

Climate, Landscape and Bioclimatics: Dynamic Integrations and Changes

Original

Climate, Landscape and Bioclimatics: Dynamic Integrations and Changes / Chiesa, Giacomo; Jahanirahaei, Ali. - In: SUSTAINABLE MEDITERRANEAN CONSTRUCTION. - ISSN 2420-8213. - ELETTRONICO. - 21:(2025), pp. 37-42. [10.69148/SMC-2025-21-037]

Availability:

This version is available at: 11583/3002649 since: 2025-08-29T13:19:01Z

Publisher:

Luciano Editore

Published

DOI:10.69148/SMC-2025-21-037

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

CLIMATE, LANDSCAPE AND BIOCLIMATICS: DYNAMIC INTEGRATIONS AND CHANGES

¹ Politecnico di Torino, Department of Architecture and Design, Viale Mattioli 39, 10125, Turin, Italy

Abstract

The landscape, as a synthesis of natural and cultural elements, is deeply influenced by climate, shaping its biological, geological, and anthropic characteristics. Climate change disrupts this balance, introducing new environmental risks and impacting sustainable architectural solutions. This paper explores climate as a defining factor in Mediterranean landscapes, analyzing its transformation through EUROCORDEX climate models and the Köppen-Geiger classification. A Python-based tool, developed within two EU-funded projects, calculates the local climate zones and evaluates the applicability of bioclimatic technologies using updated Givoni-Milne charts. The results reveal the shifting of climate zones, with warmer, drier conditions moving northward, affecting passive strategies such as solar gains, natural ventilation, and thermal mass. These findings provide insights for environmental designers, local authorities, and policymakers to optimize sustainable building practices in response to climate change, ensuring resilience in architectural design.

Keywords: *Climate-sensitive landscapes, Bioclimatic adaptation, Landscape resilience, Climate change impact, Sustainable design strategies*

Introduction

The concept of landscape has evolved significantly over time. Traditionally, landscape was associated with aesthetic beauty, often limited to picturesque natural scenery or designed environments. However, the European Landscape Convention (ELC) redefines landscape as “an area, as perceived by people, whose character is the result of the action and interaction of natural and/or human factors” [1]. This definition broadens the scope of landscape, acknowledging that all territories, urban, rural, industrial, and natural, are landscapes shaped by both environmental and human influences [1][2].

Given this perspective, the landscape is not a static entity; it is a **dynamic** system deeply interconnected with human activities [3]. Agriculture, urbanization, infrastructure development, and industrialization continuously transform landscapes, sometimes leading to unintended consequences such as

habitat loss, soil degradation, and shifts in biodiversity. Recognizing this interplay between human actions and the environment, landscape preservation becomes essential, not merely for aesthetic reasons, but to maintain the structured relationship between territory and living beings. Among the various forces shaping the landscape, climate plays a fundamental role. The characteristics of a landscape (vegetation, biodiversity, water resources, and even the way human settlements are structured) are largely determined by local climatic conditions [4] [5]. For centuries, regional climates have influenced how societies build, farm, and adapt to their surroundings. However, with climate change, this once-stable relationship is becoming increasingly uncertain [6]. Rising temperatures, shifting precipitation patterns, and extreme weather events are altering the environmental conditions that have long-defined landscapes. As climate is no longer a fixed parameter but a fluctuating and unpredictable factor, understanding its impact on landscapes becomes critical [7]. The transformation of ecosystems, the migration of plant and animal species, and even changes in human behavior, such as urban planning adjustments in response to hotter climates, demonstrate how landscapes must continuously adapt. For example, the way people live and interact with their environment differs significantly between Northern Europe and Africa, where climatic conditions shape not only ecological characteristics but also cultural, proxemic, and architectural responses [8].

This paper explores how future climate models predict shifts in climate classifications across Europe and what these changes mean for the landscape. Using the Köppen climate classification, we analyze how different climate zones are projected to shift due to global warming. Additionally, we investigate changes in bioclimatic comfort conditions using the Givoni bioclimatic chart, which assesses human thermal comfort based on climatic factors [9] [10]. By integrating these analyses, we aim to demonstrate that landscapes are not only a function of climate but also a subject of climate-induced transformation, requiring new strategies for sustainable adaptation and preservation.

Background

The Köppen Climate Classification is one of the

most widely used systems for categorizing global climates based on temperature and precipitation patterns. This classification system divides the Earth's climate into five primary groups: tropical (A), dry (B), temperate (C), continental (D), and polar (E), each further subdivided based on specific temperature and precipitation thresholds (tables 1 and 2)[11]. The system assumes that vegetation distribution serves as an indicator of climatic conditions, integrating both thermal and hydrological variables to define distinct climatic zones. The classification is determined by long-term meteorological data, typically spanning several decades, and relies on empirical thresholds that reflect the fundamental climatic constraints affecting ecosystems and human settlements [12]. The Köppen system has been widely employed in climatology, biogeography, and environmental sciences due to its ability to provide an intuitive yet scientifically rigorous framework for understanding climatic regions. Recent applications extend to climate change studies, where shifts in Köppen-defined zones serve as indicators of broader climatic transformations.

In the context of architectural and environmental design, this classification aids in evaluating the applicability of bioclimatic technologies, aligning built environments with evolving climatic constraints to ensure sustainability and resilience [13] [14]. As climate change progresses, these classifications are shifting, altering vegetation patterns, water availability, soil characteristics, and human settlements. These changes directly affect landscape dynamics, influencing biodiversity, agricultural productivity, urban planning, and natural ecosystem resilience. Understanding these transformations is critical for developing sustainable adaptation strategies that align with evolving climatic conditions.

Vernacular Architecture as a Climate-Responsive Element of Landscape

Throughout history, human societies have adapted their built environments to the prevailing climate and landscape conditions, leading to the development of vernacular architecture—a form of construction that is deeply rooted in local climate, materials, and cultural practices. Traditional buildings are intrinsically designed to optimize thermal comfort and energy efficiency, making them inherently bioclimatic structures [15].

the effectiveness of bioclimatic design

Type	Description	Criterion
A	Equatorial climates	$T_{min} \geq +18\text{ }^{\circ}\text{C}$
<i>Af</i>	Equatorial rainforest, fully humid	$P_{min} \geq 60\text{ mm}$
<i>Am</i>	Equatorial monsoon	$P_{ann} \geq 25 (100 - P_{min})$
<i>As</i>	Equatorial savannah with dry summer	$P_{min} < 60\text{ mm in summer}$
<i>Aw</i>	Equatorial savannah with dry winter	$P_{min} < 60\text{ mm in winter}$
B	Arid climates	$P_{ann} < 10 P_{th}$
<i>BS</i>	Steppe climate	$P_{ann} > 5 P_{th}$
<i>BW</i>	Desert climate	$P_{ann} \leq 5 P_{th}$
C	Warm temperate climates	$-3\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{min} < +18\text{ }^{\circ}\text{C}$
<i>Cs</i>	Warm temperate climate with dry summer	$P_{smin} < P_{wmin}, P_{wmax} > 3 P_{smin}$ and $P_{smin} < 40\text{ mm}$
<i>Cw</i>	Warm temperate climate with dry winter	$P_{wmin} < P_{smin}$ and $P_{smax} > 10 P_{wmin}$
<i>Cf</i>	Warm temperate climate, fully humid	neither <i>Cs</i> nor <i>Cw</i>
D	Snow climates	$T_{min} \leq -3\text{ }^{\circ}\text{C}$
<i>Ds</i>	Snow climate with dry summer	$P_{smin} < P_{wmin}, P_{wmax} > 3 P_{smin}$ and $P_{smin} < 40\text{ mm}$
<i>Dw</i>	Snow climate with dry winter	$P_{wmin} < P_{smin}$ and $P_{smax} > 10 P_{wmin}$
<i>Df</i>	Snow climate, fully humid	neither <i>Ds</i> nor <i>Dw</i>
E	Polar climates	$T_{max} < +10\text{ }^{\circ}\text{C}$
<i>ET</i>	Tundra climate	$0\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{max} < +10\text{ }^{\circ}\text{C}$
<i>EF</i>	Frost climate	$T_{max} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tab.1 – Applied criterion for the climate classification by Köppen-Geiger (P=precipitation, T=Temperature; Min=Minimum, Max=Maximum, ann=annual, s=summer, w=winter, th=threshold)

Type	Description	Criterion
<i>h</i>	Hot steppe/desert	$T_{ann} \geq +18\text{ }^{\circ}\text{C}$
<i>k</i>	Cold steppe/desert	$T_{ann} < +18\text{ }^{\circ}\text{C}$
<i>a</i>	Hot summer	$T_{max} \geq +22\text{ }^{\circ}\text{C}$
<i>b</i>	Warm summer	not (a) and at least 4 $T_{mon} \geq +10\text{ }^{\circ}\text{C}$
<i>c</i>	Cool summer and cold winter	not (b) and $T_{min} > -38\text{ }^{\circ}\text{C}$
<i>d</i>	Extremely continental	like (c) but $T_{min} \leq -38\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tab.2 – Applied criterion for the third letter used in climate classification by Köppen-Geiger

For example, in hot arid regions, structures with thick walls and small windows minimize heat gain while ensuring indoor cooling through thermal mass. In humid tropical areas, elevated buildings with large openings and shading elements promote natural ventilation. Similarly, in cold climates, dwellings are often compact with steep roofs to prevent snow accumulation and retain heat. These architectural adaptations demonstrate how landscapes, climate, and human-built environments are interdependent [16]. As climate zones shift due to global warming, the relevance and applicability of vernacular strategies in different regions may change. A cooling Mediterranean region, for instance, may require adjustments in traditional shading and ventilation strategies, while a warming continental zone might see an increased need for passive cooling techniques [10]. This reinforces the idea that landscape transformation is not only ecological but also architectural and cultural, requiring a holistic approach to adaptation.

Objectives and Novelties

This study aims to explore the evolving relationship between climate and landscape transformation by analyzing future projections of the Köppen Climate Classification in Europe. As climate change alters established climatic zones, its impact extends beyond temperature and precipitation variations, influencing ecological systems, vernacular architecture, and

strategies. This research seeks to bridge the gap between climate science and landscape studies by providing a systematic assessment of how shifting climate classifications will affect landscape characteristics and adaptation strategies.

The key objectives of this study are:

- to analyze the evolution of Köppen climate zones in Europe under future climate models, identifying spatial and temporal shifts that may redefine regional climatic identities;
- to assess the implications of these shifts on landscape characteristics, including vegetation patterns, biodiversity, and human adaptation strategies;
- to evaluate how the transformation of climate zones influences the applicability of passive bioclimatic design strategies, particularly through the Givoni bioclimatic chart;
- to develop a framework for integrating climate-responsive landscape planning, ensuring that future urban and architectural interventions align with changing climatic conditions.

Scientific Novelties

This study introduces several innovative contributions to the field of climate-responsive landscape planning:

- a new perspective on climatic regionalism: while traditional bioclimatic strategies are based on stable climatic zones, this study demonstrates how shifting climate classifications necessitate a dynamic and adaptable approach to sustainable landscape transformation;
- a methodology to quantify landscape change through climate models: by integrating Köppen climate classification projections with bioclimatic design tools, this research provides a data-driven method to assess landscape shifts across different regions;
- an interdisciplinary approach connecting

climate science, landscape planning, and architecture: the study contributes to a holistic understanding of how climate variability influences spatial planning, emphasizing the need for cross-disciplinary adaptation strategies;

- a tool for future-oriented landscape and architectural adaptation: the findings can serve as a foundation for decision-makers, urban planners, and architects to anticipate and mitigate climate-induced landscape transformations through adaptive design solutions.

By establishing these connections, this research reinforces the need for climate-aware landscape preservation and planning, ensuring that future developments are resilient to evolving environmental conditions.

Methodology

This study utilizes high-resolution climate projections to analyze shifts in Köppen climate classification and bioclimatic conditions across Europe. The workflow consists of climate data acquisition, processing, classification, and comparative analysis over different time periods.

Climate Data Acquisition

Climate model data were obtained from the EURO-CORDEX initiative via the Copernicus Climate Data Store [17] [18]. The dataset includes climate projections for the entire European region, covering the period 1970 to 2100, with multiple meteorological variables extracted for analysis. Four climate models were selected, each simulated under three different future Representative Concentration Pathways (RCP) (Table 3). The data were downloaded in NetCDF4 format.

To facilitate analysis, Average Meteorological Year (AvMY) files were generated for defined historical and future periods (Table 4).

Historical periods	Future periods
1970-1989 1990-2005	2010-2029
	2030-2049
	2050-2069
	2070-2089
	2090-2100

Tab. 4 – The defined climate reference periods.

Köppen Climate Classification Computation

The Köppen Climate Classification criteria were coded in CDO-Python by the authors and applied to the processed NetCDF4 files. This script classified every coordinate point across Europe for each AvMY period, enabling the spatial tracking of climate zone transitions over time.

Bioclimatic Analysis – Givoni Psychrometric Chart

Using the same climate dataset, the number of hours within specific bioclimatic comfort zones was computed based on the Givoni psychrometric chart [9]. Each grid cell's hourly climatic conditions were analyzed, classifying the number of hours falling into each comfort or discomfort zone (Figure 1) [19].

RCP	GCM	RCM	RCP_GCM_RCM Short name
8.5	MPI-M-MPI-ESM-LR	SMHI-RCA4	85_mpi_rac4
4.5	MPI-M-MPI-ESM-LR	SMHI-RCA4	45_mpi_rac4
2.6	MPI-M-MPI-ESM-LR	SMHI-RCA4	26_mpi_rac4
historical	MPI-M-MPI-ESM-LR	SMHI-RCA4	hist_mpi_rac4
8.5	NCC-NorESM1-M	SMHI-RCA4	85_ncc_rca4
4.5	NCC-NorESM1-M	SMHI-RCA4	45_ncc_rca4
2.6	NCC-NorESM1-M	SMHI-RCA4	26_ncc_rca4
historical	NCC-NorESM1-M	SMHI-RCA4	hist_ncc_rca4
8.5	MOHC-HadGEM2-E5	SMHI-RCA4	85_mohc_rca4
4.5	MOHC-HadGEM2-E5	SMHI-RCA4	45_mohc_rca4
2.6	MOHC-HadGEM2-E5	SMHI-RCA4	26_mohc_rca4
historical	MOHC-HadGEM2-E5	SMHI-RCA4	hist_mohc_rca4
8.5	CNRM-CERFACS-CM5	KNMI-RACMO22E	85_cnrm_racmo22e
4.5	CNRM-CERFACS-CM5	KNMI-RACMO22E	45_cnrm_racmo22e
2.6	CNRM-CERFACS-CM5	KNMI-RACMO22E	26_cnrm_racmo22e
historical	CNRM-CERFACS-CM5	KNMI-RACMO22E	hist_cnrm_racmo22e

Tab.3 – List of the analyzed climate models and their projections (RCP=Representative Concentration Pathways; GCM= Global Climate Model; RCM= Regional Climate Model)

Bioclimatic chart

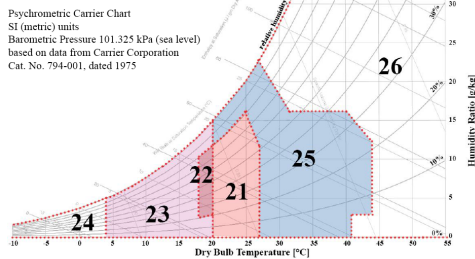


Fig.1 – The proposed bioclimatic chart zoning distribution – aggregated bioclimatic technology potentialities for heating and cooling

- Zone 21: Extended comfort thermal zone conditions;
- Zone 22: Additional comfort thermal zone, including winter clothing adaptation;
- Zone 23: Discomfort potentially turned to comfort by exploiting passive/active solar gains;
- Zone 24: Residual heating discomfort zone/heating system activation hours;
- Zone 25: Discomfort potentially turned to comfort by exploiting natural/passive cooling solutions;
- Zone 26: Residual cooling discomfort zone/cooling system activation hours.

A separate CDO-Python script was developed to compute the total number of hours spent in each bioclimatic zone. To assess the long-term impact of climate change, the variation in these comfort/discomfort hours was calculated by comparing historical (1970–1989) and far-future (2090–2100) AvMY periods. The delta values highlight the projected shifts in bioclimatic conditions across Europe, revealing potential challenges and adaptation needs for landscape and built environment planning.

Results

In this section, the results are presented for one selected climate model and one of its projections across historical and future periods. The methodology has been applied to all selected models and projections; however, for clarity and brevity, results from the 85_mpi_rca4 model are showcased here. The RCP 8.5 projection from this model is used to highlight key trends and shifts in climate classification and bioclimatic zones over time.

Köppen Climate Classification Results

The figures below (fig 2-5) illustrate the Köppen Climate Classification for different periods based on the 85_mpi_rca4 climate model. These figures show the spatial distribution of climate classes across Europe from the historical period (1970–1989) to the far future period (2090–2100). The shift in climate classes between these periods is immediately evident and points to significant changes driven by climate change.

Southern Europe:

The most notable shift is observed in Southern Europe, particularly in Spain, Portugal, and France. These regions, which were historically

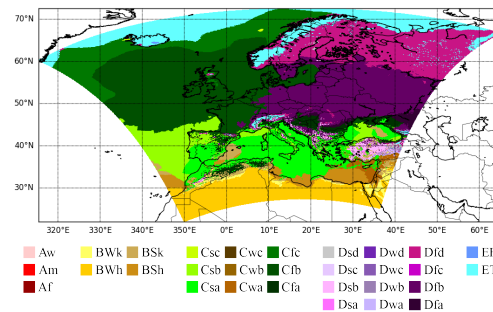


Fig.2 – hist_mpi_rca4 period 1970-1989

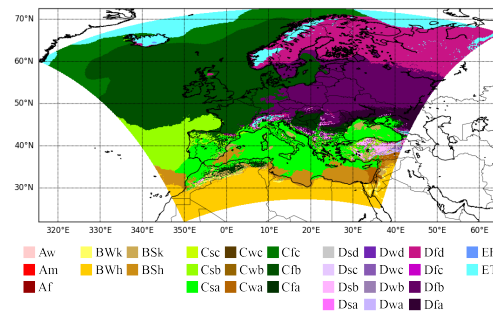


Fig.3 – 85_mpi_rca4 period 2010-2029

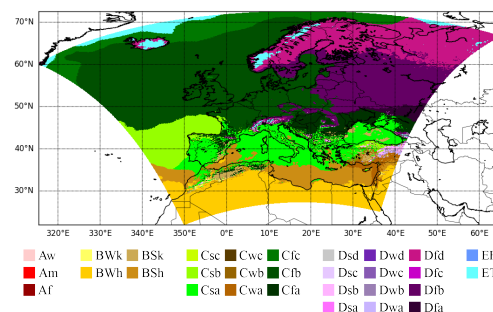


Fig.4 – 85_mpi_rca4 period 2050-2069

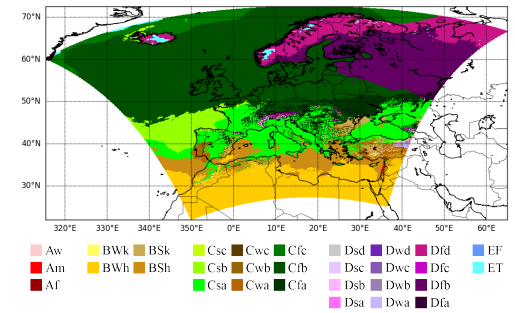


Fig.5 – 85_mpi_rca4 period 2090-2100

classified as Cf (temperate oceanic climate), have moved towards Cs (Mediterranean climate) and even Cw (subtropical highland climate). This shift reflects a general increase in temperature and a reduction in precipitation, in line with the expected effects of climate change in the region. Additionally, Mediterranean and North African territories, which previously exhibited Cf characteristics, are expected to transition entirely to Cs (Mediterranean climate) and BS (semi-arid climate) in the future. This change further emphasizes the trend of rising temperatures and decreasing precipitation in these areas, highlighting the broader regional shifts due to climate change. Central Europe:

In Central Europe, particularly in Germany, the climate has shifted from D (continental climate) to C (temperate climate). This change signals a warming trend, with winters becoming milder and summers becoming more pronounced.

Northern Europe:

The E (polar climate) class is nearly absent in the northern European territories when comparing the historical period (1970–1989) with the future (2090–2100). This reflects a dramatic warming of the Arctic regions, with significant implications for the ecosystems, landscapes, and human activities in the region. The shifts in climate zones indicate a general northward migration of hotter and drier climates, marking a clear indication of climate change's impact on European landscapes. These transitions highlight the vulnerability of various regions and suggest that certain areas will no longer fit into their current climate classes, affecting both the environment and the people living in these landscapes.

Givoni Bioclimatic Chart Results

This section presents the results of the comparison between the number of hours spent in each zone of the Givoni Bioclimatic Chart, focusing on the historical period (1990-2005) and the far future (2090-2100). Figure 6 illustrates the delta in the number of hours spent in Zones 25 and 26 combined. This figure clearly shows that southern European territories are facing a 20-40% increase in the hours spent in these zones, which correspond to higher discomfort due to residual heating and cooling needs. Conversely, northern territories of Europe show little to no increase in hours within these zones. In contrast, Figure 7 presents the delta for Zones 23 and 24 combined. Here, southern territories experience a 10-20% decrease in the number of hours spent in these zones,

indicating a shift toward more comfortable thermal conditions. This pattern continues northward, with the change visible up to northern Germany. Northern European countries, however, show little to no change in the number of hours in these zones.

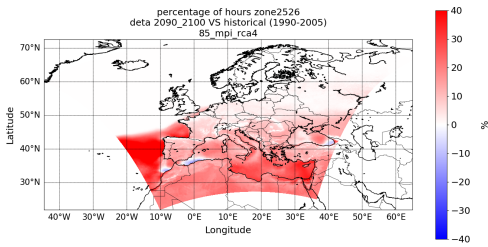


Fig.6 – Delta of the percentage of hours in zones 25 and 26 (historical VS far future in model 85_mpi_rca4)

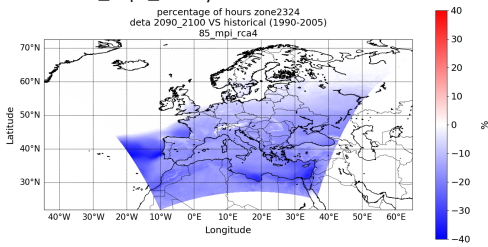


Fig.7 – Delta of the percentage of hours in zones 23 and 24 (historical VS far future in model 85_mpi_rca4)

To further clarify, Figure 8 highlights Zone 23, which represents conditions of additional comfort. The data reveals that the northern parts of Europe will experience a 20-30% increase in the number of hours spent in Zone 23. This shift can be attributed to the transfer of hours from Zone 24 (colder conditions) to Zone 23, leading to an overall increase in hours within this more comfortable range. In contrast, southern Europe shows a 10-20% decrease in Zone 23 hours, as thermal conditions shift towards Zones 21 and 25, which correspond to more extreme comfort or discomfort conditions.

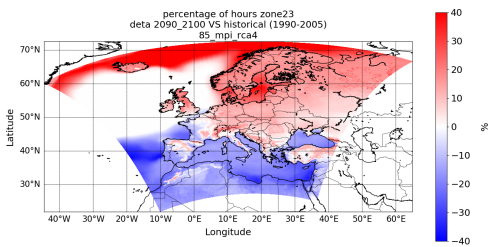


Fig.8 – Delta of the percentage of hours in zone 23 (historical VS far future, model 85_mpi_rca4)

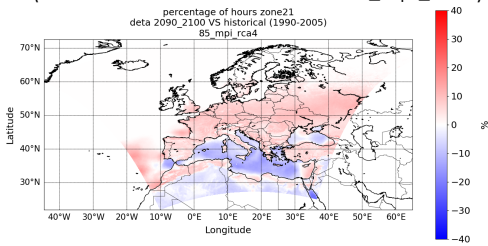


Fig.9 – Delta of the percentage of hours in zone 21 (historical VS far future, model 85_mpi_rca4)

Lastly, Figure 9, which illustrates Zone 21 (comfort), shows a slight increase in the number of hours in central Europe. However, northern African regions show a decrease in hours within Zone 21, reflecting the shifting

thermal conditions due to climate change.

Conclusion

This study highlights the dynamic relationship between climate change and landscape, particularly focusing on how future shifts in climate classifications and bioclimatic zones may influence European territories. The results show significant changes in the Köppen climate classes and Givoni bioclimatic zones. The analysis of the mpi_rca4 climate model, RCP 8.5 projection, demonstrates a clear movement of hotter and drier climates from southern to northern Europe, which has profound implications for both the natural environment and the built environment. As the climate zones shift, the landscape (including vegetation, animal habitats, and human settlements) will need to adapt to the new climatic realities. This transformation emphasizes the need for robust planning strategies that integrate climate change projections into landscape and architectural design.

The bioclimatic analysis further reinforces the impact of these climatic shifts, with southern Europe facing increased discomfort due to cooling demands, while northern Europe shows a shift toward more moderate and comfortable thermal conditions. These findings highlight the importance of bioclimatic design in mitigating the effects of climate change, particularly through passive strategies tailored to the new climatic conditions.

However, an emerging challenge lies in the misapplication of northern-based energy efficiency methodologies, such as the Passivhaus concept, in the southern regions of Europe [20]. The application of technologies suited for colder climates is not as effective in warmer southern areas, such as southern Italy, where they may result in energy inefficiencies. This paradox highlights the need for further research to develop region-specific, adaptive building techniques for each climatic zone. Conversely, northern Europe may benefit from greater attention to free-running technologies that minimize energy consumption while adapting to the more moderate and warming climate.

Overall, this paper contributes to the growing body of knowledge on the interplay between climate change, bioclimatics, and landscape, offering valuable insights for architects, urban planners, and policymakers. By integrating climate models into landscape design and bioclimatic architecture, we can better understand how to preserve and adapt our landscapes in the face of a changing climate, ensuring sustainability and resilience for future generations.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under Grant Agreement N° 958345 (PRELUDE project).

REFERENCES

[1] Council of Europe (2004). Council of Europe Landscape Convention (ETS No. 176). Retrieved from <https://rm.coe.int/16807b6bc7>

- [2] Council of Europe (2021). Protocol amending the European Landscape Convention (CETS No. 219). Retrieved from <https://rm.coe.int/168072d121>.
- [3] Erle, C.E. & Ramankutty, N. (2008). Putting People in the Map: Anthropogenic Biomes of the World. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6(8), 439-447. DOI: 10.1890/070062.
- [4] Fagan, B.F. (2019). *The Little Ice Age. How Climate Made History 1300-1850*. Updated ed. New York: Basic Books.
- [5] Fitch, J.M. (1975). *American Building: The Environmental Forces that Shape It*. New York: Schocken Books.
- [6] Filho, W.L., Barbir, W.J. & Preziosi, R. (eds.) (2019). *Handbook of Climate Change and Biodiversity*. Cham: Springer.
- [7] Chiesa, G. & von Hardenberg, J. (2020) Including climate change time-dimensions in bioclimatic design. *Techné*, 20, 204-212. DOI: 10.13128/techné-8179
- [8] Hall, E.T. (1990). *The hidden dimension*. New York: Anchor Books.
- [9] Milne, M. & Givoni, B. (1979). Architectural design based on climate. In: D. Watson (Ed.), *Energy Conservation through Building Design*, New York: McGraw Hill: 96-113.
- [10] M. Košir, M. (2019). *Climate adaptability of buildings: bioclimatic design in the light of climate change*. Cham: Springer.
- [11] Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259-263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130
- [12] G. Chiesa, G. (ed.) (2021). *Bioclimatic Approaches in Urban and Building Design*. Cham: Springer.
- [13] Olgay, V. (2015) *Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism*, New and expanded ed. Princeton: Princeton University Press.
- [14] Grosso, M. (ed.) (2017). *Il raffrescamento passivo degli edifici*, IV ed. Sant'Arcangelo di Romagna: Maggioli.
- [15] Sayigh, A. (ed.) (2019). *Sustainable vernacular architecture: how the past can enrich the future*. New York: Springer.
- [16] De Joanna, P. & A. Passaro, A. (eds.) (2019). *Sustainable technologies for the enhancement of the natural landscape and of the built environment*. Napoli: LucianoEditore.
- [17] World Climate Research Programme (2024). EURO-CORDEX - Coordinated Downscaling Experiment - European Domain, Euro-Cordex. Retrieved from <https://www.euro-cordex.net/>
- [18] Copernicus Climate Data Store (2025). Projections from the EURO-CORDEX initiative. Retrieved from <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/projections-cordex-domains-single-levels?tab=download>
- [19] Chiesa, G. (ed.) (2024). *D8.5: Climate resilience models*. PRELUDE EU project (GA 958345). Retrieved from <https://prelude-project.eu/results/deliverables/>
- [20] Costanzo, V., Fabbri, K. & Piraccini, S. (2018). Stressing the passive behavior of a Passivhaus: An evidence-based scenario analysis for a Mediterranean case study. *Building and Environment*, 142, 265-277. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.06.035.

CLIMA, PAESAGGIO E BIOCLIMATICA: INTEGRAZIONI DINAMICHE E CAMBIAMENTO

Riassunto

Il paesaggio, come sintesi di elementi naturali e culturali, è profondamente influenzato dal clima, che modella le sue caratteristiche biologiche, geologiche e antropiche. Il cambiamento climatico altera questo

equilibrio, introducendo nuovi rischi ambientali e impattando sulle soluzioni architettoniche sostenibili. Questo studio esplora il clima come fattore caratterizzante dei paesaggi mediterranei, analizzandone la trasformazione temporale attraverso i modelli climatici EURO-CORDEX e la classificazione di Köppen-Geiger. Una libreria Python, sviluppata nel corso di due progetti H2020 finanziati dall'UE, calcola le zone climatiche locali e valuta l'applicabilità delle tecnologie bioclimatiche utilizzando una versione aggiornata dei diagrammi di Givoni-Milne. I risultati rivelano il mutamento delle zone climatiche, con una migrazione delle condizioni più calde e verso nord, influenzando l'applicabilità delle strategie passive, come i guadagni solari, la ventilazione naturale e l'attivazione della massa termica. Questi risultati offrono spunti utili per i progettisti ambientali, le autorità locali e i responsabili delle politiche correlate, al fine di ottimizzare le pratiche edilizie sostenibili in risposta al cambiamento climatico, garantendo la resilienza nel progetto architettonico.

Parole-chiave: Paesaggi sensibili al clima, Adattamento bioclimatico, Resilienza del paesaggio, Impatti del cambiamento climatico, Strategie di progettazione sostenibile

Introduzione

Il concetto di paesaggio è evoluto significativamente nel tempo. Tradizionalmente, il paesaggio era associato alla bellezza estetica, spesso limitata a scenari naturali o ambienti progettati pittoreschi. Tuttavia, la Convenzione Europea del Paesaggio (CEP) ridefinisce il paesaggio come "un territorio, così come percepito dalle persone, il cui carattere è il risultato dell'azione e dell'interazione di fattori naturali e/o umani" [1]. Questa definizione amplia il concetto di paesaggio, riconoscendo che tutti i territori, urbani, rurali, industriali e naturali, sono paesaggi, modellati sia da influenze ambientali, sia antropiche [1][2]. In questa prospettiva, il paesaggio non è un'entità statica; è un sistema dinamico profondamente interconnesso con le attività umane [3]. L'agricoltura, l'urbanizzazione, lo sviluppo delle infrastrutture e l'industrializzazione trasformano continuamente i paesaggi, talvolta portando a conseguenze indesiderate come la perdita di habitat, la degradazione del suolo e i cambiamenti nella biodiversità. Riconoscendo questa interazione tra le azioni umane e l'ambiente, la preservazione del paesaggio diventa essenziale, non solo per motivi estetici, ma per mantenere la relazione strutturata tra territorio e esseri viventi.

Tra le varie forze che modellano il paesaggio, il clima gioca un ruolo fondamentale. Le caratteristiche di un paesaggio (vegetazione, biodiversità, risorse idriche e persino la struttura degli insediamenti umani) sono in gran parte determinate dalle condizioni climatiche locali [4] [5].

Per secoli, i climi regionali hanno influenzato il modo in cui le società costruiscono, coltivano e si adattano ai loro ambienti. Con il cambiamento climatico, tuttavia, questa relazione un tempo stabile sta diventando sempre più incerta [6]. L'aumento delle temperature, i cambiamenti nelle precipitazioni e gli eventi climatici estremi stanno alterando le condizioni ambientali che per lungo tempo hanno definito i paesaggi.

Poiché il clima non è più un parametro fisso, ma un fattore dinamico [7], comprendere il suo impatto sui paesaggi diventa cruciale. La trasformazione degli ecosistemi, la migrazione delle specie vegetali e animali e anche i cambiamenti nel comportamento umano, come l'adozione di strumenti urbanistici e architettonici atti a rispondere all'incremento delle temperature nei climi locali, dimostrano come i paesaggi debbano adattarsi continuamente. Ad esempio, il modo in cui le persone vivono e interagiscono con l'ambiente differisce significativamente tra l'Europa settentrionale e il Nord Africa, dove le condizioni climatiche modellano non

solo le caratteristiche ecologiche, ma anche le risposte culturali e architettoniche, prossemiche dei luoghi [8]. Questo lavoro studia l'impatto dei modelli climatici futuri sui potenziali cambiamenti nelle classificazioni climatiche in tutta Europa e il significato di questi cambiamenti per il paesaggio. Utilizzando la classificazione climatica di Köppen, si analizza lo spostamento delle diverse zone climatiche causato dal riscaldamento globale. Inoltre, vengono studiati gli impatti di tali cambiamenti sulle potenziali di comfort bioclimatico locali, utilizzando il diagramma bioclimatico di Givoni, che valuta il comfort termico in base ai fattori climatici [9] [10]. Integrando queste analisi, si mira a dimostrare che i paesaggi non siano solo influenzati dal clima, ma anche soggetti a nuove trasformazioni indotta dal clima, necessitando di nuove strategie per l'adattamento e la preservazione sostenibile.

Il contesto

La Classificazione Climatica di Köppen è uno dei sistemi più ampiamente utilizzati per categorizzare i climi globali in base ai valori di temperatura e precipitazioni. Questo sistema di classificazione suddivide il clima terrestre in cinque gruppi principali: tropicale (A), secco (B), temperato (C), continentale (D) e polare (E), ognuno ulteriormente suddiviso in base a specifiche soglie di temperatura e precipitazioni (tabelle 1 e 2) [11]. Il metodo di classificazione si basa sull'assunzione che la distribuzione della vegetazione serva come indicatore delle condizioni climatiche, integrando variabili termiche e idrologiche per definire zone climatiche distinte. La classificazione è determinata dai dati meteorologici a lungo termine, che solitamente coprono decenni, e si basa su soglie empiriche che riflettono i vincoli climatici fondamentali che influenzano gli ecosistemi e gli insediamenti umani.

Il sistema di Köppen è stato ampiamente utilizzato in climatologia, biogeografia e scienze ambientali grazie alla sua capacità di fornire un quadro intuitivo ma scientificamente rigoroso per comprendere le regioni climatiche. Le applicazioni recenti si estendono agli studi sul cambiamento climatico, dove i cambiamenti nelle zone definite da Köppen fungono da indicatori di trasformazioni climatiche più ampie.

Nel contesto della progettazione architettonica e ambientale, questa classificazione aiuta a valutare l'applicabilità delle tecnologie bioclimatiche, allineando gli ambienti costruiti con i vincoli climatici in evoluzione per garantire sostenibilità e resilienza [13] [14]. Con il progredire del cambiamento climatico, la distribuzione geografica delle zone si sta spostando, alterando i modelli di vegetazione, la disponibilità di acqua, le caratteristiche del suolo e gli insediamenti umani. Questi cambiamenti influenzano direttamente la dinamica del paesaggio, incidendo sulla biodiversità, sulla produttività agricola, sull'urbanistica e sulla resilienza degli ecosistemi naturali. Comprendere queste trasformazioni è fondamentale per sviluppare strategie di adattamento sostenibile che si allineino con le condizioni climatiche in evoluzione.

L'Architettura Vernacolare come Elemento isponente al Clima nel Paesaggio

Nel corso della storia, le società umane hanno adattato il loro ambiente costruita alle condizioni climatiche e paesaggistiche prevalenti, come evidenziabile nell'architettura vernacolare—una forma di costruzione profondamente radicata nel clima locale, nei materiali e nelle pratiche culturali. Gli edifici tradizionali sono intrinsecamente progettati per ottimizzare il comfort termico e l'efficienza energetica, rendendoli strutture intrinsecamente bioclimatiche [15]. Ad esempio, nelle regioni calde e aride, le strutture con muri spessi e finestre piccole riducono il guadagno di calore, mentre garantiscono una minor temperatura interna attraverso l'attivazione delle masse termiche. Nelle aree tropicali umide, gli edifici si presentano con ampie aperture e consistenti elementi

di ombreggiamento, supportando la ventilazione naturale. Allo stesso modo, nei climi freddi, le abitazioni sono spesso compatte con tetti ripidi per prevenire l'accumulo di neve e trattenere il calore. Questi adattamenti architettonici dimostrano come i paesaggi, il clima e gli ambienti costruiti dall'uomo siano interdipendenti [16].

Con il cambiamento delle zone climatiche a causa del riscaldamento globale, la rilevanza e l'applicabilità delle strategie bioclimatiche nelle diverse regioni potrebbero cambiare. Una regione mediterranea che si sta raffreddando, ad esempio, potrebbe richiedere aggiustamenti nelle strategie tradizionali di ombreggiamento e ventilazione, mentre una zona continentale che si sta riscaldando potrebbe richiedere un incremento nella diffusione di tecniche di raffreddamento passivo [10]. Questo rafforza l'idea che la trasformazione del paesaggio non sia solo ecologica, ma anche architettonica e culturale, richiedendo un approccio olistico all'adattamento.

Obiettivi e Novità

Questo studio ha l'obiettivo di esplorare l'evoluzione della relazione tra clima e trasformazione del paesaggio analizzando le proiezioni future della classificazione climatica di Köppen in Europa. Poiché il cambiamento climatico altera l'attuale distribuzione delle zone climatiche, il suo impatto si estende oltre le variazioni di temperatura e precipitazioni, influenzando i sistemi ecologici, l'architettura sostenibile e l'efficacia delle strategie di progettazione bioclimatica. Questa ricerca cerca di colmare il divario tra la scienza del clima e gli studi sul paesaggio fornendo una valutazione sistematica di come i cambiamenti nelle classificazioni climatiche influenzeranno le caratteristiche del paesaggio e le strategie di adattamento.

Gli obiettivi principali di questo studio sono:

- analizzare l'evoluzione della distribuzione delle zone climatiche di Köppen in Europa considerando i modelli climatici futuri, identificando variazioni spaziali e temporali che potrebbero ridefinire le identità climatiche regionali;
- valutare le implicazioni di questi cambiamenti sulle caratteristiche del paesaggio, inclusi i modelli di vegetazione, la biodiversità e le strategie di adattamento umano;
- valutare come la trasformazione delle zone climatiche influenzi l'applicabilità delle strategie di progettazione bioclimatica passiva, in particolare attraverso il diagramma bioclimatico di Givoni;
- sviluppare un quadro per supportare potenziali future integrazioni alla pianificazione paesaggistica sensibile al clima, per allineare futuri interventi urbani e architettonici con le condizioni climatiche in evoluzione.

Novità Scientifiche

Questo studio introduce diverse innovazioni nel campo della pianificazione paesaggistica responsiva al clima:

- una nuova prospettiva sul regionalismo climatico: mentre le tradizionali strategie bioclimatiche si basano su zone climatiche stabili, questo studio dimostra come le classificazioni climatiche in evoluzione richiedono un approccio dinamico e adattabile supportando la trasformazione sostenibile del paesaggio;
- una metodologia per quantificare il cambiamento del paesaggio attraverso i modelli climatici: integrando le proiezioni della classificazione climatica di Köppen con gli strumenti di progettazione bioclimatica, questa ricerca fornisce un metodo basato sui dati per valutare i cambiamenti del paesaggio in diverse regioni;
- un approccio interdisciplinare che collega scienza del clima, pianificazione paesaggistica e architettura: lo studio contribuisce a una comprensione olistica di come la variabilità

climatica influenzi la pianificazione spaziale, enfatizzando la necessità di strategie di adattamento interdisciplinari;

uno strumento per l'adattamento del paesaggio e dell'architettura orientato al futuro: i risultati possono servire come base per decisori, pianificatori urbani e architetti al fine di anticipare e mitigare le trasformazioni paesaggistiche indotte dal cambiamento climatico attraverso soluzioni progettuali adattive.

Stabilendo queste connessioni, questa ricerca rafforza la necessità di una conservazione e pianificazione consapevole del paesaggio in relazione al clima, assicurando che i futuri sviluppi siano resilienti alle condizioni ambientali in evoluzione.

Metodologia

Questo studio utilizza proiezioni climatiche ad alta risoluzione per analizzare i cambiamenti nella classificazione climatica di Köppen e nelle condizioni bioclimatiche in Europa. Il flusso di lavoro comprende l'acquisizione dei dati climatici, l'elaborazione, la classificazione e l'analisi comparativa su diversi periodi temporali.

Acquisizione dei dati climatici

I dati dei modelli climatici sono ottenuti dall'iniziativa EURO-CORDEX tramite il Copernicus Climate Data Store [17] [18]. Il dataset include proiezioni climatiche per l'intera regione europea, coprendo il periodo dal 1970 al 2100, e fornisce le diverse variabili meteorologiche necessarie. Sono stati selezionati quattro modelli climatici, ciascuno simulato sotto tre differenti scenari climatici futuri (Tabella 3). I dati sono stati scaricati nel formato NetCDF4. Per facilitare l'analisi, sono stati generati file dell'Anno Meteorologico Medio (AvMY) per diversi periodi storici e futuri (Tabella 4).

Calcolo della classificazione climatica di Köppen

I criteri della classificazione climatica di Köppen sono stati codificati in CDO-Python e applicati ai file NetCDF4 elaborati. Questo script ha permesso di classificare ogni coppia di coordinate nel territorio europeo per ciascun periodo AvMY, consentendo il monitoraggio spaziale delle zone climatiche nel tempo.

Analisi bioclimatica – il diagramma psicrometrico di Givoni

Utilizzando lo stesso dataset climatico, è stato calcolato il numero di ore all'interno di specifiche zone di comfort bioclimatico basate sul diagramma psicrometrico di Givoni. Le condizioni climatiche orarie di ogni cella della griglia geografica sono state analizzate, classificando il numero di ore che rientrano in ciascuna zona del diagramma (Figura 1) [19]:
Zona 21: Condizioni di comfort termico esteso;
Zona 22: Zona di comfort termico aggiuntivo, incluso l'adattamento all'abbigliamento invernale;
Zona 23: Discomfort trasformabile in comfort sfruttando i guadagni solari passivi/attivi;
Zona 24: Discomfort residuo – ore di attivazione del sistema di riscaldamento;
Zona 25: Discomfort tramutabile in comfort sfruttando soluzioni di raffreddamento naturale/passivo;
Zona 26: Discomfort residuo – ore di attivazione del sistema di raffreddamento.

È stato sviluppato uno script separato in CDO-Python per calcolare il numero totale di ore per ciascuna zona bioclimatica. Per valutare l'impatto a lungo termine del cambiamento climatico, è stata calcolata la variazione di questi numeri di ore di comfort/discomfort confrontando i periodi storici (1970–1989) con quelli del lontano futuro (2090–2100). I delta calcolati tra le due serie di valori evidenziano i cambiamenti previsti nelle condizioni bioclimatiche in tutta Europa, rivelando le sfide potenziali e i bisogni di adattamento propri della pianificazione del paesaggio e dell'ambiente costruito.

Risultati

In questa sezione vengono presentati i risultati relativi ad uno dei modelli climatici selezionati, focalizzandosi su una delle sue proiezioni future. La metodologia è stata applicata a tutti i modelli e le proiezioni selezionate; tuttavia, per chiarezza e brevità, vengono mostrati qui i risultati del modello 85_mpi_rca4. La proiezione RCP 8.5 di questo modello è utilizzata per evidenziare le principali tendenze e i cambiamenti nel tempo delle classificazioni climatiche e delle zone bioclimatiche.

Risultati della classificazione climatica di Köppen

Le figure 2-5 illustrano la Classificazione Climatica di Köppen per i diversi periodi considerati in base al modello climatico 85_mpi_rca4. Queste figure mostrano la distribuzione spaziale delle classi climatiche in tutta Europa a partire dal periodo storico (1970–1989) sino al lontano futuro (2090–2100). Il cambiamento nelle classi climatiche tra questi periodi è immediatamente evidente.

Europa Meridionale: Il cambiamento più significativo si osserva nell'Europa meridionale, in particolare in Spagna, Portogallo e Francia. Queste regioni, che storicamente erano classificate come Cf (clima oceanico temperato), si stanno spostando verso il Cs (clima mediterraneo) e persino il Cw (clima subtropicale monsonico). Questo spostamento riflette un aumento generale della temperatura e una riduzione delle precipitazioni, in linea con gli effetti previsti del cambiamento climatico nella regione incluse le aree del nord dell'Africa e medio orientali.

Europa Centrale: In Europa centrale, in particolare in Germania, il clima tende a cambiare da D (clima continentale) a C (clima temperato). Questo cambiamento segnala una tendenza al riscaldamento, con inverni più miti e estati più pronunciate.

Europa Settentrionale: La classe E (clima polare) tende a divenire quasi assente nei territori del nord Europa quando si confrontano il periodo storico (1970–1989) e il lontano futuro (2090–2100). Questo riflette un consistente riscaldamento delle regioni artiche, con implicazioni significative per gli ecosistemi, i paesaggi e le attività umane nella regione.

I cambiamenti nelle zone climatiche indicano una progressiva migrazione generale verso nord dei climi più caldi e secchi, evidenziando un chiaro impatto del cambiamento climatico sui paesaggi europei. Queste transizioni evidenziano la vulnerabilità di varie regioni e suggeriscono che alcune aree saranno interessate da consistenti cambiamenti, con le relative difficoltà di adattamento, influenzando sia l'ambiente che le persone che vi abiteranno.

Risultati del diagramma bioclimatico di Givoni

Questa sezione presenta i risultati del confronto tra il numero di ore annuali in ciascuna zona del diagramma bioclimatico di Givoni, concentrandosi sul periodo storico (1990-2005) e sul futuro lontano (2090-2100). La Figura 6 illustra la variazione nel numero di ore sommando le Zone 25 e 26. Questa figura mostra chiaramente che i territori dell'Europa meridionale affonderanno un aumento del 20-40% delle ore previste in queste zone, corrispondenti a un maggiore disagio estivo e all'incremento del fabbisogno di raffrescamento. Differentemente, i territori del nord Europa mostrano un aumento minimo o nullo delle ore in queste zone. Al contrario, la Figura 7 presenta la variazione dovuta alla somma delle Zone 23 e 24. In questo caso, i territori meridionali mostrano una diminuzione del 10-20% del numero di ore, indicando una mitigazione delle condizioni termiche invernali. Lo stesso trend è riscontrabile muovendosi verso nord: il cambiamento è visibile fino alla Germania settentrionale. I paesi del nord Europa, tuttavia, mostrano un cambiamento limitato o nullo nel numero di ore in queste zone.

Per chiarire ulteriormente, la Figura 8 evidenzia la variazione nella Zona 23, che rappresenta condizioni di comfort aggiuntivo. I dati rivelano che le regioni

settentrionali dell'Europa saranno interessate da un aumento del 20-30% delle ore nella Zona 23. Questo cambiamento può essere attribuito al trasferimento di ore dalla Zona 24 (condizioni più fredde) alla Zona 23, incrementando il numero complessivo di ore in questa zona di applicabilità bioclimatica. Al contrario, l'Europa meridionale mostra una diminuzione del 10-20% delle ore nella Zona 23, poiché le condizioni termiche si sposteranno verso le Zone 21 e 25, che corrispondono a condizioni di comfort o discomfort bioclimatico estivo.

Infine, la Figura 9, Zona 21 (comfort), riporta un lieve aumento del numero di ore in Europa centrale. Le regioni del Nord Africa sono, invece, interessate da una diminuzione delle ore nella Zona 21, riflettendo gli incrementi termici dovuti al cambiamento climatico.

Conclusioni

Questo studio evidenzia la relazione dinamica che intercorre tra cambiamento climatico e paesaggio, concentrandosi in particolare su come i futuri spostamenti nelle classificazioni climatiche e nelle zone bioclimatiche possano influenzare i territori europei e mediterranei. I risultati mostrano cambiamenti significativi nelle classi climatiche di Köppen e nelle zone bioclimatiche di Givoni.

L'analisi del modello climatico 85_mpi_rca4 dimostra un chiaro spostamento dei climi più caldi e secchi propri dell'Europa meridionale verso quella settentrionale, con implicazioni profonde sia per l'ambiente naturale che per quello costruito. A fonte della progressione dello spostamento delle zone climatiche, il paesaggio (compresi vegetazione, habitat animali e insediamenti umani) dovrà adattarsi alle nuove realtà. Questa trasformazione sottolinea la necessità di sviluppare strategie di pianificazione resilienti che integrino le proiezioni del cambiamento climatico nella progettazione paesaggistica e architettonica.

L'analisi bioclimatica rafforza ulteriormente lo studio dell'impatto di questi spostamenti, evidenziando come l'Europa meridionale dovrà affrontare un aumento del disagio dovuto alla domanda di raffreddamento, mentre l'Europa settentrionale sarà interessata da un incremento delle condizioni termiche più miti e confortevoli. Questi risultati evidenziano l'importanza della progettazione bioclimatica per mitigare gli effetti del cambiamento climatico, in particolare attraverso strategie passive adattate alle nuove condizioni climatico-locali.

Una sfida emergente risiede, tuttavia, nel ripensare ai rischi di un'impropria applicazione dei metodi di efficientamento energetico basati sui modelli dell'Europa settentrionale, come il concetto di passivhaus, nelle regioni meridionali [20].

L'applicazione di tecnologie adatte a climi più freddi non è altrettanto efficace nelle aree meridionali più calde, come il sud Italia, dove si aumenta il rischio di surriscaldamento. Questo paradosso evidenzia la necessità di ulteriori ricerche per sviluppare tecniche edilizie adattative specifiche per ciascuna zona climatica. Al contrario, l'Europa settentrionale potrebbe beneficiare di una maggiore attenzione alle tecnologie passive che riducono il consumo energetico, adattandosi al clima più moderato e in riscaldamento. Nel complesso, questo lavoro contribuisce alla crescente conoscenza dell'interazione tra cambiamento climatico, bioclimatica e paesaggio, offrendo spunti preziosi per architetti, urbanisti e responsabili delle politiche locali. Integrando i modelli climatici nella progettazione del paesaggio e nell'architettura bioclimatica, possiamo comprendere meglio come preservare e adattare i nostri paesaggi di fronte a un clima in cambiamento, garantendo sostenibilità e resilienza per le generazioni future.