kWh/m^2 a 14,84kWh/m^2 nel 2050, e a 20,82kWh/m^2 nel 2080; nel secondo, combinando i due usi finali, l'energia primaria cresce da 67,37kWh/m^2, a 74,32kWh/m^2 (+10%) nel 2050, a 81,32kWh/m^2 (+21%) nel 2080.

Scenario 2: stato di fatto + impianto di raffrescamento attivo

Tecnologie impiantistiche di climatizzazione			
uso finale	tecnologia impiantistica	η_{gn} [-]	η_u [-]
Riscaldamento	Vettore fornitura: gas naturale	0.85	0.81
	Distribuzione: idronica		
	Terminali emissione: radiatori ad acqua		
Raffrescamento	Vettore fornitura: energia elettrica	2.50	0.81
	Distribuzione: idronica		
	Terminali emissione: multi-split		

Dati climatici	$E_{del,H}$ [kWh/m^2]	$EP_{H,tot}$ [kWh/m^2]	$E_{del,C}$ [kWh/m^2]	$EP_{C,tot}$ [kWh/m^2]	$EP_{gl,tot}$ [kWh/m^2]
Clima attuale	118.52	124.44	7.92	19.17	143.62
Clima 2050	90.69	95.23	19.86	48.06	143.29
Clima 2080	75.07	78.82	28.80	69.71	148.53

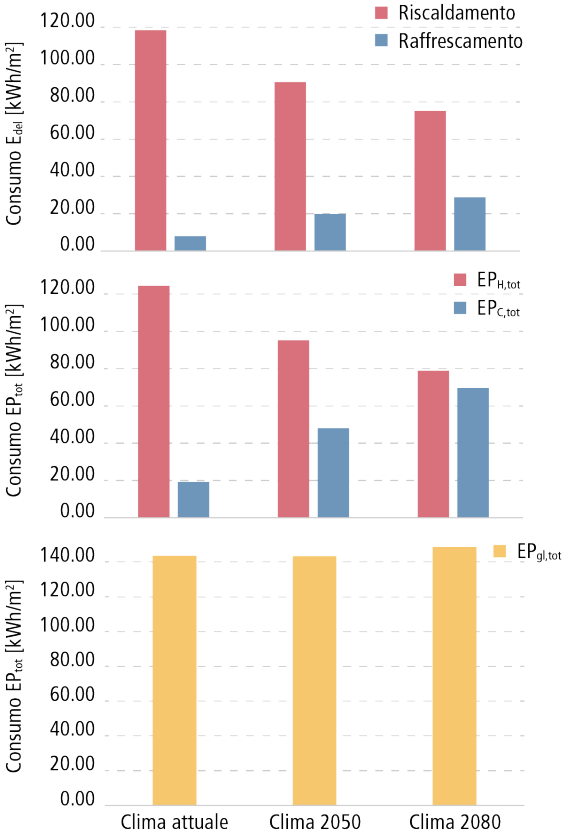


Tabelle 5.17-5.18 - Figure 5.36-5.37
In alto: impianti e rendimenti Scenario 2. Al centro e in basso: consumi di E_{del} e di EP_{tot} attuali e futuri.

Scenario 3: edificio riqualificato + impianto di raffrescamento attivo

Tecnologie impiantistiche di climatizzazione			
uso finale	tecnologia impiantistica	η_{gn} [-]	η_u [-]
Riscaldamento	Vettore fornitura: gas naturale	0.95	0.81
	Distribuzione: idronica		
	Terminali emissione: radiatori ad acqua		
Raffrescamento	Vettore fornitura: energia elettrica	2.50	0.81
	Distribuzione: idronica		
	Terminali emissione: multi-split		

Dati climatici	$E_{del,H}$ [kWh/m^2]	$EP_{H,tot}$ [kWh/m^2]	$E_{del,C}$ [kWh/m^2]	$EP_{C,tot}$ [kWh/m^2]	$EP_{gl,tot}$ [kWh/m^2]
Clima attuale	48.20	50.61	6.92	16.76	67.37
Clima 2050	36.57	38.40	14.84	35.91	74.32
Clima 2080	29.47	30.94	20.82	50.38	81.32

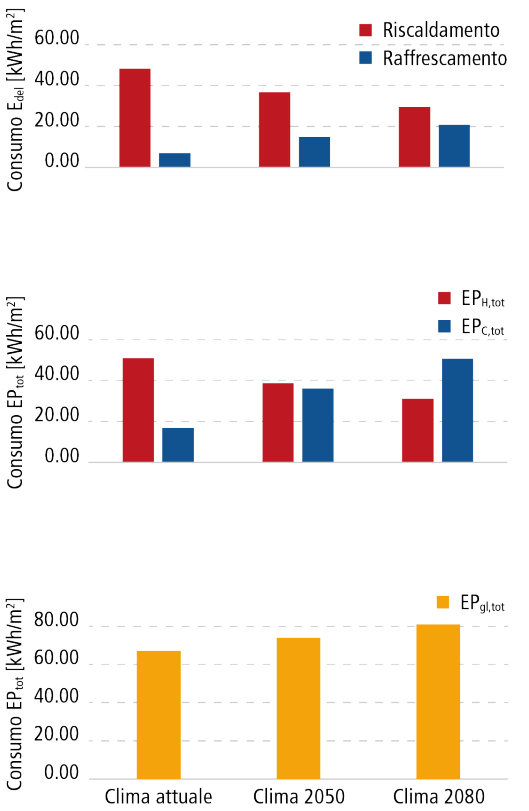


Tabelle 5.19-5.20 - Figure 5.38-5.39
In alto: impianti e rendimenti Scenario 3. Al centro e in basso: consumi di E_{del} e di EP_{tot} attuali e futuri.

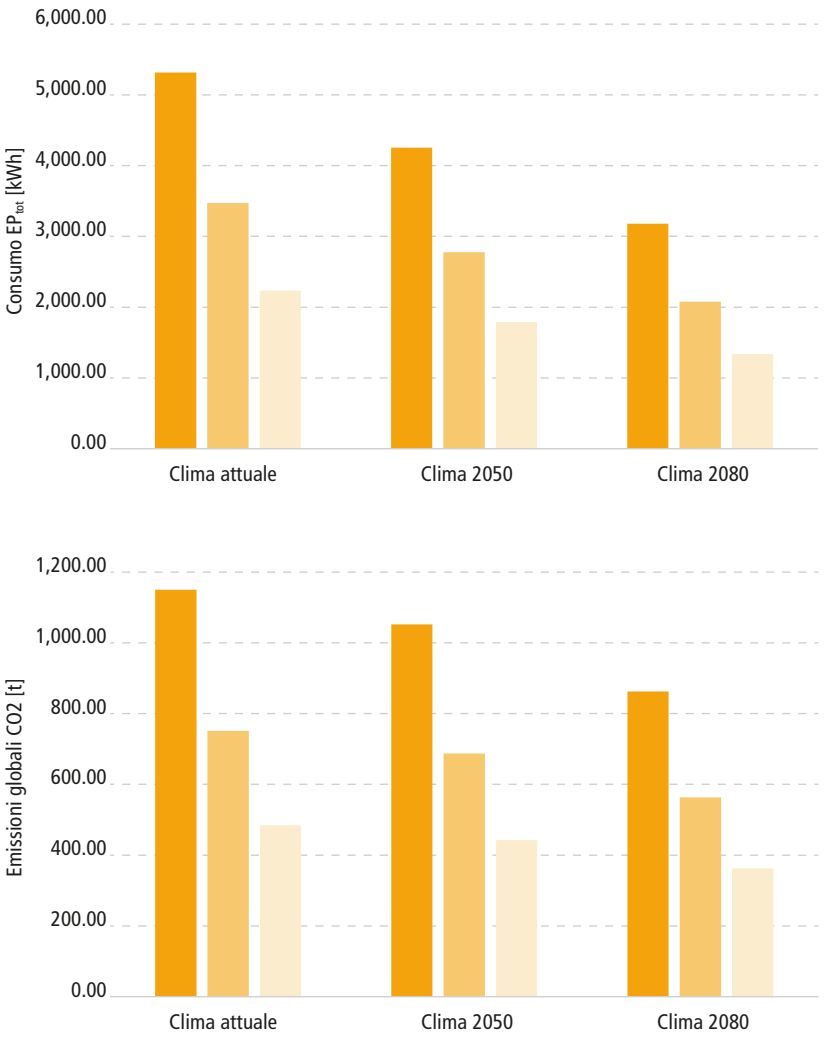
Impatti sul patrimonio residenziale esistente

Utilizzando i dati ISTAT del Censimento 2011[11] si è ricostruita la superficie complessiva di edifici residenziali multifamiliari analoghi al caso studio considerato, nel Comune e nella Città Metropolitana di Torino e nella Regione Piemonte, estendendo l'epoca di costruzione dal 1946 al 1970; è stata quindi inclusa la classe storica 5 della *Tipologia Edilizia Nazionale* del Progetto TABULA, poiché caratterizzata da tecnologie costruttive e livelli di prestazione molto simili al caso studio della precedente classe 4.

Nelle Tabelle 5.21-5.23 e nelle Figure 5.40-5.41 è stato elaborato un prospetto di sintesi degli impatti dei risultati precedenti sul patrimonio edilizio analogo al caso studio selezionato, in termini di energia primaria totale ed emissioni di CO_2. Gli interventi di riqualificazione portano a una progressiva riduzione di entrambi i fattori nel lungo periodo, e combinati alla crescente produzione elettrica da fonti rinnovabili garantirebbero risparmi ulteriori.

[11] Censimento Popolazione Abitazioni 2011, accessibile online al sito ISTAT http://dati-censimentopopolazione.istat.it/Index.aspx.

Patrimonio edilizio residenziale analogo al caso studio			
Territorio	Sup. media/abitazione [m^2]	Totale abitazioni analoghe	Superficie totale [m^2]
Regione Piemonte	95.89	407,789	39,101,483.94
Città Metropolitana Torino	89.98	283,689	25,526,008.11
Comune Torino	82.18	200,162	16,449,383.48



Stime EP globale					
Dati climatici	Territorio	EP stato di fatto [kWh/m^2]	EP riqualificato [kWh/m^2]	% edifici riqualificati	Stima EP totale [GWh]
Clima attuale	Regione Piemonte	143.62	67.37	10%	5,317.42
	Città Metropolitana Torino				3,471.29
	Comune Torino				2,236.96
Clima 2050	Regione Piemonte	143.29	74.32	50%	4,254.25
	Città Metropolitana Torino				2,777.23
	Comune Torino				1,789.70
Clima 2080	Regione Piemonte	148.53	81.32	100%	3,179.70
	Città Metropolitana Torino				2,075.75
	Comune Torino				1,337.65

Stime emissioni globali CO_2					
Dati climatici	Territorio	CO_2 Gas naturale [g/kWh]	CO_2 Energia elettrica [g/kWh]	% edifici riqualificati	Stima emissioni CO_2 [t]
Clima attuale	Regione Piemonte	200.00	315.00	10%	1,150.24
	Città Metropolitana Torino				750.89
	Comune Torino				483.89
Clima 2050	Regione Piemonte	200.00	315.00	50%	1,052.23
	Città Metropolitana Torino				686.91
	Comune Torino				442.66
Clima 2080	Regione Piemonte	200.00	315.00	100%	862.47
	Città Metropolitana Torino				563.04
	Comune Torino				362.83

Tabelle 5.21-5.23 - Figure 5.40-5.41
Impatti dei risultati precedenti sul patrimonio edilizio residenziale, in termini di consumi di EP_{tot} ed emissioni globali di CO_2, attuali e futuri.

Conclusioni

I risultati principali del percorso di ricerca svolto riguardano l'effettiva dimostrazione della necessità di controllare attivamente il raffrescamento estivo, poiché il discomfort causato dal cambiamento climatico in futuro sarà sempre più grave e intollerabile.
L'indagine sulla tipologia edilizia richiede sicuramente l'estensione alle altre classi dimensionali diverse dal "blocco di appartamenti" considerato, per consentire una stima completa degli impatti climatici e delle misure di efficienza energetica sull'intero patrimonio costruito. Le prime elaborazioni presentate in tal senso mostrano effetti positivi di riduzione dei consumi e delle emissioni climalteranti sul lungo periodo, ulteriormente contenibili con maggiore produzione da fonti rinnovabili e con sistemi impiantistici più efficienti.

L'altro esito della presente tesi è il processo di costruzione di conoscenza intrapreso nel capitolo 4 dall'analisi critica della letteratura prodotta sul tema degli effetti del cambiamento climatico sulle prestazioni energetiche degli edifici, che ha portato alla definizione di uno strumento di indagine e sintesi ampliabile ad altre ricerche per i temi ancora poco affrontati.

Bibliografia

La presente bibliografia raccoglie le fonti delle citazioni a piè di pagina nel corpo della tesi, in gruppi tematici che non seguono necessariamente l'ordine dei capitoli. Sono presenti ulteriori riferimenti bibliografici utili alla conoscenza degli argomenti, non citati nel testo. L'ordine delle fonti è cronologico secondo la data di pubblicazione, riportando tendenzialmente prima le pubblicazioni, a stampa o digitali, quindi i generici siti web, identificati come da legenda:

● Pubblicazione (a stampa o digitale) ○ Sito web.

Climatologia

● Taylor, F.W., 2005. *Elementary Climate Physics*, Oxford University Press, Oxford, Regno Unito.

● Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification. In *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, pp. 1633–44.

○ Classificazione climatica dell'Italia in base ai gradi giorno. Sito web *Luce e Gas Italia*: http://www.luceegasitalia.it/2020/01/22/le-zone-climatiche-italiane-e-i-periodi-di-accensione-degli-impianti-di-riscaldamento/.

○ Dati climatici delle località nel mondo secondo la ASHRAE. Sito web *ASHRAE Design Conditions*: http://ashrae-meteo.info/v2.0/index.php.

○ Gradi giorno delle località nel mondo. Sito web *DegreeDays*: https://www.degreedays.net/#generate.

Cambiamento climatico

○ Obama, B., 2015. Discorso in occasione della conferenza GLACIER tenutasi ad Anchorage, Alaska, il 31/08/2015; accessibile al sito https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2015/09/01/remarks-president-glacier-conference-anchorage-ak.

● Chao, Q., Feng, A., 2018. Scientific Basis of Climate Change and Its Response. In *Global Energy Interconnection*, 1, 4, pp. 420–27.

● Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2019. *Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima.*

- Galbiati, F., 2019. Incendi in Siberia e il concetto di "feedback climatico". Da *Icona Clima*, pubblicato online 01/08/2019; accessibile al sito https://www.iconaclima.it/salute-del-pianeta/temperature/incendi-in-siberia-e-il-concetto-di-feedback-climatico/.

- Dichiarazione di 32 Capi di Stato e di Governo in occasione del Climate Action Summit delle Nazioni Unite, tenutosi a New York il 23/09/19. *Iniziativa per una maggiore Ambizione Climatica*; accessibile al sito https://www.quirinale.it/elementi/36747.

- Perché è fallita la conferenza sul clima. Da *Il Post*, pubblicato online 16/12/2019; accessibile al sito https://www.ilpost.it/2019/12/16/cop2-conferenza-clima-fallimento/.

- Agenda ONU 2030. Sito web *UNIRC*: https://unric.org/it/agenda-2030/.

- Definizione di "feedback". Sito web *Vocabolario Treccani*: https://www.treccani.it/vocabolario/feedback/.

- Protocollo di Kyoto. Sito web *Rete Clima*: https://www.reteclima.it/protocollo-di-kyoto/.

- Sito web Commissione Europea: https://ec.europa.eu/info/index_it.

- Sito web IEA - Climate Change: https://www.iea.org/topics/climate-change.

- Sito web IPCC: https://www.ipcc.ch/.

- Sito web ISPRA - Cambiamenti Climatici: https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/cambiamenti-climatici.

- Sito web Ministero dell' Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare – Piattaforma delle Conoscenze: http://www.pdc.minambiente.it/it.

- Sito web NASA - Climate Change: https://climate.nasa.gov/.

- Sito web UNFCCC: https://unfccc.int/.

- Sito web *Climalteranti*: https://www.climalteranti.it/.

- Sito web *Climate4Impact - IS-ENES*: https://climate4impact.eu/impactportal/general/index.jsp.

- Sito web *Eurostat*: https://ec.europa.eu/eurostat/home.

- Sito web *IPCC - Focal Point Italia*: https://ipccitalia.cmcc.it/.

- Sito web *Our World in Data*: https://ourworldindata.org/.

Cambiamento climatico e ambiente costruito

- Smith, P.F., 2005. *Architecture in a Climate of Change: A Guide to Sustainable Design*, Architectural Press - Elsevier, Oxford, United Kingdom.

- Altomonte, S., 2009. Climate Change and Architecture: Mitigation and Adaptation Strategies for a Sustainable Development. In *Journal of Sustainable Development*, 1, 1, pp. 97–112.

- de Wilde, P., Coley, D., 2012. The Implications of a Changing Climate for Buildings. In *Building and Environment*, 55, pp. 1–7.

- Chalmers, P., 2014. Climate Change: Implications for Buildings. Key Findings from the Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report. In *Climate Everyone's Business*. University of Cambridge, BPIE, GBPN, WBCSD.

- van Staden, R., 2014. Climate Change: Implications for Cities. Key Findings from the Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report. In *Climate Everyone's Business*. University of Cambridge, ICLEI.

- Brashear, P., Crawley, D., Huang, J., Laxo, A., Pyke, C., 2018. A Conversation on Adaptation in the Built Environment. In *ASHRAE Journal*, 60, 10, pp. 34–48.

- Casale, C., 2019. Mitigare e Adattare: Due Concetti Fondamentali per Convivere Con Il Cambiamento Climatico. In *AiCARR Journal*, anno 10, 57, pp. 50–53.

- GlobalABC, IEA, UNEP, 2019. *2019 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-Emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*, IEA, Parigi, Francia.

- GlobalABC, IEA, UNEP, 2020. *GlobalABC Roadmap for Buildings and Construction: Towards a Zero-Emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*, IEA, Parigi, Francia.

- UN/DESA, *World Urbanization Prospects*; accessibile al sito https://population.un.org/wup/DataQuery/.

- Sito web BPIE: https://www.bpie.eu/.

- Sito web GlobalABC: https://globalabc.org/.

Rapporti IPCC

- IPCC, 2000. Summary for Policymakers. In *Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [N. Nakicenovic, R. Swart (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito.

- IPCC, 2001. *Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Integovernmental Panel on Climate Change*, [R.T. Watson, Core Writing Team (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA.

- IPCC, 2013. Summary for Policymakers. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA, pp. 3–29.

- Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichefet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W.J., Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Tebaldi, C., Weaver, A.J., Wehner, M., 2013. Long-Term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA, pp. 1029–1136.

- Cubasch, U., Wuebbles, D., Chen, D., Facchini, M.C., Frame, D., Mahowald, N., Winther, J.-G., 2013. Introduction. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA, pp. 119–58.

- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S.C., Collins, W., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V., Forest, C., Gleckler, P., Guilyardi, E., Jakob, C., Kattsov, V., Reason, C., Rummukainen, M., 2013. Evaluation of Climate Models. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA, pp. 741–866.

- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., Zhang, H., 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels,

Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA, pp. 659–740.

- IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, [Core Writing Team, R.K. Pachauri, L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginevra, Svizzera.

- IPCC, 2014. Annex II: Glossary. In *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Core Writing Team, R.K. Pachauri, L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginevra, Svizzera, pp. 117–30.

- IPCC, 2014. Summary for Policymakers. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA, pp. 1–32.

- IPCC, 2014. Summary for Policymakers. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA, pp. 1–30.

- Burkett, V.R., Suarez, A.G., Bindi, M., Conde, C., Mukerji, R., Prather, M.J., St. Clair, A.L., Yohe, G.W., 2014. Point of Departure. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA, pp. 169–94.

- Lucon, O., Ürge-Vorsatz, D., Zain Ahmed, A., Akbari, H., Bertoldi, P., Cabeza, L.F., Eyre, N., Gadgil, A., Harvey, L.D.D., Jiang, Y., Liphoto, E., Mirasgedis, S., Murakami, S., Parikh, J., Pyke, C., Vilariño, M.V., 2014. Buildings. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA, pp. 671–738.

- Noble, I.R., Huq, S., Anokhin, Y.A., Carmin, J.A., Goudou, D., Lansigan, F.P., Osman-Elasha, B., Villamizar, A., Patt, A., Takeuchi, K., Chu, E., 2014. Adaptation Needs and Options. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA, pp. 833–68.

- Revi, A., Satterthwaite, D.E., Aragón-Durand, F., Corfee-Morlot, J., Kiunsi, R.B.R., Pelling, M., Roberts, D.C., Solecki, W., 2014. Urban Areas. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA, pp. 535–612.

- Victor, D.G., Zhou, D., Ahmed, E.H.M., Dadhich, P.K., Olivier, J.G.J., Rogner, H.-H., Sheikho, K., Yamaguchi, M., 2014. Introductory Chapter. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA, pp. 111–50.

- IPCC, 2016. *Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Scenarios*, [K. Riahi, J.C. Minx, V. Barros, M. Bustamente, T. Carter, O. Edenhofer, C. Field, E. Kriegler, J.-F. Lamarque, K. Mach, R. Mathur, B. O'Neill, R. Pichs-Madruga, G.-K. Plattner, D. Qin, Y. Sokona, T. Stocker, T. Zhou, J. Antle, N. Arnell, J. Edmonds, S. Emori, P. Friedlingstein, J. Fuglestvedt, F. Joos, H. Lotze-Campen, X. Lu, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, M. Prather, B. Preston, N. Rao, J. Rogelj, J. Rozenberg, P.R. Shukla, J. Skea, C. Tebaldi, D. van Vuuren (eds.)]. IPCC Working Group III Technical Support Unit, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germania.

- IPCC, 2018. Summary for Policymakers. In *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*. [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Ginevra, Svizzera, pp. 32.

Dati climatici futuri

- Belcher, S.E., Hacker, J.N., Powell, D.S., 2005. Constructing Design Weather Data for Future Climates. In *Building Services Engineering Research and Technology*, 26, 1, pp. 49–61.

- Guan, L., 2009. Preparation of Future Weather Data to Study the Impact of Climate Change on Buildings. In *Building and Environment*, 44, 4, pp. 793–800.

- Jentsch, M.F., James, P.A.B., Bourikas, L., Bahaj, A.B.S., 2013. Transforming Existing Weather Data for Worldwide Locations to Enable Energy and Building Performance Simulation under Future Climates. In *Renewable Energy*, 55, pp. 514–24.

- Cox, R.A., Drews, M., Rode, C., Balslev Nielsen, S., 2015. Simple Future Weather Files for Estimating Heating and Cooling Demand. In *Building and Environment*, 83, pp. 104–14.

- Dickinson, R., Brannon, B., 2016. Generating Future Weather Files for Resilience. In *PLEA 2016 Los Angeles - 36th International Conference on Passive and Low Energy Architecture. Cities, Buildings, People: Towards Regenerative Environment*. 11-13/07/2016, Los Angeles, USA.

- Troup, L., Fannon, D., 2016. Morphing Climate Data to Simulate Building Energy Consumption. In *Building Performance Modeling Conference*, pp. 439–46.

- Moazami, A., Carlucci, S., Geving, S., 2017. Critical Analysis of Software Tools Aimed at Generating Future Weather Files with a View to Their Use in Building Performance Simulation. In *Energy Procedia*, 132, pp. 640–45.

- Nik, V.M., Arfvidsson, J., 2017. Using Typical and Extreme Weather Files for Impact Assessment of Climate Change on Buildings. In *Energy Procedia*, 132, pp. 616–21.

- Kočí, J., Kočí, V., Maděra, J., Černý, R., 2019. Effect of Applied Weather Data Sets in Simulation of Building Energy Demands: Comparison of Design Years with Recent Weather Data. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 100, October 2018, pp. 22–32.

- Moazami, A., Nik, V.M., Carlucci, S., Geving, S., 2019. Impacts of Future Weather Data Typology on Building Energy Performance – Investigating Long-Term Patterns of Climate Change and Extreme Weather Conditions. In *Applied Energy*, 238, December 2018, pp. 696–720.

- CCWorldWeatherGen. Sito web University of Southampton – Energy and climate change: https://energy.soton.ac.uk/ccworldweathergen/.

- CESM-NEMO. Sito web CMCC: https://www.cmcc.it/it/models/cmcc-cesm-nemo-climate-coupled-model.

- CESM. Sito web NCAR: https://www.cesm.ucar.edu/models/.

- COSMO-CLM. Sito web CMCC: https://www.cmcc.it/it/models/cosmo-clm-climate-limited-area-modelling-community.

- HadCM3. Sito web MetOffice: https://www.metoffice.gov.uk/research/approach/modelling-systems/unified-model/climate-models/hadcm3.

- PRECIS. Sito web MetOffice: https://www.metoffice.gov.uk/research/applied/international/precis/introduction.

- RCP Database. Sito web IIASA: https://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=welcome#rcpinfo.

- Sito web CMIP: https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip.

- Sito web EURO-CORDEX: https://euro-cordex.net/index.php.en.

- Sito web IPCC Data Distribution Centre: http://www.ipcc-data.org/index.html.

- Sito web WeatherShift®: https://www.weathershift.com/.

- Sito web *ClimatePrediction*: https://www.climateprediction.net/.

Effetti del cambiamento climatico sulle prestazioni energetiche degli edifici

- Wang, X., Chen, D., Ren, Z., 2010. Assessment of Climate Change Impact on Residential Building Heating and Cooling Energy Requirement in Australia. In *Building and Environment*, 45, 7, pp. 1663–82.

- Li, D.H.W., Yang, L., Lam, J.C., 2012. Impact of Climate Change on Energy Use in the Built Environment in Different Climate Zones - A Review. In *Energy*, 42, 1, pp. 103–12.

- Robert, A., Kummert, M., 2012. Designing Net-Zero Energy Buildings for the Future Climate, Not for the Past. In *Building and Environment*, 55, pp. 150–58.

- Nik, V.M., Sasic Kalagasidis, A., 2013. Impact Study of the Climate Change on the Energy Performance of the Building Stock in Stockholm Considering Four Climate Uncertainties. In *Building and Environment*, 60, pp. 291–304.

- Ferrara, M., Fabrizio, E., Virgone, J., Filippi, M., 2014. A Simulation-Based Optimization Method for Cost-Optimal Analysis of Nearly Zero Energy Buildings. In *Energy and Buildings*, 84, pp. 442–57.

- Jylhä, K., Jokisalo, J., Ruosteenoja, K., Pilli-Sihvola, K., Kalamees, T., Seitola, T., Mäkelä, H.M., Hyvönen, R., Laapas, M., Drebs, A., 2015. Energy Demand for the Heating and Cooling of Residential Houses in Finland in a Changing Climate. In *Energy and Buildings*, 99, pp. 104–16.

- Andrić, I., Gomes, N., Pina, A., Ferrão, P., Fournier, J., Lacarrière, B., Le Corre, O., 2016. Modeling the Long-Term Effect of Climate Change on Building Heat Demand: Case Study on a District Level. In *Energy and Buildings*, 126, pp. 77–93.

- Invidiata, A., Ghisi, E., 2016. Impact of Climate Change on Heating and Cooling Energy Demand in Houses in Brazil. In *Energy and Buildings*, 130, 2016, pp. 20–32.

- Moazami, A., Carlucci, S., Causone, F., Pagliano, L., 2016. Energy Retrofit of a Day Care Center for Current and Future Weather Scenarios. In *Procedia Engineering*, 145, 1877, pp. 1330–37.

- Shibuya, T., Croxford, B., 2016. The Effect of Climate Change on Office Building Energy Consumption in Japan. In *Energy and Buildings*, 117, pp. 1–11.Aijazi, A.N., Brager, G.S., 2018. Understanding Climate Change Impacts on Building Energy Use. In *ASHRAE Journal*, 60, 10, pp. 24–32.

- van Hooff, T., Blocken, B., Timmermans, H.J.P., Hensen, J.L.M., 2016. Analysis of the Predicted Effect of Passive Climate Adaptation Measures on Energy Demand for Cooling and Heating in a Residential Building. In *Energy*, 94, pp. 811–20.

- Waddicor, D.A., Fuentes, E., Sisó, L., Salom, J., Favre, B., Jiménez, C., Azar, M., 2016. Climate Change and Building Ageing Impact on Building Energy Performance and Mitigation Measures Application: A Case Study in Turin, Northern Italy. In *Building and Environment*, 102, pp. 13–25.

- Andrić, I., Pina, A., Ferrão, P., Fournier, J., Lacarrière, B., Le Corre, O., 2017. The Impact of Climate Change on Building Heat Demand in Different Climate Types. In *Energy and Buildings*, 149, pp. 225–34.

- Ferrara, M., Fabrizio, E., 2017. Cost Optimal NZEBs in Future Climate Scenarios. In *Energy Procedia*, 122, pp. 877–82.

- Pierangioli, L., 2017. *Effetti Dei Cambiamenti Climatici Sulle Prestazioni Energetiche Degli Edifici Residenziali in Clima Mediterraneo. Il Caso Del Patrimonio Residenziale Pubblico INA-Casa e Gescal Della Toscana*. Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Firenze.

- Sabunas, A., Kanapickas, A., 2017. Estimation of Climate Change Impact on Energy Consumption in a Residential Building in Kaunas, Lithuania, Using HEED Software. In *Energy Procedia*, 128, pp. 92–99.

- Shen, P., 2017. Impacts of Climate Change on U.S. Building Energy Use by Using Downscaled Hourly Future Weather Data. In *Energy and Buildings*, 134, pp. 61–70.

- Cellura, M., Guarino, F., Longo, S., Tumminia, G., 2018. Climate Change and the Building Sector: Modelling and Energy Implications to an Office Building in Southern Europe. In *Energy for Sustainable Development*, 45, 2018, pp. 46–65.

- Ferrara, M., Monetti, V., Fabrizio, E., 2018. Cost-Optimal Analysis for Nearly Zero Energy Buildings Design and Optimization: A Critical Review. In *Energies*, 11, 6, 1478, pp. 32.

- Pérez-Andreu, V., Aparicio-Fernández, C., Martínez-Ibernón, A., Vivancos, J.L., 2018. Impact of Climate Change on Heating and Cooling Energy Demand in a Residential Building in a Mediterranean Climate. In *Energy*, 165, pp. 63–74.

- Andrić, I., Koc, M., Al-Ghamdi, S.G., 2019. A Review of Climate Change Implications for Built Environment: Impacts, Mitigation Measures and Associated Challenges in Developed and Developing Countries. In *Journal of Cleaner Production*, 211, pp. 83–102.

- Andrić, I., Le Corre, O., Lacarrière, B., Ferrão, P., Al-Ghamdi, S.G., 2019. Initial Approximation of the Implications for Architecture Due to Climate Change. In *Advances in Building Energy Research*, pp. 1–31.

- Bilardo, M., Ferrara, M., Fabrizio, E., 2019. Resilient Optimal Design of Multi-Family Buildings in Future Climate Scenarios. In *E3S Web of Conferences*, 111, 06006, Congresso CLIMA 2019, Bucarest, Romania.

- Ferrara, M., Rolfo, A., Prunotto, F., Fabrizio, E., 2019. EDeSSOpt – Energy Demand and Supply Simultaneous Optimization for Cost-Optimized Design: Application to a Multi-Family Building. In *Applied Energy*, 236, December 2018, pp. 1231–48.

- Poulsen, M., Lauring, M., Brunsgaard, C., 2020. A Review of Climate Change Adaptive Measures in Architecture within Temperate Climate Zones. In *Journal of Green Building*, 15, 2, pp. 113–30.

- GenOpt®. Sito web L. Berkeley National Laboratory – Simulation Research: https://simulationresearch.lbl.gov/GO/.

- Sito web EnergyPlus®: https://energyplus.net/.

- Sito web TRNSYS®: http://www.trnsys.com/.

Applicazione a caso studio

- Corrado, V., Ballarini, I., Corgnati, S.P., 2012. *Typology Approach for Building Stock Energy Assessment: National Scientific Report on the TABULA Activities in Italy*, Politecnico di Torino - DENERG, Torino.

- Montanaro, M., 2012. *Livelli Di Prestazione Energetica Ottimali in Funzione Dei Costi: Un Edificio Multifamiliare Esistente*. Tesi di Laurea Specialistica, Politecnico di Torino.

- Corrado, V., Ballarini, I., Corgnati, S.P., 2014. *Building Typology Brochure – Italy. Fascicolo Sulla Tipologia Edilizia Italiana*, Politecnico di Torino - DENERG, Gruppo di ricerca TEBE, Torino.

- ARPA Piemonte, 2018. *Città Di Torino. Assessment Climatico e Scenari Futuri*, ARPA Piemonte, Torino.

- Progetto TABULA. Sito web TABULA-EPISCOPE: http://episcope.eu/iee-project/tabula/.

- Progetto TABULA. Sito web Politecnico di Torino: https://areeweb.polito.it/ricerca/episcope/tabula/.

- Progetto TABULA. Sito web TABULA WebTool: http://webtool.building-typology.eu/#bm.

- Statistiche Censimento Popolazione Abitazioni. Sito web ISTAT: http://dati-censimentopopolazione.istat.it/Index.aspx.

- Sito web OpenStudio®: https://www.openstudio.net/.

Normative

- Decreto del Presidente della Repubblica 26/08/1993 n. 412. *Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia.*

- UNI EN ISO 15927-4:2005. *Prestazione termoigrometrica degli edifici. Calcolo e presentazione dei dati climatici. Parte 4: Dati orari per la valutazione del fabbisogno annuale di energia per il riscaldamento e il raffrescamento*.

- UNI EN ISO 15927-6:2008. *Prestazione termoigrometrica degli edifici. Calcolo e presentazione dei dati climatici. Parte 6: Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno)*.

- Direttiva 2010/31/UE. *Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia*.

- Commissione Europea, 2012. *Orientamenti che accompagnano il regolamento delegato (UE) n. 244/2012 del 16 gennaio 2012 della Commissione che integra la direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia*.

- ANSI/ASHRAE Standard 169-2013. *Climatic Data for Building Design Standards*.

- Ministero dello Sviluppo Economico, 2013. *Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica (Direttiva 2010/31/UE art. 5)*.

- Decreto Interministeriale 26/06/2015. *Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*.

- Decreto Interministeriale 26/06/2015, Allegato 1. *Criteri generali e requisiti delle prestazioni energetiche degli edifici*.

- Decreto Interministeriale 26/06/2015, Allegato 1, Appendice A. *Descrizione dell'edificio di riferimento e parametri di verifica*.

- Direttiva 2018/844/UE. *Direttiva 2018/844/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 30 maggio 2018 che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica*.

- UNI EN 16798-1:2019. *Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica*.

- UNI CEN/TR 16798-2:2020. *Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 2: Interpretazione dei requisiti della norma EN 16798-1.*