

Giacomo Chiesa<sup>1</sup>, Jost von Hardenberg<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, Italia

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, Politecnico di Torino, Italia

giacomo.chiesa@polito.it

jost.hardenberg@polito.it

**Abstract.** Tradizionalmente la progettazione bioclimatica considera il clima come una proprietà intrinseca di un luogo. I recenti cambiamenti dimostrano, tuttavia, come il clima sia un parametro dipendente dal tempo. La ricerca ibrida climatologia e progettazione bioclimatica, evidenziando, tramite un database di rianalisi climatica molto recente e ad alta risoluzione (ERA5-Land), l'impatto che i cambiamenti climatici hanno nel breve termine su noti indicatori climatici di progetto. Il contributo sviluppa una mappatura europea delle variazioni di gradi-giorno (1981-95; 2004-18), studia i giorni tipo mensili e analizza per alcune località i diagrammi bioclimatici. I risultati sottolineano la necessità di includere i cambiamenti climatici sin dalle prime fasi di progetto.

**Parole chiave:** Cambiamenti climatici; ERA5; Progettazione bioclimatica; TMY; Resilienza climatica.

## Introduzione

L'esistenza di correlazioni tra clima e scelte progettuali è nota sin dall'antichità, citata da Vitruvio e rilevabile in numerosi esempi di architettura vernacolare (Rudofsky, 1964) e tradizionale includendo «soluzioni implicite a problemi climatici» (Koenigsberg *et al.*, 1975). Tale relazione è stata studiata considerando scenari «a breve termine» (dimensione del progetto edilizio) e scenari a lungo termine, analizzando la correlazione paleoclimatologica tra clima e civiltà (Chiesa, 2020), come ad esempio l'espansione e la caduta della città di Ur (Fagan, 2004). Tuttavia, focalizzandosi sulla sola dimensione progettuale, è evidente un adattamento inconscio tra scelte tecnologiche tradizionali e condizioni climatiche, es. la riduzione delle dispersioni termiche nei climi freddi o la prevenzione e mitigazione dei guadagni di termici nei climi caldi. La diffusione di approcci bioclimatici alla progettazione degli edifici – dagli anni '60 (es. Victor e Aladar Olgyay) e in particolare dagli anni '70 – ha permesso di definire

una correlazione metodologica e scientifica tra clima e architettura per delineare soluzioni progettuali in grado di garantire condizioni di comfort massimizzando l'impiego di tecniche passive e naturali per contenere il fabbisogno di energia fossile. Il contributo fa riferimento all'approccio progettuale bioclimatico, tecnologico e ambientale, definito in Italia dell'area della tecnologia dell'architettura (Rogora, 2012; Grosso, 2017). Assumendo l'approccio metaprogettuale descritto in (Chiesa and Grosso, 2017). La ricerca si concentra sullo studio degli impatti indotti sul progetto bioclimatico da variazioni temporali dei dati climatici. Essendo il clima la rappresentazione media (ed altre statistiche) nel tempo delle condizioni meteorologiche locali (temperatura, umidità, radiazione, vento, ecc.), è culturalmente considerato in fase di progetto come una proprietà fissa caratteristica di un luogo. Tuttavia, i recenti cambiamenti dimostrano come tale visione dovrebbe essere modificata. I cambiamenti climatici stanno diventando più rapidi e in grado di incidere sulle prestazioni previste non solo a lungo termine, ma anche durante la vita utile degli edifici, richiedendo nuovi paradigmi progettuali, in cui il clima è una variabile temporale che influenza la flessibilità e la resilienza del progetto.

L'articolo, ibridando climatologia e progetto bioclimatico, mira a descrivere questa nuova dimensione temporale che collega la bioclimatica ai dati climatici, dimostrando e discutendo tali implicazioni sulla base dell'elaborazione di dati meteorologici recenti ad alta risoluzione per l'intero territorio europeo. Tale recente database ERA5-Land (C3S, 2019) consente di sviluppare uno studio innovativo e dettagliato sulle variazioni climatiche relative alla tematica architettonica. Il dataset presenta una di-

## Including climate change time-dimensions in bioclimatic design

**Abstract.** Traditionally, green design considers climate as a fixed property of a specific place. Nevertheless, recent changes demonstrate that this vision has to be reversed, considering climate a time-dependent parameter. This paper hybridises climatology and bioclimatic design underlining, thanks to the usage of a very recent high resolution climate reanalysis database (ERA5-Land), the impact that climate changes have on short-term periods, adopting well known building climate-related indicators. European maps are drawn considering degree-days variations (from 1981-95 to 2004-18), while typical mean 24-hour monthly days and bioclimatic charts are adopted for a limited number of locations. Results support the need to adopt climate data time variations during design phases.

**Keywords:** Climate changes; ERA5; Bioclimatic design; TMY; Climate resilience.

## Introduction

Direct correlations between climate and architectural choices were known since ancient times. They were mentioned by Vitruvius and can be noticed in several vernacular examples (Rudofsky, 1964) and in traditional buildings, which generally include «sound solutions of climatic problems» (Koenigsberg *et al.*, 1975). This association is studied considering both «short-term» scenarios (building design dimension and microclimate), and long-term scenarios, considering the paleoclimatological correlation between climate and civilisation (Chiesa, 2020), such as in the expansion and fall of the city of Ur (Fagan, 2004). Nevertheless, focusing only on the design dimension, an unconscious adaptation of building technological design choices and climatic conditions is evident, e.g., to avoid heat losses in

cold climates or for heat gain prevention and mitigation in hot ones. The diffusion of bioclimatic approaches to building design – since the 60's (e.g., Victor and Aladar Olgyay) and especially the 70's – allowed to define a methodological and scientific correlation between climate and architecture to delineate design solutions capable of guaranteeing comfort conditions by maximising the usage of local natural and passive resources, and by minimising the need for fossil energies. In particular, this paper refers to the performance-driven environmental and technological design approach to bioclimatic design defined in Italy by the architectural technology research field (Rogora 2012; Grosso, 2017). Assuming the early design approach described by Chiesa and Grosso (2017), this research focuses on the impact that climate data variations have on

mensione oraria, compatibile con metodi e strumenti della progettazione sostenibile, e adatta a dimostrare le variazioni nelle condizioni climatiche avvenute negli ultimi anni sulla base di noti indicatori delle prestazioni climatico-architettoniche (KPI). Il paper fa parte di una ricerca più ampia volta a definire strumenti per correlare le banche dati climatiche europee con gli indicatori climatici di progettazione degli edifici al fine di poter includere i cambiamenti climatici tra le variabili di rischio nella valutazione degli scenari di progetto. Il documento è organizzato in: metodologia, risultati e discussione, limiti e conclusioni.

## Metodologia

Questa sezione descrive:

- il database climatico adottato comprese le sue elaborazioni;
  - gli indicatori climatici di progetto (KPI) e i metodi di calcolo.
- Negli ultimi anni l'Unione Europea (EU) ha sostenuto lo sviluppo di un ampio servizio climatico per fornire dati autorevoli sul clima (passato, presente, futuro) a sostegno della società e delle politiche dell'UE per l'adattamento e la mitigazione dei cambiamenti climatici. Questa missione è alla base della creazione del servizio C3S (Copernicus Climate Change Service). Tra i vari database, abbiamo adottato la rianalisi climatica grigliata ERA, ed in particolare il dataset globale terrestre ERA5-Land (C3S, 2019) la cui prima release risale ad aprile 2019. Le cosiddette rianalisi rappresentano un approccio molto diffuso nelle scienze geofisiche, essendo una combinazione di dati osservati e modelli. Questo specifico database ha una risoluzione nominale che arriva a 9x9 km, e al momento si riferisce al periodo 1981-2018. Ai fini di questo primo documento, i parametri estratti sono la

bioclimatic design approaches. Since climate can be defined as the average (and other statistics) in time of local weather (temperature, humidity, radiation, wind, ...), it is culturally considered in green design as a fixed average property of a place. Nevertheless, recent changes demonstrate that this vision has to be reversed, since climate conditions are integrated in time, but are time-dependent. Climate change is accelerating and can impact projected expected performances not only in the long term, but also during the lifespan of buildings, creating the need for new design paradigms in which climate is a time-variable affecting design flexibility and resilience.

This paper on hybridising climatology and bioclimatic design aims at describing the new time-dimension that connects bioclimatic approaches with climate data, demonstrating and dis-

cussing these challenges by analysing recent weather data with a very high resolution for the whole of Europe, processing ERA5-Land reanalysis data. This very recent database (C3S, 2019) allows to develop a very innovative and detailed study on climate variations by focusing on building issues. The hourly definition of this large dataset fits with green design methods and tools, and is used to show the retrieved variations in climatic conditions in recent years by adopting well known building climatic key performance indicators (KPI). This work is part of a larger research aiming at defining a tool to correlate current climatological European databases with building design climatic indicators and required data to include climate changes as a time-dependent risk variable in building issues.

The paper is structured as follows:

temperatura ed un parametro di umidità (temperatura del punto di rugiada) al suolo (a 2m di altezza) e la pressione atmosferica superficiale; queste sono usate per derivare altre variabili (UR%, umidità assoluta, temperatura a bulbo umido). Sono stati scaricati i valori orari per il periodo 1981-2018 sul dominio europeo (circa 177 GB). Al fine di eseguire un confronto climatico, il database è stato suddiviso in 3 periodi: un primo periodo di riferimento di 15 anni (per tutte le analisi delle condizioni meteorologiche tipiche viene adottato nel settore edilizio un periodo minimo di 10 anni, es. UNI EN ISO 15927-4) tra il 1981 e il 1995 (denominato p.1); un periodo intermedio per dividere i periodi di analisi, in linea con le metodologie climatologiche; e un secondo periodo di riferimento di 15 anni nell'intervallo 2004-2018 (denominato p.2). Per i due periodi di riferimento, è stato calcolato l'anno medio su base oraria, mentre per ogni anno è stato definito il giorno tipo (24 ore) di ogni mese e da questi derivati i giorni tipici medi mensili di periodo. Questa analisi è stata condotta su una macchina Linux utilizzando il tool di analisi CDO (Climate data operators) (Schulzweida, 2019) ed il linguaggio di programmazione Julia.

Gli indicatori climatico-architettonici adottati fanno riferimento, ai fini del presente documento, a 3 KPI ben noti agli architetti e in grado di rendere evidente la variabilità temporale del clima nelle scelte progettuali. I KPI scelti sono:

- indici di grado-giorno (xDD), in grado di descrivere per il riscaldamento e per il raffrescamento la correlazione tra temperature ambientali e fabbisogno energetico dell'edificio. Tale KPI è alla base di analisi, quali la definizione delle classi climatiche italiane che definiscono il minimo U-value o il periodo di riscaldamento. Inoltre, è alla base di numerosi

methodology, results and discussion, limitations and conclusions.

## Methodology

This section describes:

- the adopted climate database and connected data elaborations;
- the chosen building-climate KPIs and calculation methods.

In recent years, The European Union (EU) has supported a large effort to develop climate services in order to create authoritative climate data archives (past, present, future) with an aim to support society and EU policies for adaptation and mitigation of climate changes. This mission underpins the creation of C3S (Copernicus Climate Change Service). Among several data, we consider the ERA5-Land global land-surface reanalysis climate dataset, whose early release refers to April 2019 (C3S, 2019). Reanalyses represent an

extremely useful approach in geophysical sciences, being a combination of observed data and models. This specific dataset has a very high nominal resolution of 9x9 km, while currently released data refers to the period 1981-2018. For the purpose of this first paper, the extracted parameters are the dry bulb temperature and a humidity parameter (dew point temperature) at surface (at 2 m height), and the atmospheric surface pressure used to derive other humidity variables (RH%, absolute humidity, wet bulb temperature). Hourly values for the period 1981-2018 for the European domain were downloaded (about 177 GB) from the C3S Climate Data Store. In order to perform a climate time-dependent comparison, the database was subdivided into 3 periods: a first reference period of 15 years (for all analyses of typical weather conditions a minimal

indicatori e ricerche condotte sia in ambito bioclimatico che sui cambiamenti climatici (Zhai and Helman, 2019);

- il giorno medio mensile (24 ore) per studiare la distribuzione delle temperature. Tale KPI è alla base di numerose analisi, tra cui alcuni indicatori di Olgyay;
- la distribuzione delle ore di comfort e della giornata mensile media su un diagramma di comfort bioclimatico, adottando il noto strumento psicrometrico di Givoni-Milne (Givoni, 1976).

Ogni KPI è di seguito descritto nel dettaglio.

Gli indici xDD sono basati sulle condizioni meteorologiche e generalmente adottati per correlare le condizioni ambientali locali con il fabbisogno energetico di riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Tali indici sono rispettivamente i gradi-giorno di riscaldamento (HDD) e i gradi-giorno di raffrescamento (CDD). Sono adottati in numerosi studi per analizzare l'impatto del clima sui fabbisogni energetici e per confrontare diverse località e/o strategie per ridurre i consumi energetici. Ad esempio, l'Annex 62 IEA EBC adotta una versione modificata dei CDD per definire il potenziale locale delle strategie di raffrescamento ventilativo (Heiselberg, 2017), mentre ulteriori studi analizzando il potenziale delle tecniche bioclimatiche, es. ventilazione naturale, raffrescamento evaporativo, tubi interrati, ecc. (Chiesa, 2019). Ai fini del presente documento, gli indici HDD e CDD sono stati calcolati adottando la metodologia utilizzata da Eurostat (2020), con l'obiettivo di generare un database e una mappa su scala europea. L'HDD è definito considerando un valore di temperatura base, ovvero la temperatura media giornaliera dell'aria al di sotto della quale è prevista la necessità di riscaldamento in un edificio, pari a 15 °C, in linea con altre analisi climatiche (CISBE, 2006).

period of 10 years is adopted in the building sector, see for example UNI EN ISO 15927-4) between 1981 and 1995 (named p.1); an intermediate gap period introduced to avoid analysing two directly connected periods, in line with climatic methodologies; and a second reference period of 15 years in the range 2004-18 (named p.2). For the two reference periods, the mean year was defined by averaging hourly values, while the typical 24-hour day of each month was defined for each year and the mean typical days for each month for the two chosen periods were also derived. This analysis was conducted with Linux using the CDO (Climate Data Operators) tool (Schulzweida, 2019) and the Julia programming language.

For the purpose of this paper, the adopted building-climate KPIs refer to 3 main indicators that are well known

to architects and which reveal the time-dependency of adopted climate in building design choices. The chosen KPIs are:

- degree-day indexes (xDDs), which describe, both for heating and for cooling, the correlation between environmental dry bulb temperatures and building energy needs. These KPIs are at the base of several analyses, such as the definition of Italian climatic classes for minimal U-value definition or for the definition of the heating period. Furthermore, they are at the base of several additional indicators and studies on both bioclimatic architecture and climate changes (Zhai and Helman, 2019);
- the average 24-hour monthly day to study the distribution of temperatures; this KPI is at the base of several analyses, including Olgyay's bioclimatic studies;

Diversamente, l'indice CDD è definito adottando una temperatura base, cioè la temperatura media giornaliera al di sopra della quale è necessario raffrescare, di 24 °C. L'approccio di calcolo si basa sui seguenti passaggi:

- calcolo della temperatura media giornaliera dell'aria ( $\vartheta_{m,i}$ ) per l'anno medio del periodo;
- adozione dell'espressione (1) o (2) per il calcolo del valore DD giornaliero;
- somma annuale di ciascun valore DD per definire gli indici HDD e CDD.

$$HDD_i = \begin{cases} 0 & \text{if } \vartheta_{m,i} > 15 \text{ }^\circ\text{C} \\ 18 \text{ }^\circ\text{C} - \vartheta_{m,i} & \text{if } \vartheta_{m,i} \leq 15 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

$$CDD_i = \begin{cases} 0 & \text{if } \vartheta_{m,i} < 24 \text{ }^\circ\text{C} \\ \vartheta_{m,i} - 21 \text{ }^\circ\text{C} & \text{if } \vartheta_{m,i} \geq 24 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

Le differenze di HDD e CDD tra il p.1 e il p.2 sono calcolate per analizzare i cambiamenti climatici in relazione ai fabbisogni energetici di riscaldamento e raffrescamento degli ambienti, essendo tali KPI correlati linearmente a questi valori.

Il secondo KPI considerato è il giorno tipico medio mensile (la media climatologica di tutti i giorni in un dato mese mediata su tutti gli anni), calcolato per tutti gli anni e mediato per i due periodi di riferimento di 15 anni. Questa analisi è stata condotta per l'intera griglia di 9x9 km in Europa, ma ai fini di questo paper, sono state estratte 4 località (Oslo, Berlino, Roma e Atene), scelte per supportare la discussione dei dati rappresentando diverse condizioni climatiche. Il confronto tra i giorni medi orari di ciascun mese consente di analizzare l'effetto delle variazioni tempo-clima a breve termine in diversi contesti europei. I gior-

- the distribution of comfort hours and mean monthly day on a bioclimatic comfort chart, adopting the well known Givoni-Milne psychrometric tool (Givoni, 1976).

Each KPI is described in detail below. Among the adopted KPIs, xDDs are weather-based indexes generally adopted to correlate local environmental conditions with heating and cooling energy needs of buildings. These are respectively the Heating Degree Days (HDD) and the Cooling Degree Days (CDD). These KPIs are adopted in several studies to analyse the impact of climate on energy needs and to compare different locations and/or different strategies to reduce energy consumption. For example, IEA EBC Annex 62 supports the adoption of a modified version of CDD to define the local potential of ventilative cooling strategies (Heiselberg, 2017), while

similar results are also described by different authors for different bioclimatic techniques, e.g., natural ventilation, evaporative cooling, buried pipes, ... (Chiesa, 2019). For the purpose of this paper, the HDD and CDD indexes have been calculated adopting the same methodology used by Eurostat (2020), with the aim to generate a database and a map at European scale. HDD is, hence, defined considering as base temperature, i.e., the average daily air temperature below which the heating need is expected in a building, a standard value of 15 °C, in line with other climatological analyses (CIBSE, 2006). Differently, the CDD index is defined by adopting a base temperature, i.e., 24 °C, the average daily temperature above which cooling is needed in a space. The calculation approach is based on the following steps:

- calculation of the daily average air

ni tipici sono spesso utilizzati per verificare il dimensionamento degli impianti o per verificare il potenziale nelle fasi iniziali di progetto di diversi sistemi passivi e a bassa energia (ad esempio variazioni giornaliere di temperatura per il raffreddamento ventilativo in estate o il potenziale dissipativo medio mensile).

Il terzo KPI adottato per questo studio si basa sul diagramma bioclimatico di Givoni-Milne. In linea con gli studi di Olgyay, i diagrammi psicrometrici sono utilizzati per analizzare i dati climatici locali studiando le ore di comfort/discomfort estive e invernali e supportando la scelta delle tecnologie bioclimatiche più adatte alle singole località. È stato studiato l'anno medio orario dei due periodi di riferimento per due località italiane utilizzando Climate Consultant 6.3 (Liggelt and Milne, 2008) per analizzare le variazioni temporali. In secondo luogo, si sono confrontate le condizioni medie mensili e i giorni orari tipo dei mesi di riferimento nelle due località. L'analisi oraria annuale consente di verificare i cambiamenti nel numero di ore di comfort/discomfort, mentre i valori medi mensili e i giorni tipo mensili permettono di studiare la distribuzione nell'anno dei i cambiamenti climatici. Le località scelte sono Roma, essendo la località italiana adottata nel secondo KPI, e Ferrara, località sita in una delle zone italiane in cui i cambiamenti degli xDD sono più evidenti.

## Risultati e discussione

### Analisi dei gradi-giorno

Calcolati HDD e CDD a scala europea per i due periodi citati, è possibile analizzare e discutere la differenza tra p.1 e p.2. Tale differenza sottolinea l'impatto dei cambiamenti climatici tra il periodo 1981-95 e il 2004-2018 e può essere utilizzata per analizzare le influenze locali dipendenti

- temperature ( $\theta_{m,i}$ ) for the mean year of the considered period;
- adoption of expression (1) or (2) to calculate the DD value of each day;
- yearly sum of each daily DD values to define HDD and CDD indexes.

$$HDD_i = \begin{cases} 0 & \text{if } \theta_{m,i} > 15 \text{ }^\circ\text{C} \\ 18 \text{ }^\circ\text{C} - \theta_{m,i} & \text{if } \theta_{m,i} \leq 15 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

$$CDD_i = \begin{cases} 0 & \text{if } \theta_{m,i} < 24 \text{ }^\circ\text{C} \\ \theta_{m,i} - 21 \text{ }^\circ\text{C} & \text{if } \theta_{m,i} \geq 24 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

Finally, the HDD and CDD differences between the period 1981-1995 and the period 2004-18 are calculated to analyse climate changes in regard to correlated energy needs for space heating and cooling, as this KPI is linearly correlated with these values.

The second KPI considered is the mean typical monthly day, i.e., the climatological average over all days in a specific month and overall years, as a function

of the hour of the day, calculated for all years and for the two reference 15-year periods. This analysis was conducted for the whole 9x9 km grid over the European domain, but for the purpose of this paper 4 reference locations were extracted to support data discussion. In particular Oslo, Berlin, Rome, and Athens were chosen, all being Capital cities and representing different typical climatic conditions in Europe. The comparison between the mean hourly-defined day typical of each month allows to show the effect of time-climate variations in the short term in different European contexts. Typical days are generally used to verify mechanical system dimensioning and to check the potential at early-design stages of different passive and low-energy systems (e.g., daily temperature variations for ventilative cooling in summer or its mean monthly dissipative potential).

dal tempo sulle condizioni climatiche. La Figura 1a mostra le variazioni di HDD. La mappa sottolinea chiaramente come nel territorio europeo si evidenzia una riduzione generale del fabbisogno di riscaldamento, ma anche come tale variazione non sia localmente omogenea. Elevate riduzioni sono evidenti soprattutto sulle Alpi, in Slovacchia, Romania e Ucraina sud-occidentale, nelle zone settentrionali (Scandinavia) e in aree specifiche della Turchia, mentre sono sottolineate variazioni limitate nella maggior parte dei territori meridionali e in Irlanda. Diversamente, l'area grigia nel sud del Portogallo è l'unica zona in cui negli ultimi anni si riscontra un debole aumento di HDD. L'analisi mostra come le aree dell'Europa centrale, il nord e il centro Italia e la regione balcanica siano caratterizzati da un aumento delle temperature, suggerendo una riduzione del fabbisogno energetico per il riscaldamento degli edifici.

La Figura 1b mostra le variazioni di CDD. È evidente un aumento generale del fabbisogno energetico di raffrescamento a scala europea, anche se tale effetto si riscontra principalmente nelle zone meridionali. In particolare, si osserva un aumento delle temperature nell'entroterra meridionale della Spagna, nella Pianura Padana e in zone specifiche della Puglia e della Sicilia. Le zone costiere della Grecia e le aree interne dell'Anatolia vicino al Mar Egeo sono caratterizzate da un elevato incremento delle esigenze di raffrescamento. A livello generale, si sottolinea una riduzione di HDD e un aumento di CDD.

I risultati sono in linea con altri studi, come l'analisi Eurostat su HDD e CDD, che tuttavia si basa su dati aggregati (valori medi nazionali o regionali). L'adozione del recente database ERA5-land consente di definire con maggiore precisione tale fenomeno a livello temporale e geografico. Tali analisi supportano chiara-

ly, the third adopted KPI for this study is based on the Givoni-Milne bioclimatic chart. In line with Olgyay studies, psychrometric charts may help in analysing local climatic data exploring expected comfort and discomfort periods, and in supporting the choice of most appropriate low energy technologies since early design phases. In this study, the hourly distribution of the mean year for the 2 chosen periods is performed for two Italian locations using Climate Consultant 6.3 (Liggelt and Milne, 2008) to analyse time-related variations. Secondly, for the Italian sites, the average monthly conditions are compared with the 24h mean monthly day considering the 2 series. The hourly analysis allows to check changes in comfort-discomfort hour balances, while the average monthly values and the reference day of each month is used to analyse in which

periods time-related climate changes are more evident. Chosen locations are Rome, the Italian location adopted during the second KPI analysis, and Ferrara, chosen to be in one of the Italian zones where xDD changes are most evident.

## Results and discussion

### Degree-day analysis

After calculating the HDD and CDD indicators for the whole European area averaging the ERA5-Land database on an hourly basis for the two mentioned periods, the difference between p.1 and p.2 is defined and discussed. This difference underlines the impact of climate changes between the 1981-1995 and 2004-2018 periods, and may be used to analyse local time-dependent influences on local mean weather conditions. Figure 1a shows the HDD variations. The map clearly underlines that

01 | Variazioni xDDs tra i due periodi di riferimento; (a) variazioni di HDD; (b) variazioni di CDD  
 xDDs variations between the two reference periods; (a) HDD variations; (b) CDD variations. The grey area in southern Portugal in panel (a) indicates weakly positive values

02 | Valori medi assoluti di HDD (a) e di CDD (b) per il periodo p.1 (1981-1995)  
 Absolute (a) HDD and (b) CDD mean values for p.1 (1981-1995)

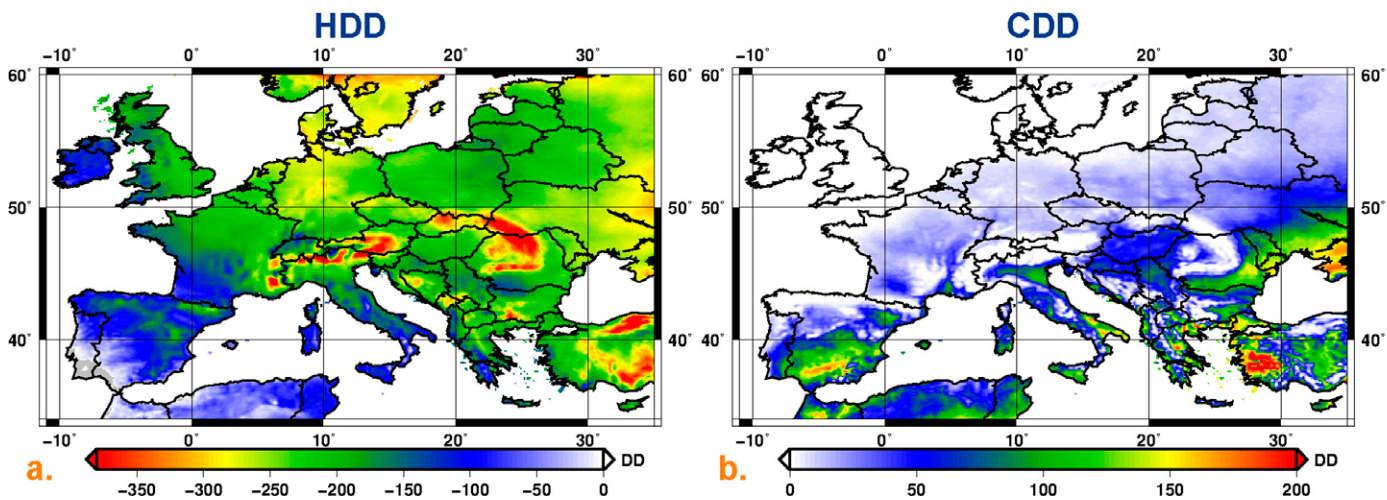
mente la tesi iniziale: il clima deve essere assunto come una variabile dipendente dal tempo anche negli studi a breve termine, come nel caso della progettazione bioclimatica degli edifici, per quanto tali variazioni non siano omogenee. Variazioni superiori a 350 DD nel riscaldamento e 200 DD nel raffreddamento sono, infatti, in grado di influire notevolmente sul fabbisogno energetico dell'edificio. La differenza cumulata di temperature è in grado di definire in fase preliminare i fabbisogni energetici, essendo gli stessi linearmente correlati con gli xDD locali adottando un fattore k, funzione di resistenza e capacità dell'edificio (Santamouris and Asimakopoulou, 1996). Infine, considerando la distribuzione di HDD e CDD (Fig. 2) essendo i valori assoluti

CDD in p.1 inferiori a quelli di HDD, la variazione estiva è percentualmente più influente di quella invernale.

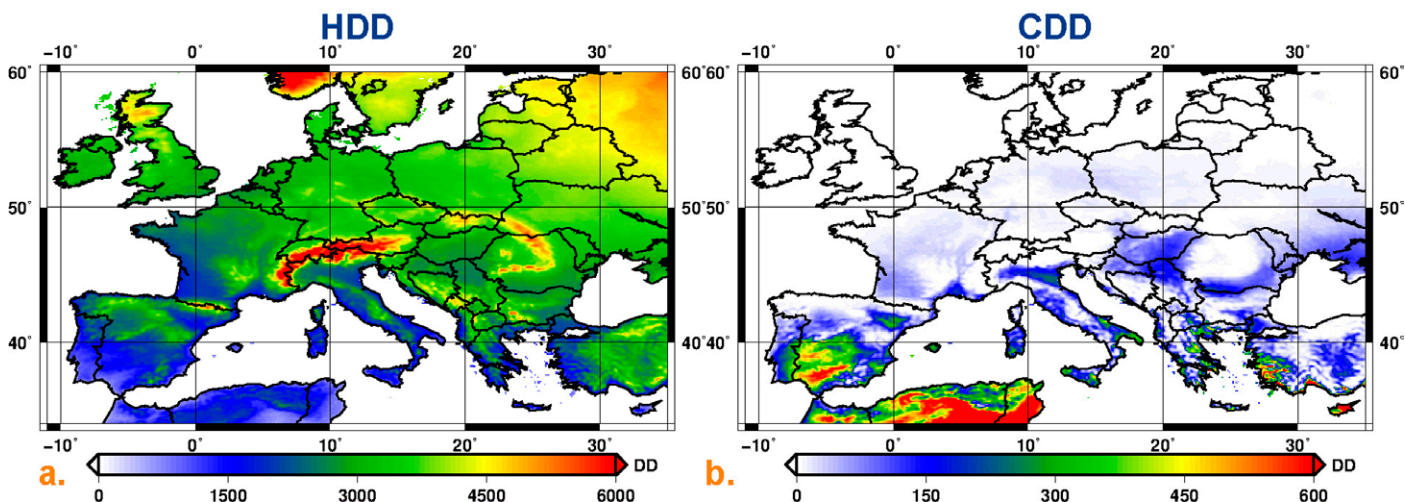
*Giorno tipo orario*

Per analizzare le variazioni locali è stato calcolato il giorno medio mensile per l'intera Europa, mentre di seguito si discutono i risultati di 4 località significative. Le figure 3 e 4 riportano il giorno medio orario delle 4 località rispettivamente per gennaio e luglio, mesi rappresentativi della stagione invernale e estiva, definendo in blu il p.1 e in arancione il p.2. Al fine di quantificare le variazioni annuali di tali valori nell'arco dei 15 anni di riferimento, sono rappresentate anche barre di errore che mo-

01 |



02 |



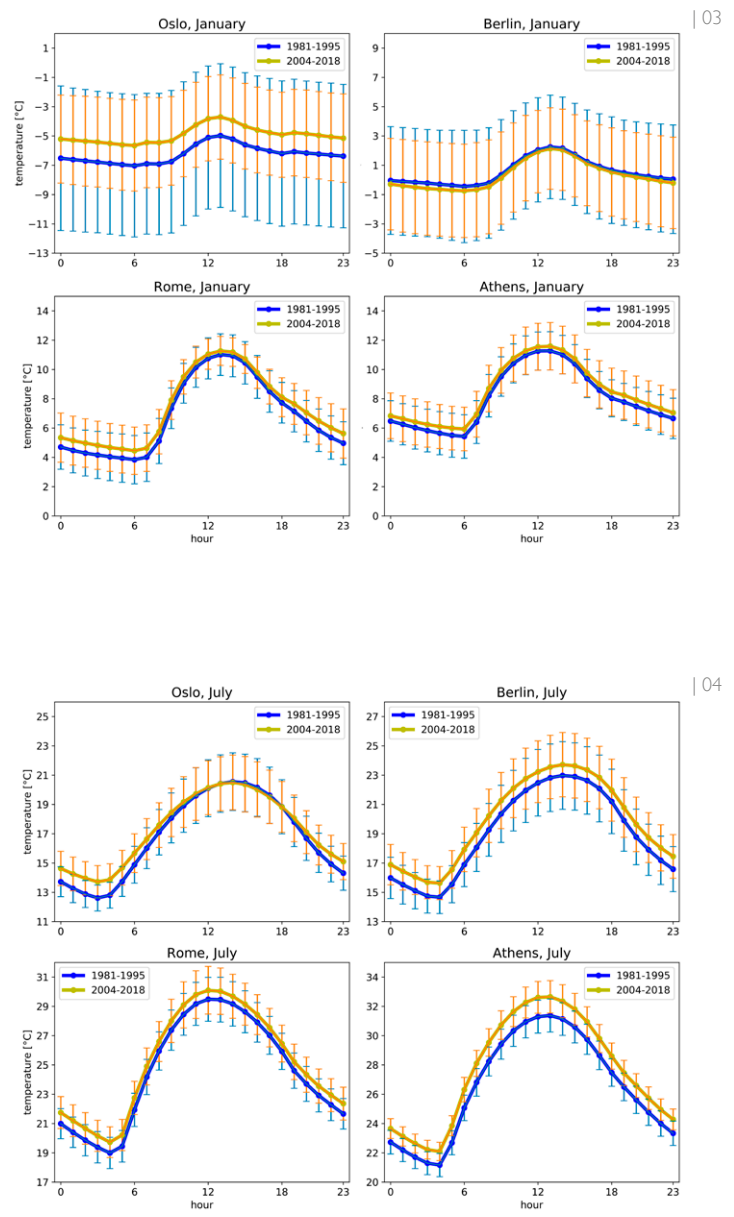
strano la variabilità inter-annuale nei due periodi con ampiezza 1 deviazione standard. La figura 3 mostra chiaramente come, nella stagione invernale, Oslo abbia registrato una crescita quasi costante della temperatura intorno ai 2 °C, mentre un aumento è anche evidente per Roma e Atene, specialmente durante la notte. Il comportamento di Oslo è consistente con l'osservato riscaldamento accelerato delle regioni artiche (la cosiddetta Arctic Amplification). Considerando i singoli anni, i cambiamenti climatici riducono le variazioni annuali nel periodo considerato per le località settentrionali, mentre in quelle mediterranee l'effetto è simile a uno spostamento verso l'alto. Diversamente, durante la stagione estiva, si evidenziano variazioni significative per tutte le località. Oslo è principalmente interessata da un aumento notturno delle temperature, mentre ad Atene è evidente un incremento per l'intero ciclo di 24 ore. Confrontando tutti i grafici (le ordinate hanno lo stesso passo), è evidente che i cambiamenti climatici impattano positivamente sulla stagione invernale, ma, in media, negativamente sulla stagione estiva, con un conseguente aumento previsto delle esigenze di raffrescamento, nelle località più calde.

### Digrammi bioclimatici

Il diagramma bioclimatico psicrometrico di Givoni è utilizzato per mostrare le variazioni orarie tra l'anno medio dei due periodi (p.1 e p.2) per le 2 località scelte. Le analisi sono condotte in Climate Consultant v6.3 e mostrano come le ore di comfort a Roma passino da 1165 a 1096 (-6%), mentre, in assenza di strategie bioclimatiche, le ore in cui è necessario attivare un condizionatore aumentano del 43% e le ore di riscaldamento si riducono (-5%). Adottando strategie bioclimatiche, le ore residue di raf-

a general reduction in heating needs is found in the European territory, but also that this variation is locally dependent. High reductions in HDD are mainly evident in the Alps, in Slovakia, Romania and south-west Ukraine, in northern zones of Scandinavia (upper map border), and in specific areas of Turkey, while limited variations are found in the majority of southern territories and in Ireland. Conversely, the grey southern part of Portugal facing the ocean is the only zone in which an almost negligible increase in HDD is found in recent years. The analysis shows how central European areas, north and central Italy, and the Balkan region are characterised by an increase in air temperatures, suggesting a reduction in building heating energy needs. Instead, Figure 1b shows the variations in CDD. In this analysis a general increase in cooling needs at Euro-

pean level is evident, even if this effect is mainly predominant in southern zones. In particular, higher temperatures are observed in the inner southern part of Spain, in the Po Valley, and in specific zones of Apulia and of Sicily. Furthermore, coastal zones of Greece and inner Anatolian areas near the Aegean Sea are characterised by a high increment of cooling needs. At a general level, a widespread decrease in HDD and an increase in CDD are evident. These results are in line with other studies, such as the Eurostat analysis on HDD and CDD, even if its data are very aggregated (national or regional average values). The adoption of the recent ERA5-land database allows to define with higher precision the time and geo impact of this phenomenon. These 2 images clearly support the main statement of this paper: climate needs to be assumed as a time-

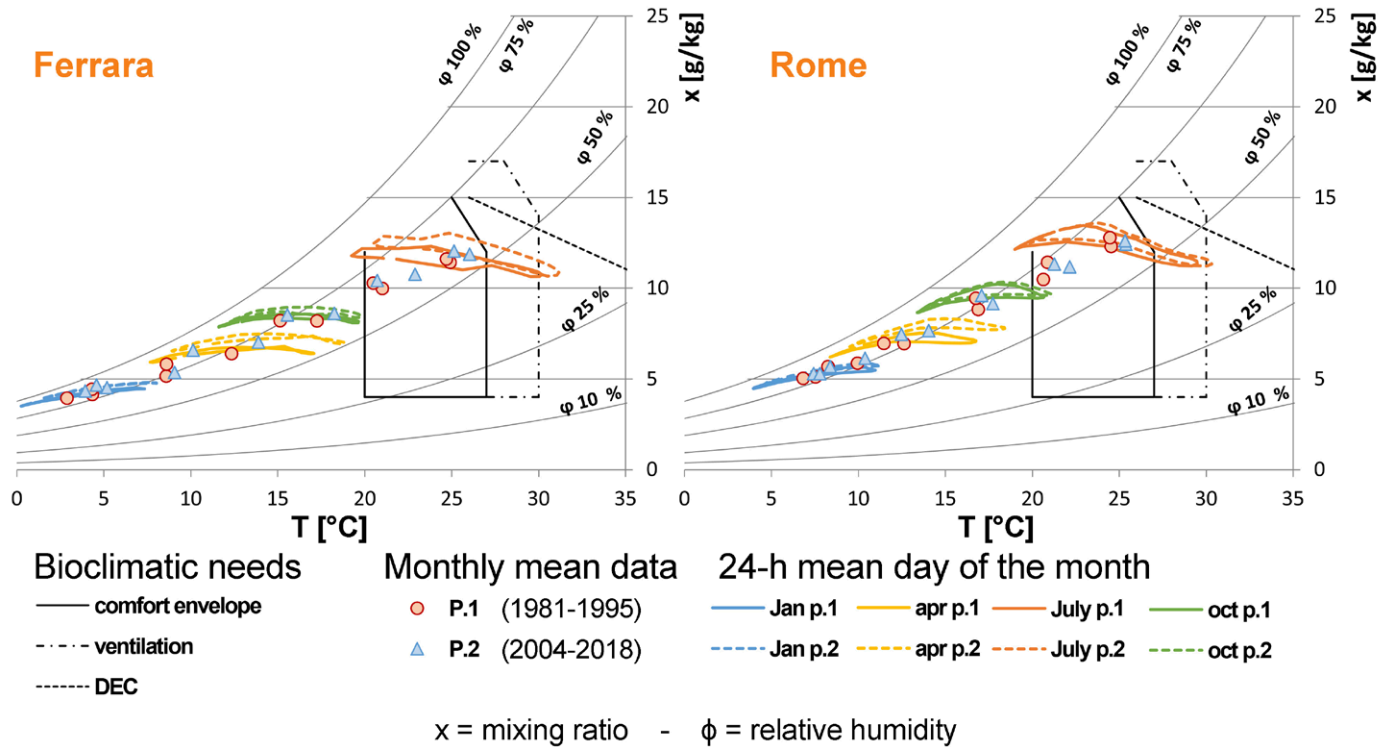


dependent variable also in short-term studies, such as bioclimatic building design ones, even if these changes are not homogeneous. Nevertheless, variations higher than 350 DD in heating and 200 DD in cooling are able to highly impact building energy needs. Roughly speaking, the cumulated difference in temperature is able to define early design energy needs, as they are linearly correlated with local xDDs adopting a factor  $k$ , function of building resistance and capacity (Santamouris and Asimakopoulos, 1996). Finally, considering the HDD and CDD distribution of xDDs (Fig. 2), cooling variations are impacting more than the heating ones, since absolute CDD values in p.1 are lower than HDD ones.

### 24-hour typical day analysis

The mean day of each month is calculated to analyse local variations. As

mentioned in the methodology section, 4 locations are selected to represent different European climate conditions. Two reference months are shown in representation of the larger analysis, characterising the winter (January) and the summer (July) seasons. Figures 3 and 4 report the mean 24-hour day of the 4 locations respectively for January and July. Blue lines refer to p.1 while orange ones to p.2. In order to quantify the yearly variations of these values in the reference calculation period of 15 years, error bars are also given, showing 1-sigma inter-annual variability in each period. Figure 3 clearly shows that, in winter, the high variation is found in Oslo, with an almost constant growth of temperature slightly below 2 °C, while a smaller increase is also evident for Rome and Athens, especially during nighttime. Oslo's behaviour is consistent with



frescamento meccanico aumentano del 32%, con una crescita del 52% nelle ore di attivazione dei sistemi bioclimatici (es. raffrescamento ventilativo; raffrescamento evaporativo), mentre le ore residue di attivazione del riscaldamento meccanico si riducono del -7% (ore di attivazione del riscaldamento bioclimatico

-3% - es. guadagni interni e solari). Allo stesso modo, a Ferrara il numero di ore di comfort passa da 1585 a 1409 (-11%). Le ore di raffrescamento meccanico senza soluzioni bioclimatiche aumentano del 38% (da 589 a 813) e quelle di riscaldamento meccanico si riducono del -5%. Considerando le tecnologie bio-

the observed faster warming of Arctic regions (so-called Arctic amplification). Considering single year statistics, climate change also reduces single variations in the considered period for northern locations, while in Mediterranean ones the effect is similar to an upward shift. Contrarily, significant variations are shown for all locations during the summer season. Oslo is mainly interested by a nighttime increase in temperature. Differently, in Athens an increment is evident for the whole 24-hour cycle. Comparing all graphs (all ordinates have the same step), it is evident that climate change has a positive impact on the winter season but, considering the 4 locations, the effect is negative during the cooling season, with a consequent expected increase in cooling needs, especially in hotter locations.

**Bioclimatic chart analysis**  
 The well known psychrometric bioclimatic chart of Givoni is adopted to show hourly variations between the mean year of p.1 and p.2 for the 2 chosen Italian locations. Analyses are conducted in Climate Consultant v6.3 and show that the comfort hours in Rome shift from 1,165 to 1,096 with a variation of -6%, while without bioclimatic strategies, the hours when mechanical cooling is needed increase by 43%, and the mechanical heating ones diminish by -5%. Adopting bioclimatic strategies, the residual mechanical cooling hours show a 32% increment, with a 52% increase in activation hours of cooling bioclimatic systems (e.g., ventilative cooling; evaporative cooling), while the residual mechanical heating activation hours drop by -7% (bioclimatic heating activation hours -3% - e.g., internal heat gains, solar gains).

Similarly, in Ferrara the number of comfort hours pass from 1,585 of p.1 to 1,409 of p.2 (-11%). The mechanical cooling hours without bioclimatic solutions grow by 38% and the mechanical heating ones diminish by -5%. Considering bioclimatic technologies, these values change respectively by +228% (from 68 to 223 hours) and by -7%, with a growth in bioclimatic summer potential (+13%) and a reduction in bioclimatic heating potential (-2%). Figure 5 plots on the psychrometric chart the monthly average values of dry bulb temperatures and humidity for the two reference periods in order to detail the time-climate related changes. Representative monthly mean 24-hour variations are also shown on the same graphs (Jan, Apr, Jul, Oct). Comparing the mean monthly values, variations are evident in both locations. Ferrara shows a general increase in humidity ratio and

air temperatures for all months, with a higher increment in mean temperatures in January, April to July, and November, with a peak in June touching +1,9 °C. Considering the typical days, this effect is clearly visible in the months of July and April. Rome is also characterised by a general increase in ambient temperatures, even if lower in intensity, while absolute humidity shows a fluctuating behaviour. In particular, higher temperature variations are visible from April to August and in November, with a peak in June reaching a positive variation of 1,5 °C, followed by April with +1,4 °C. The limited range of variations compared to Ferrara is also visible by comparing the mean 24-hour monthly data using bioclimatic charts.

**Conclusions and limitations**  
 This study includes the preliminary results of a larger research on the link

climatiche, tali valori si assestano rispettivamente a + 228% (da 68 a 223 ore) e -7%, con una crescita del potenziale estivo bioclimatico (+13%) e una riduzione del potenziale di riscaldamento bioclimatico (-2%).

La figura 5 traccia sul diagramma psicrometrico i valori medi mensili delle temperature e del titolo per i due periodi di riferimento al fine di dettagliare i cambiamenti tempo-clima. Sugli stessi grafici sono mostrate le variazioni dei giorni orari medi mensili (gennaio, aprile, luglio, ottobre). Confrontando i valori medi mensili, le variazioni sono evidenti in entrambe le località. Ferrara mostra un aumento generale del tasso di umidità e delle temperature dell'aria per tutti i mesi, e in particolare delle temperature medie in gennaio, da aprile a luglio e novembre, con un picco a giugno che tocca +1,9 °C. Considerando i giorni tipici, questo effetto è chiaramente visibile (si vedano luglio e aprile). Roma è caratterizzata da un generale aumento delle temperature, ma di intensità inferiore rispetto a Ferrara, mentre l'umidità assoluta mostra un comportamento meno definito. In particolare, le variazioni di temperatura più elevate sono visibili da aprile ad agosto e a novembre, con un picco a giugno (+1,5 °C) seguito da aprile (+1,4 °C). Le variazioni sono anche visibili confrontando i giorni tipo sul grafico.

**Conclusioni e limitazioni** Lo studio include i risultati preliminari di una ricerca più ampia basata sull'ibridazione tra climatologia e progettazione sostenibile per affrontare gli impatti dei cambiamenti climatici sull'ambiente costruito a supporto del potenziamento degli strumenti di progettazione bioclimatica considerando il clima una variabile di progetto legata al tempo. Tali primi risultati presen-

between climatological and architectural knowledge to face climate change impacts on the built environment supporting the upgrading of bioclimatic design instruments, considering climate as a time-related design variable. Several limitations need to be underlined at present. Firstly, wind and solar radiation are not included in this paper, not being connected with the calculation of the considered KPIs. Nevertheless, in order to analyse the specific potential of several bioclimatic strategies, e.g., wind-driven ventilative cooling, and to study the effect of climate changes on building energy behaviour in detail, e.g., using dynamic energy simulations, additional variables are required to draw up a complete typical meteorological file. These additional analyses are currently being processed, and will be presented in a future paper. Finally, climate change analysis is

based, at present, on reanalysis datasets and not on global or regional climate models supporting future climate scenarios. This choice is due to the need to show the time-correlated variations of climate on the base of validated data, while future scenarios are predictions and need to be analysed in large ensembles in order to represent and quantify different sources of uncertainty. Nevertheless, another specific study is under implementation. This paper shows how climate is becoming a time-dependent variable, subject to specific local variations, whose effects are visible also during building life spans. For example, at the Italian level, large increases in cooling needs are found – especially in Adriatic locations, in south Sicily and Sardinia, and in the Po Valley – together with a reduction in heating needs, especially in Alpine zones. These vari-

tano le seguenti limitazioni. In primo luogo, in questo documento non sono inclusi vento e radiazione solare in quanto non collegati al calcolo dei KPI considerati. Tuttavia, al fine di analizzare il potenziale specifico di alcune strategie bioclimatiche, es. raffrescamento ventilativo da vento e per studiare in dettaglio l'effetto dei cambiamenti climatici sul comportamento energetico dell'edificio, es. tramite simulazioni energetiche dinamiche, sono necessarie ulteriori variabili per comporre un anno meteorologico tipico completo. Tali analisi aggiuntive sono in fase di sviluppo e saranno presentate in un futuro paper. Infine, l'analisi del cambiamento climatico presentata si basa su set di dati di rianalisi e non su modelli climatici globali o regionali per predire il clima futuro. Questa scelta è dovuta alla necessità di mostrare le variazioni temporali del clima sulla base di dati validati, mentre gli scenari futuri sono previsioni e devono essere analizzati utilizzando ensemble (grandi insiemi) di simulazioni al fine di rappresentare e valutare diverse fonti di incertezza. Tuttavia, è in fase di sviluppo uno studio specifico.

Il paper mostra come il clima sia diventato una variabile dipendente dal tempo, soggetta a specifiche variazioni locali, i cui effetti sono visibili anche durante i cicli di vita degli edifici. A livello italiano, si sottolinea un forte aumento delle esigenze di raffrescamento – soprattutto nelle località adriatiche, nella Sicilia e Sardegna meridionale e nella Pianura Padana – insieme a una riduzione delle esigenze di riscaldamento, specialmente nelle zone alpine. Tali variazioni sono localmente correlate, mostrando diversi comportamenti medi mensili. L'approccio proposto si adatta alle metodologie e agli strumenti di progettazione bioclimatica supportando la traduzione delle variabili climatiche da fisse a dipendenti dal tempo. Infine, i risultati sono un primo

ations are locally correlated, showing different monthly mean behaviours. The proposed approach fits with bioclimatic design methodologies and tools supporting the translation of climatic variables from fixed to time-dependent. Finally, results are a first step to develop new indicators for ESCOs, credit institutions, and users, to support actions (e.g., retrofit) on building stocks and to connote changes in thermal quality levels that may occur during the building's life span. There is an evident need to continuously develop new and updated climate databases to increase climate change resilience and be able to face the time-correlated dimension of climate data in green design. A direct connection between climatological knowledge and architectural ones is another essential aspect to be pursued in future years.

#### ACKNOWLEDGMENTS

This paper is connected to several recent projects in which the authors are involved: C3S 34a contract MAGIC, the provision of services UNDP-TUR-REP-PSC-2016/01 developing MBEPs and nZEB approaches for Turkey, the IEA EBC ANNEX 62, and two submitted H2020 proposals. We acknowledge the use of data provided by the EU Copernicus Climate Change Service (C3S) programme.



passo per sviluppare nuovi indicatori per ESCO, istituti di credito e utenti, a supporto della valutazione di scenari progettuali (es. Retrofit) e della resilienza ai cambiamenti climatici degli edifici nel corso della loro vita utile.

Si sottolinea la necessità di sviluppare database continuamente aggiornati per affrontare la dimensione correlata al tempo dei dati climatici nella progettazione sostenibile. La nascita di nuove ibridazioni tra conoscenze climatologiche e architettoniche è un altro aspetto essenziale da perseguire negli anni futuri.

#### RINGRAZIAMENTI

La ricerca è connessa con diversi progetti recenti degli autori: C3S 34a contratto MAGIC, la fornitura di servizi UNDP-TUR-REP-PSC-2016/01, lo IEA EBC ANNEX 62 e e due proposte H2020 recentemente finanziate. Inoltre, sono stati utilizzati dati forniti dal Copernicus Climate Change Service (C3S) finanziato dall'Unione Europea.

#### REFERENCES

C3S - Copernicus Climate Change Service (2019), "C3S ERA5-Land reanalysis. Copernicus Climate Change Service", available at: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home> (accessed February 2020).

Chiesa, G. (2020), *Paradigms and digital eras*, Springer, Cham.

Chiesa, G. (2019), "Calculating the geo-climatic potential of different low-energy cooling techniques", *Building Simulation*, Vol. 12, pp. 157-168.

Chiesa, G. and Grosso, M. (2017), "An Environmental Technological Approach to Architectural Programming for School Facilities", in Sayigh, A. (Ed.), *Mediterranean Green Buildings & Renewable Energy*, Springer, Cham.

CIBSE (2006), *Degree-days: Theory and application* (TM41: 2006), The Chartered Institution of Building Services Engineers, London.

Eurostat, "Energy statistics - cooling and heating degree days", available at: [ex.europa.eu/Eurostat/cache/metadata/en/ngr\\_chdd\\_esms.html](https://ex.europa.eu/Eurostat/cache/metadata/en/ngr_chdd_esms.html) (accessed February 2020)

Fagan, B. (2004), *The long summer. How climate changed civilization*, Basic Books, New York.

Givoni, B. (1976) *Man, Climate and Architecture*, 2<sup>nd</sup> ed., Applied Science Publishers, London.

Grosso, M. (2017), *Il raffrescamento passivo degli edifici*, 4th ed., Maggioli Editore, Sant'Arcangelo di Romagna.

Heiselberg, P. (2017), *Ventilative Cooling Design Guide*, IEA EBC Annex 62, Aalborg University, Aalborg.

Koenigsberg, O.H. et al. (1975), *Manual of tropical housing and building. Climatic design*, OrientBlackswan, Hyderabad.

Liggett, R. and Milne, M. (2008), Climate Consultant software, version 6.3, UCLA, Los Angeles.

Rogora, A. (2012), *Progettazione bioclimatica per l'architettura Mediterranea*, Wolters Kluwer Italia, Milano.

Rudofsky, B. (1964), *Architecture without architects*, Doubleday, New York.

Santamouris, M. and Asimakopoulos, D. (1996), *Passive cooling of buildings*, James&James, London.

Schulzweida, U. (2019), CDO User Guide (Version 1.9.8), MPI-M, Munich.

Zhai, Z.J. and Helman, J.M. (2019) "Implications of climate changes to building energy and design", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 44, pp. 511-519.