

Justice in the Distribution of Ecosystem Services: Urban Cooling and Vulnerability Patterns in the City of Bologna

Claudia de Luca^{1,*}, Denise Morabito¹, Francesco Vettore¹

¹ Dipartimento di Architettura, Alma Mater Studiorum University of Bologna, Viale Risorgimento 2, 40123, Bologna, Italia, Claudia.deluca5@unibo.it; denise.morabito@studio.unibo.it; francesco.vettore@unibo.it

* corresponding author

Keywords

Heat Waves, Green Infrastructure, Climate Adaptation, Socio-Spatial Inequality, Nature-Based Solutions

Abstract

The impact of heat waves on urban environment is becoming increasingly critical due to the combined effects of global warming, urban morphology, population density and vulnerability. Compact urban areas, often characterized by limited vegetation and high surface impermeability, tend to absorb and retain more solar radiation, generating the phenomenon of urban heat island. The lack of urban greenery not only reduces the capacity for natural cooling - through processes like evapotranspiration and shading - but also limits the delivery of other important ecosystem services that benefit both the environment and urban populations. Socio-economic factors such as population ageing and unequal income distribution can exacerbate the impact of environmental conditions by reinforcing spatial inequalities. These overlapping dynamics highlight the need for spatially informed approaches that consider both the ecological supply of cooling services and the social demand, particularly in relation to environmental justice. This study analyses the cooling capacity of Urban Green Infrastructure (UGI) in Bologna by integrating climatic and socio-demographic data, employing the InVEST model, and exploring their interrelationships through linear regression analysis. The results allow to identify mismatches between the supply of and demand for cooling services, especially in areas inhabited by more vulnerable social groups, providing valuable insights for urban planners and policymakers to design targeted, equitable nature-based and governance strategies that enhance climate resilience and improve the quality of urban life.

1. Introduction

Continuous growing of social and environmental injustices exacerbated or driven by climate change, are making calls for climate justice louder and more frequent. Globally, the last 8 years have been the warmest on record, and in 2022 Europe experienced its hottest summer ever recorded (Copernicus, 2023). Moreover, climate change projections for the continent indicate that temperatures, and their socio-economic impacts will rise at an accelerated rate unless strong mitigation and adaptation actions are put in place (IPCC, 2021).

At the same time, today more than 55% of the world's population lives in urban areas and by 2050 the percentage is expected to be close to 70% (UN, 2019). A major problem for densely populated areas facing global warming is the so-called urban heat island (UHI) effect, where the built environment absorbs solar radiations and releases more heat than the natural landscape, thus leading to increased air and surface temperatures in cities compared to the rural surroundings (Toparlar et al., 2017; Oke, 1973; Matzarakis et al., 2016). The intensity of this phenomenon may lead densely built-up areas of the city up to be 5-6°C hotter than surrounding areas (Bonacquisti et al., 2006; Ambrosini et al., 2014). This may have a significant impact on citizen's health leading to an exacerbation of existing medical conditions, in case of elderly or sanitary fragile people with a consequent increase rate of heat-related mortality (Ballester et al., 2023; Conti, et al., 2004) impacting more vulnerable groups such as low-income people (Venter, Krog, & Barton, 2019).

Green and Blue Infrastructure (GBI) provides numerous ecosystem services (ES) that may enhance urban liveability, equity, and resilience, particularly by supporting climate change adaptation. Specifically, the cooling capacity of GBI refers to the ability of parks, trees, gardens, lakes, rivers, or coastal waters to locally reduce air temperatures, offering thermal comfort to residents during heat waves (Aram, Higuera García, Solgi, & Mansournia, 2019). This cooling effect results from three main ecosystem functions: shading, which blocks incoming solar radiation; evapotranspiration, which cools the air through water vapor release; and wind modulation, which influences air movement and heat exchange (Bowler et al., 2010). Because cooling capacity depends on the spatial closeness of GBI to the people exposed to heat, it is inherently spatially explicit (Geijzendorffer, Martin-Lopez, & Roche, 2015). Mapping the cooling capacity alongside vulnerable population groups can reveal spatial patterns of inequity in the distribution of this ecosystem service, highlighting potential environmental justice issues (Kremer et al., 2016).

While at the district or neighbourhood scale, physically based microclimate models, such as ENVI-met, simulate detailed surface-atmosphere interactions and the effects of vegetation, shading, and morphology on local thermal conditions, enabling fine-resolution scenario testing and planning interventions (Matzarakis et al., 2007; Lindberg et al., 2008; Santamouris, 2013), at the city or metropolitan scale, the literature identifies remote sensing-based analysis of land surface temperature (LST) and GIS-based ecosystem service models (such as InVEST and I-tree) as the most effective methods to estimate urban cooling capacity (e.g., Pappalardo et al., 2023; Herreros-Cantis & McPhearson, 2021; Baró et al., 2019; Zardo et al., 2017; Chen et al., 2009). These approaches provide comprehensive spatial coverage and allow integration of biophysical and socio-demographic variables, supporting large-scale assessments and policy applications.

In this context, this study investigates the following research questions: how do mismatches between the supply and demand of urban cooling capacity relate to issues of distributional justice? Specifically, what is the spatial distribution of cooling capacity provided by Urban Green Infrastructure (UGI), and how does this correspond to the vulnerability of different population groups to heat stress? By integrating geographic, climatic, and socio-demographic data, employing the InVEST urban cooling model and exploring their interrelationships through linear regression analysis in the city of Bologna, this research aims to identify areas where ecosystem service provision is insufficient relative to social need, thereby highlighting zones requiring targeted and more urgent interventions. Understanding these spatial dynamics is critical to ensuring that policies aimed at improving urban climate resilience do not inadvertently exacerbate social inequalities by unevenly distributing benefits and burdens. The remainder of this document is structured as follows: Section 2 summarizes the methods; Section 3 presents the results and discussion for the city of Bologna; and Section 4 provides the conclusions and outlines the study's limitations.

2. Methods

2.1. Study area

Bologna, the regional capital of Emilia-Romagna, is situated in northern Italy within the Po Valley and experiences a humid subtropical climate (Cfa Köppen classification). Covering an area of 141 km², the city is home to approximately 390,000 residents, with a population density of around 2,700 inhabitants per km² (Dati statistici, n.d.).

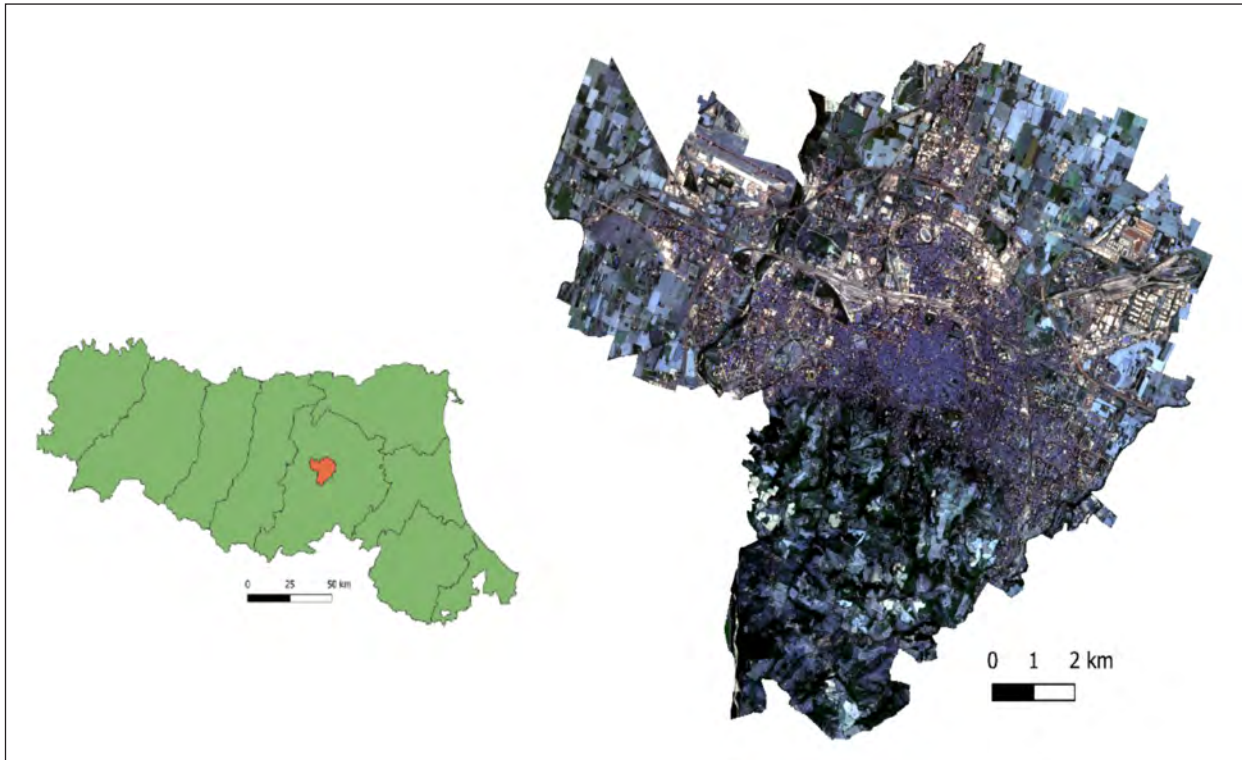


Figure 1. The location of Bologna in Emilia Romagna (left); a satellite image of the city in false color composite (right).

The municipality is divided into six districts and is further subdivided into 2,333 census blocks (Basi territoriali del comune di Bologna, n.d.). As in many compact Italian cities, the historic centre is characterized by a high population density and an important share of impervious surfaces, with over 95% built-up and sealed (BUS) areas and less than 5% urban green areas (UGA). Surrounding neighbourhoods and the northern parts of Bologna display more variability, with BUS ranging from 40% to 95% and UGA up to 60%, while the southern area, consisting of hills and woodlands, contributes significantly to ecosystem service (ES) provision (Vignoli et al., 2021). For this reason, the historic centre faces the most severe Urban Heat Island (UHI) effect (Saber et al., 2025). Bologna's territorial, climatic, and demographic traits make it an ideal case study to examine the capacity of Urban Green Infrastructure (UGI) to mitigate heat and to investigate the spatial mismatch between ES supply and demand, particularly in relation to vulnerable population groups.

2.2 Mapping cooling capacity supply

The supply of cooling capacity was mapped using the InVEST urban cooling model. The InVEST Urban Cooling Model was selected because it is open-source, requires only commonly available spatial datasets (such as land use/use cover, albedo, shade, and reference temperature),

and allows for scenario modeling and spatially explicit mapping of cooling capacity. Previous studies (Bosch et al. 2021; Zawadzka et al. 2021) have demonstrated that the model provides reasonable approximations to observed land surface temperatures and supports decision-making at the planning scale — even in contexts with limited microclimatic data. The software operates within a framework that distinguishes “supply, service, and value,” linking ecosystem production functions to the benefits they provide to people. Specifically, the production function quantifies the output of ecosystem services generated by the environment, enabling assessment of how land or water changes impact ES levels (InVEST User Guide, n.d.). The InVEST urban cooling model estimates temperature reductions resulting from increased vegetation cover. This model calculates a heat mitigation index based on factors such as shading, evapotranspiration, albedo, and proximity to cooling areas like parks. The model utilizes indices from Zardo et al. (2017) and Kunapo et al. (2018), integrating albedo to specifically address heat reduction. Key metrics include the shade factor ('shade'), representing the proportion (0-1) of tree canopy (≥ 2 m in height) per LULC category, and the Evapotranspiration Index (ETI), a normalized value for potential evapotranspiration, also estimated per LULC value (InVEST User Guide, n.d.). The input data used to run the model are summarized in Table 1.

Table 1. Data needed for cooling capacity supply analysis

Type of data	Format	Source
Land Use / Land Cover (LULC)	Raster (10m resolution)	Regione Emilia Romagna
Evapotranspiration	Raster (10m resolution)	Regional Environmental Protection Agency of Emilia-Romagna
Municipality administrative units	Vector	Regione Emilia Romagna
Biophysical table Baseline air temperature (°C) Magnitude of the UHI effect (°C)	CSV	Elaborated by the author Monthly bulletin of ARPAE (Meteo report e bollettini, s.d.) – 29°C July 2021 Monthly bulletin of ARPAE (Meteo report e bollettini, s.d.) 6°C July 2021

Values recommended by the model have been used for air temperature maximum blending distance (500 m see Schatz et al. 2014 and Lonsdorf et al. 2021) and green area maximum cooling distance (e.g. 450 m as recommended by the model guide, see (InVEST User Guide, n.d.).

The cooling capacity supply was then estimated for each statistical area of Bologna computing the results of INVEST with the zonal statistics tool in QGIS. Overlapping of the raster map obtained with InVEST and the vector map with statistical areas, the mean value of heat mitigation was obtained for reference census areas, to allow spatial coherency with the demographic data.

2.3 Mapping cooling capacity demand

Population vulnerability is determined by exposure to a certain hazard and sensitivity to its adverse effect (Weber et al., 2015) and can be considered as the propensity or predisposition to be adversely affected (IPCC, Glossary, 2021) by specific groups of exposed elements. Social vulnerability emphasizes demographic and socioeconomic factors that influence how hazards may impact local populations (Cutter et al., 2009). In this context, the hazard is represented by high temperatures and key determinants of social vulnerability include age, gender, race, and socioeconomic status (Cutter et al., 2003, Niu et al., 2021).

In this study, indicators for the social vulnerability index were sourced from the 2020 report on demographic fragility in Bologna (La fragilità demografica, sociale ed economica nei comuni

della Città metropolitana di Bologna, 2020). The report provides a composite fragility index based on demographic, social, and economic indicators and provides data at census area – statistical areas. A specific Heat Vulnerability Index (HVI) was created by selecting the most influential factors across these three domains based on literature. The selected indicators are summarized in Table 2.

Table 2. Data used for defining the Heat Vulnerability Index (HVI) coming from the demographic fragility index of Bologna

Data available per statistical area	Domain
Percentage of population aged 80 and older	Demographic
Percentage of population aged 65 and older living alone	Social
Percentage of foreign population aged 0-19 relative to the total 0-19 population	Social
Percentage of elderly with high or very high health fragility	Social
Median per capita equivalent income of resident families	Economic
Percentage of families with median per capita equivalent income below €13,002	Economic

The final HVI was derived by first normalizing each indicator value to a 0–1 range using the min-max method, where the minimum and maximum values across all statistical areas were assigned 0 and 1, respectively. For each statistical area, the single normalised indicator values were then aggregated into the composite index by calculating the arithmetic mean of their normalized values. No weighting has been given to the different indicators in the index development process.

2.4 Analysing the supply-demand mismatch

To allow spatial coherency between cooling capacity values (pixel) and demographic data (per statistical area), the cooling capacity supply was then aggregated for each statistical area of Bologna computing the results of InVEST with the zonal statistics tool in QGIS to obtain the mean value of heat mitigation was obtained for reference census areas, to allow spatial coherency with the demographic data. To investigate the relationship between cooling capacity supply and demand in Bologna, a simple linear regression was performed on the maps generated from previous analyses. This statistical technique is used to examine the relationship between a single independent variable and a single dependent variable, assuming a linear connection between them. This analysis specifically assessed the link between cooling capacity and heat vulnerability, using the InVEST heat mitigation map as the independent variable and the heat vulnerability index map as the dependent variable. The regression was conducted in QGIS using the GRASS tool `r.regression.line`.

3. Results

3.1. Cooling capacity supply

The InVEST Urban Cooling Model produces a raster map of the Heat Mitigation Index (HMI). The resulting map (Fig. 2) illustrates the spatial distribution of HMI in Bologna's historic centre and surrounding areas. The results reflect the city's land-use configuration, particularly considering built-up surfaces and green and blue areas.

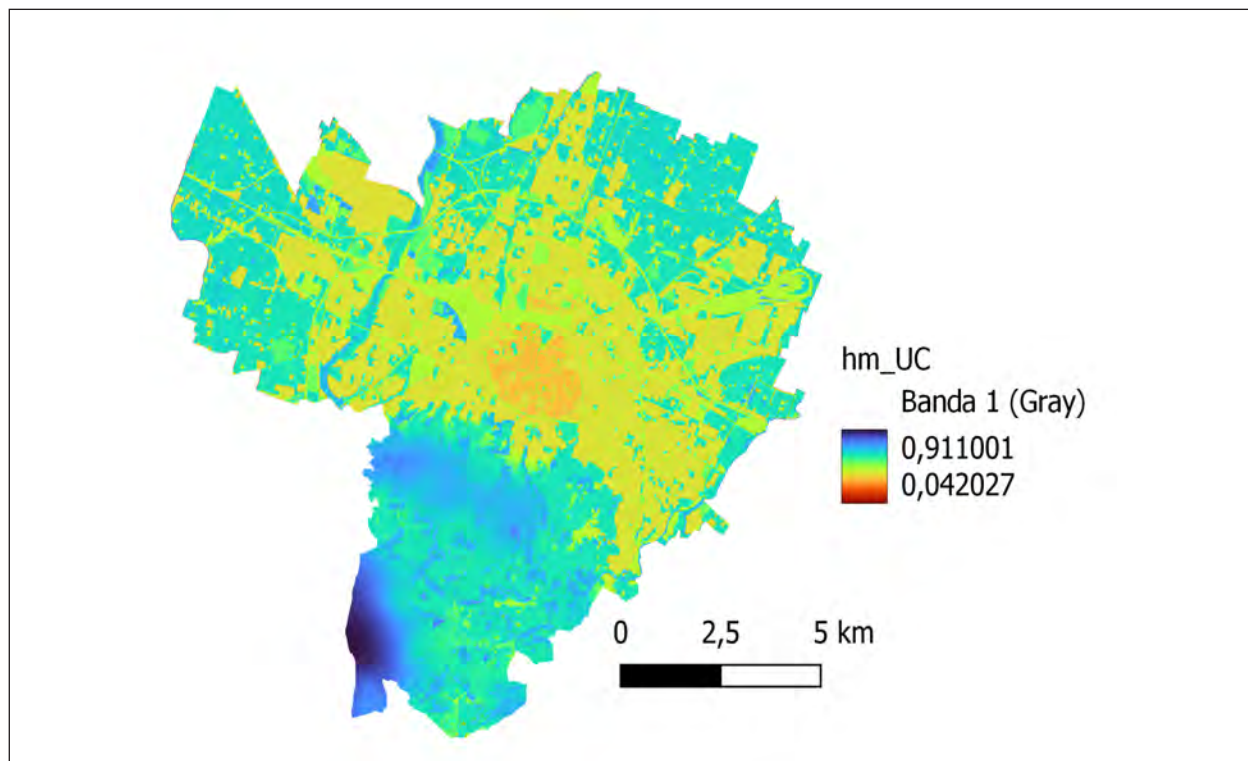


Figure 2. Heat Mitigation Index in the city of Bologna.

The historic centre, dominated by a high proportion of built-up surfaces and limited green cover, is the area that exhibits the lowest cooling capacity and heat mitigation index. In contrast, the southern and western parts of the city—characterized by hills and woodlands—perform best in terms of heat mitigation and cooling potential. Looking at Fig. 3, the HMI is represented at the level of statistical areas, where red tones correspond to low values and blue tones indicate higher values. The most critical zones are located in the city centre which display an average HMI of 0.35. Conversely, the hilly areas in the southern part of Bologna demonstrate the highest heat mitigation capacity, with an average HMI of 0.69. These spatial patterns underscore the strong correlation between land cover composition and urban microclimatic regulation, highlighting the key role of vegetation and natural landforms in mitigating heat stress.

3.2. Cooling capacity demand

The Heat Vulnerability Index (HVI) identifies the areas of Bologna where population groups most sensitive to extreme heat are concentrated (Fig. 4). The highest index values are observed in the north-central sectors of the city. The peripheral districts in the western and eastern part of the city, together with the first periphery outside the historic city centre, emerge as the most socially vulnerable, primarily due to a high proportion of residents aged eighty years and older, elderly individuals with health fragilities, and citizens with low income.

Conversely, the least vulnerable areas are located on the city's southern hilly part where demographic and socioeconomic conditions may contribute to greater resilience against extreme heat.

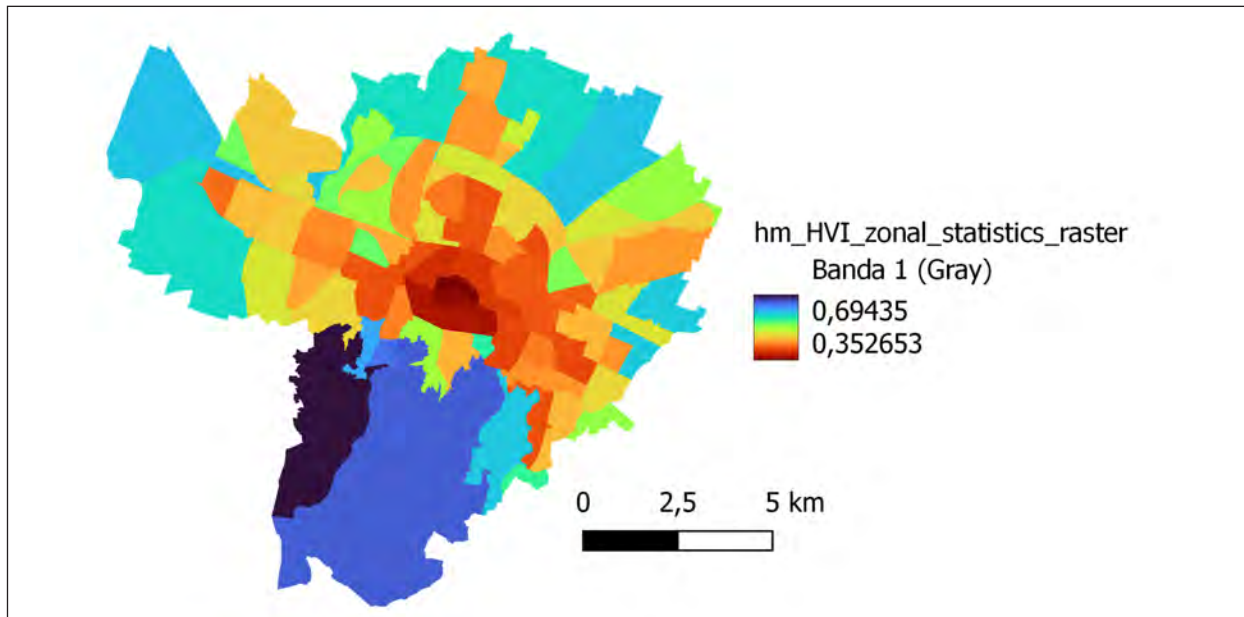


Figure 3. Heat mitigation Index (HMI) in the city of Bologna per zonal statistics.

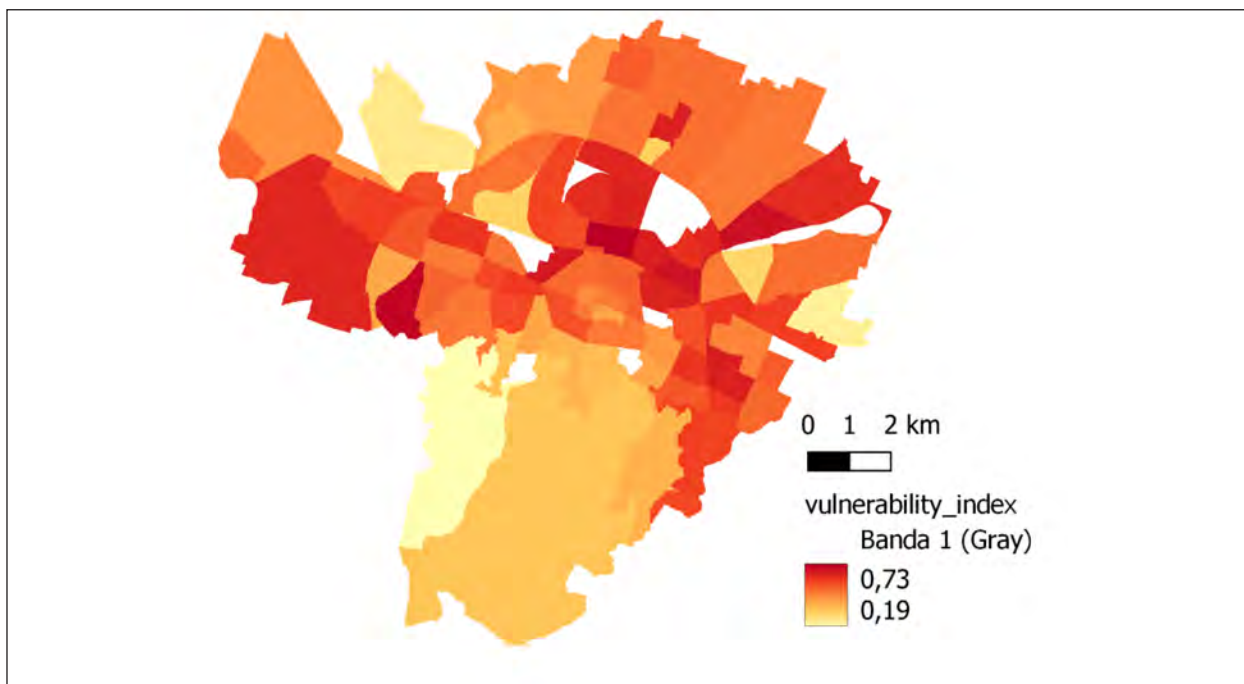


Figure 4. Heat vulnerability index per statistical area in the city of Bologna.

3.3 Spatial supply-demand mismatch

The linear regression analysis produced a map (Fig. 5) that highlights the spatial relationship between the supply of cooling capacity, expressed through the HMI, and its demand, determined by population vulnerability to high temperatures.

The relationship between cooling capacity supply and heat vulnerability was analysed using simple linear regression on the raster data, with the InVEST heat mitigation map (X) as the predictor and the heat vulnerability index map (Y) as the dependent variable. The regression yielded the formula $Y=0.941629+(-0.870002)X$.

The slope ($b=-0.870002$) indicates a significant inverse relationship: for every unit increase in cooling capacity, heat vulnerability decreases by 0.87 units. The model explained approximately 34% ($R \approx 0.34$) of the variance in heat vulnerability, demonstrating a moderately strong negative correlation ($R=-0.58$). The model was found to be highly statistically significant ($F>670,000$, with $N=1,334,703$ observations).

Looking at the spatial distribution, positive values in Fig. 5 show areas where the model under-predicted the Heat Vulnerability. In these areas, the actual vulnerability is higher than what the cooling capacity supply map suggests. On the other side, negative values imply an over-prediction of the model where the actual vulnerability is lower than expected based on the cooling capacity supply. Polygons in white represents industrial, urban green areas or other portion of the city with no resident population.

The model explained approximately 34% ($R^2 \approx 0.34$) of the variance in heat vulnerability. The spatial analysis of the regression residuals reveals a clear spatial structure in the unexplained variance, demonstrating that the linear relationship is not uniform across the city. Specifically, the dark red central and northern areas (see Fig. 5) consistently show positive residuals, meaning the observed vulnerability is significantly higher than predicted by the cooling capacity model. This spatial cluster of under-prediction highlights a model weakness in the dense urban core, where factors beyond cooling capacity may drive the risk.

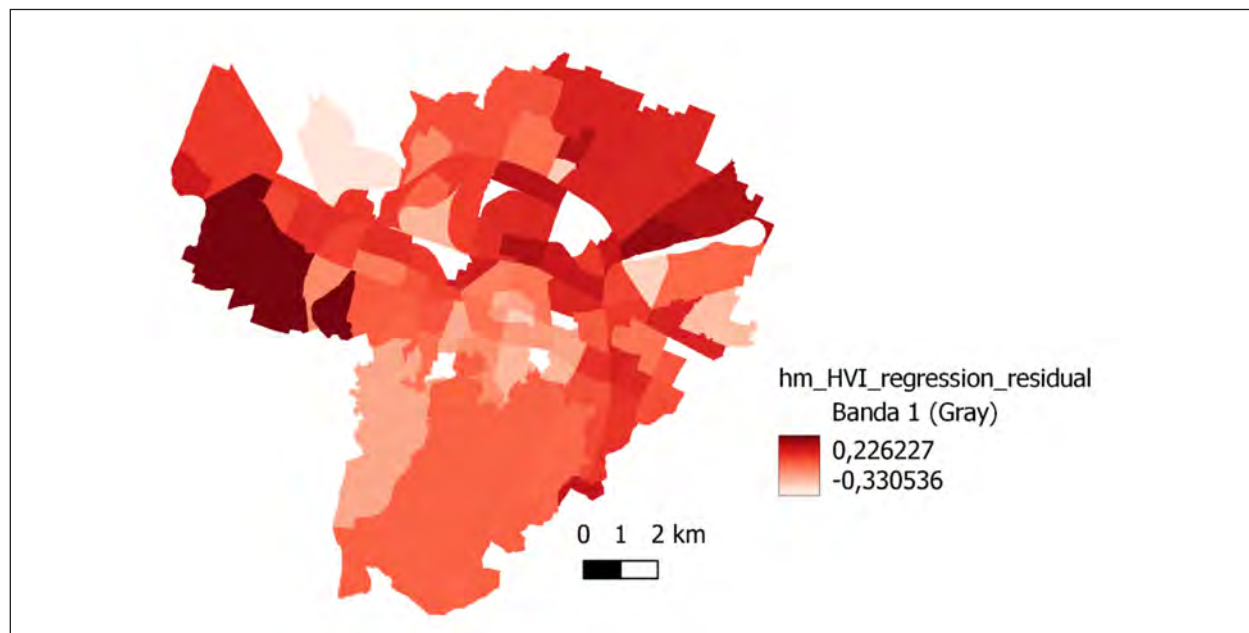


Figure 5. Linear regression results between supply and demand of cooling capacity per statistical area.

4. Discussion

In recent years, the growing awareness around climate change and related climate justice issues is contributing to raise interest in urban studies tackling ES and their social implications (Wu et al., 2022). When spatial analyses of ES are combined with assessments of social vulnerability, it is possible to uncover situations where low ES supply overlap with the distribution of disadvantaged groups. Such overlaps highlight problems of distributional justice, where the population most in need of ES is also least likely to benefit from them.

The findings of this study aligns with established literature (Venter et al., 2023; Harlan et al., 2006) and highlights that urban GBI (the source of the InVEST map) functions as an effective

supply-side heat mitigation measure, yet its impact is attenuated in areas with pre-existing, non-environmental risk factors. The prominent spatial pattern of the positive residuals—clustered in the northern and western peripheries— may be a characteristic of cities where high social vulnerability (e.g., share of elderly people and lower income) is concentrated in specific area of the city, a phenomenon often referred to as thermal inequity (Pincetl et al., 2016; Harlan et al., 2006). A recent systematic review further confirms that most cases exhibit patterns of environmental injustice, with higher-income areas generally enjoying greater availability, accessibility, and quality of ES, while disadvantaged groups are systematically neglected (Kato-Huerta & Geneletti, 2022).

As well, research in New York has demonstrated that ethnic minorities and low-income populations are more likely to reside in areas with a high mismatch between ES supply and demand (Herrerros-Cantis & McPhearson, 2021).

4.1 Limitations and future studies

The construction of the Heat Vulnerability Index (HVI) relied on the assumption that all indicators contribute equally to population vulnerability to high temperatures. This simplification does not account for the fact that different factors may have varying levels of influence on vulnerability outcomes. Further research is therefore required to determine the relative importance of each indicator, enabling the assignment of differentiated weights that better reflect their actual impact. Secondly, the InVEST model's cooling capacity outputs, were not validated with concurrent, observed temperature measurements (such as high-resolution remote sensing thermal maps or in-situ meteorological station data). While InVEST provides a robust estimate of ecosystem service supply, the lack of empirical thermal validation means the precise local cooling effect attributed to green and blue infrastructure remains theoretical within this study. Finally, the use of simple linear regression assumes a strictly linear relationship between cooling capacity and heat vulnerability and may fail to capture more complex non-linear effects that could better describe the dynamics of urban heat risk.

Beyond heat mitigation, subsequent analyses may also integrate other ecosystem services (ES) to capture a more comprehensive picture of urban socio-ecological dynamics. Finally, expanding the focus beyond distributional justice to include other dimensions—such as procedural, recognition, and intergenerational justice—would allow for a deeper understanding of how justice aspects are manifested in the urban context of Bologna.

5. Conclusion

Urban sprawl and global warming led to an exacerbation of urban heat island effect in compact cities, phenomenon that leads to an increase in temperatures in urban areas comparing to the surrounding rural environments, with serious negative impacts on citizens health and wellbeing.

This study investigated how urban green infrastructure (UGI) could support cooling capacity while also assessing distributional justice in Bologna by incorporating social dimensions into the analysis. Cooling capacity was assessed using the InVEST model, while demand was estimated based on population vulnerability to heat, measured through a set of indicators summarized into the Heat Vulnerability Index (HVI).

The case of Bologna aligns with current literature on the topic, showing evidence of distributional injustice in the provision of heat-mitigation, particularly affecting vulnerable groups such as elderly citizens and low-income residents. The results of this study suggests that to address these disparities, differentiated nature-based solutions (NBS) should be promoted, ranging from hybrid and small-scale interventions (e.g., green roofs and walls) in areas where space is limited, to larger green areas where urban conditions allow, prioritizing area where heat mitigation index is lower and heat vulnerability index is higher. In addition, non-NBS interventions (e.g., incentives for energy retrofitting) should be prioritized for the most vulnerable population groups residing in the hottest parts of the city.

This approach may assume a great relevance in supporting cities climate adaptation as incorporating this type of analysis into urban planning would enable decision makers to improve living conditions for citizens, ensuring greater social justice while enhancing both environmental and social sustainability.

As well, urban greening should be understood as one of several complementary strategies for increasing urban liveability, reducing climate-related risks, and addressing issues of social and environmental justice. Other measures — such as improving the energy efficiency of buildings, thereby aligning poverty alleviation and climate change mitigation goals (Ürge-Vorsatz & Tirado Herrero, 2012), increasing the albedo of urban surfaces, ensuring efficient water resource management, and providing targeted economic support to vulnerable communities for access to cooling facilities — can also contribute significantly to building resilient and inclusive cities.

Authors contribution

Conceptualization: C.d.L; Methodology: C.d.L Raccolta Dati: CdL, DM, Formal analysis: D.M. F.V., C.d.L. Original writing: C.d.L. Review and editing: C.d.L.; Supervision C.d.L.

Bibliography

Journal Article

- Ambrosini D., Galli G., Mancini B., Nardi I. & Sfarra S. (2014). Evaluating mitigation effects of urban heat islands in a historical small center with the ENVI-met® climate model. *Sustainability*, 6(10), 7013–7029. <https://doi.org/10.3390/su6107013>
- Aram F., Higuera Garcia E., Solgi E., Mansournia S. (2019). Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon*, 5, 1339. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01339>
- Balzan M.V., Zulian G., Maes J. & Borg M. (2021). Assessing urban ecosystem services to prioritise nature-based solutions in a high-density urban area. *Nature-Based Solutions*, 2, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2021.100007>
- Baró F., Calderón-Argelich J., Langemeyer J. & Connolly J.J.T. (2019). Under one canopy? Assessing the distributional environmental justice implications of street tree benefits in Barcelona. *Environmental Science & Policy*, 102, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.08.016>
- Bartesaghi-Koc C., Osmond P. & Peters J. (2020). Quantifying the seasonal cooling capacity of green infrastructure types (GITs): An approach to assess and mitigate surface urban heat island in Sydney, Australia. *Landscape and Urban Planning*, 203, 103893. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103893>
- Bonacquisti V., Casale G.R., Palmieri S. & Siani J.M. (2006). A canopy layer model and its application to Rome. *Science of the Total Environment*, 364(1–3), 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.09.097>
- Bosch M., Locatelli M., Hamel P., Remme R.P., Chenal J. & Joost S. (2021). A spatially explicit approach to simulate urban heat mitigation with InVEST (v3.8.0). *Geoscientific Model Development*, 14(6), 3521–3537. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3521-2021>
- Bowler D.E., Buyung-Ali L., Knight T.M., Pullin J.S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97, 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Chen N., Li H. & Wang L. (2009). A GIS-based approach for mapping direct use value of ecosystem services at a county scale: Management implications. *Ecological Economics*, 68, 2768–2776. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.12.001>
- Cheng X., Van Damme S. & Uyttenhove P. (2021). A review of empirical studies of cultural ecosystem services in urban green infrastructure. *Journal of Environmental Management*, 293, 112895. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112895>
- Conti S., Meli P., Minelli G., Solimini R., Toccaceli V., Vichi M., Beltrano C. & Perini L. (2005). Epidemiologic study of mortality during the summer 2003 heat wave in Italy. *Environmental Research*, 98(3), 390–399. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2004.10.009>

- Cortinovis C. & Geneletti D. (2020). A performance-based planning approach integrating supply and demand of urban ecosystem services. *Landscape and Urban Planning*, 201, 103842. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103842>
- Costanza R. (2008). Ecosystem services: Multiple classification systems are needed. *Biological Conservation*, 141(2), 350–352. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.12.020>
- Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P. & van den Belt M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Cutter S.L., Emrich C.T., Webb J.J. & Morath D. (2009). Social vulnerability to climate variability hazards: A review of the literature. Oxfam America.
- Cutter S.L., Boruff B.J. and Shirley W.L. (2003), Social Vulnerability to Environmental Hazards*. *Social Science Quarterly*, 84, 242–261. <https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002>
- Evans D.L., Falagán N., Kourmpetli S., Liu L., Mead B.R. & Davies J.A.C. (2022). Ecosystem service delivery by urban agriculture and green infrastructure: A systematic review. *Ecosystem Services*, 54, 101405. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101405>
- Geijzendorffer I.R., Martín-López B. & Roche P.K. (2015). Improving the identification of mismatches in ecosystem services assessments. *Ecological Indicators*, 52, 320–331. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.12.016>
- González-García J., Palomo I., González J.A., García-Díez V., García-Llorente M. & Montes C. (2022). Biodiversity and ecosystem services mapping: Can it reconcile urban and protected area planning? *Science of the Total Environment*, 803, 150048. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150048>
- Goodchild M. F. & Batty M. (2019). *Urban analytics: Spatial data science for cities*. Oxford University Press.
- Harlan S.L., Brazel J.J., Jones N.S., Larsen L. & Prashad L. (2006). Neighborhood effects on heat deaths: Social and environmental predictors of vulnerability in Maricopa County, Arizona. *Environmental Health Perspectives*, 114(11), 1730–1736. <https://doi.org/10.1289/ehp.8637>
- Herreros-Cantis P. & McPhearson T. (2021). Mapping supply of and demand for ecosystem services to assess environmental justice in New York City. *Ecological Applications*, 31(6), e02390. <https://doi.org/10.1002/eap.2390>
- IPCC. (2021). Annex VII: Glossary [J. B. R. Matthews V. Möller R. van Diemen J. S. Fuglestedt V. Masson-Delmotte C. Méndez S. Semenov & A. Reisinger, Eds.]. In V. Masson-Delmotte P. Zhai J. Pirani S. L. Connors C. Péan S. Berger N. Caud Y. Chen L. Goldfarb M. I. Gomis M. Huang K. Leitzell E. Lonnoy J. B. R. Matthews T. K. Maycock T. Waterfield O. Yelekçi R. Yu & B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 2215–2256). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.022>
- IPCC. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. Summary for policymakers*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Kato-Huerta J. & Geneletti D. (2022). Environmental justice implications of nature-based solutions in urban areas: A systematic review of approaches, indicators, and outcomes. *Environmental Science & Policy*, 137, 174–188. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.07.034>
- Kremer P., Hamstead Z., Haase D., McPhearson T., Frantzeskaki N., Andersson E., Kabisch N., Larondelle N., Rall E.L., Voigt J., Baró F., Bertram C., Gómez-Baggethun E., Hansen R., Kaczorowska J., Kain J.-H., Kronenberg J., Langemeyer J., Pauleit S., ... Elmqvist T. (2016). Key insights for the future of urban ecosystem services research. *Ecology and Society*, 21(2). <http://www.jstor.org/stable/26270402>
- Kunapo J., Fletcher T.D., Ladson J.R., Cunningham L. & Burns M.J. (2018). A spatially explicit framework for climate adaptation. *Urban Water Journal*, 15(2), 159–166. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2018.1424216>
- Lakes T. & Kim H.-O. (2012). The urban environmental indicator “Biotope Area Ratio”: An enhanced approach to assess and manage urban ecosystem services using high-resolution remote sensing. *Ecological Indicators*, 13(1), 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.05.016>

- Laster Grip I., Haghighatafshar S. & Aspegren H. (2021). A methodology for the assessment of compound sea level and rainfall impact on urban drainage networks in a coastal city under climate change. *City and Environment Interactions*, 12, 100074. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2021.100074>
- Liang L., Deng X., Wang P., Wang Z. & Wang L. (2020). Assessment of the impact of climate change on city livability in China. *The Science of the Total Environment*, 726, 138339. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138339>
- Lindberg F., Holmer B. & Thorsson S. (2008). SOLWEIG 1.0--modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *International journal of biometeorology*, 52(7), 697–713. <https://doi.org/10.1007/s00484-008-0162-7>
- Liu H., Huang B., Zhan Q., Gao S., Li R. & Fan Z. (2021). The influence of urban form on surface urban heat island and its planning implications: Evidence from 1288 urban clusters in China. *Sustainable Cities and Society*, 71, 102987. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102987>
- Liu L. & Wu J. (2022). Scenario analysis in urban ecosystem services research: Progress, prospects, and implications for urban planning and management. *Landscape and Urban Planning*, 224, 104433. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104433>
- Llodrà-Llabrés J. & Cariñanos P. (2022). Enhancing pollination ecosystem service in urban green areas: An opportunity for the conservation of pollinators. *Urban Forestry & Urban Greening*, 74, 127621. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127621>
- Lonsdorf E.V., Nootenboom C., Jnke B., Horgan B.P. (2021). Assessing urban ecosystem services provided by green infrastructure: Golf courses in the Minneapolis-St. Paul metro area. *Landscape and Urban Planning*, 208, 104022. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.104022>
- Lourdes K.T., Hamel P., Gibbins C.N., Sanusi R., Azhar B. & Lechner A.M. (2022). Planning for green infrastructure using multiple urban ecosystem service models and multicriteria analysis. *Landscape and Urban Planning*, 226, 104500. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104500>
- Marando F., Salvatori E., Sebastiani J., Fusaro L. & Manes F. (2018). Regulating ecosystem services and green infrastructure: Assessment of urban heat island effect mitigation in the municipality of Rome, Italy. *Ecological Modelling*, 392, 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.11.011>
- Matzarakis J., Martinelli L. & Ketterer C. (2016). Relevance of thermal indices for the assessment of the urban heat island. In F. Musco (Ed.), *Counteracting urban heat island effects in a global climate change scenario* (pp. 85–101). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10425-6>
- Muresan J.N., Sebastiani J., Gaglio M., Fano E.A. & Manes F. (2022). Assessment of air pollutants removal by green infrastructure and urban and peri-urban forests management for a greening plan in the municipality of Ferrara (Po River Plain, Italy). *Ecological Indicators*, 135, 108554. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108554>
- Niu Y., Li Z., Gao Y., Liu X., Xu L., Vardoulakis S., Yue Y., Wang J. & Liu Q. (2021). A Systematic Review of the Development and Validation of the Heat Vulnerability Index: Major Factors, Methods, and Spatial Units. *Current climate change reports*, 7(3), 87–97. <https://doi.org/10.1007/s40641-021-00173-3>
- Oke T.R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, 7(8), 769–779. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)
- Pappalardo S.E., Zanetti C. & Todeschi V. (2023). Mapping urban heat islands and heat-related risk during heat waves from a climate justice perspective: A case study in the municipality of Padua (Italy) for inclusive adaptation policies. *Landscape and Urban Planning*, 238, 104831. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104831>
- Pelorosso R., Gobattoni F., La Rosa D. & Leone J. (2015). Ecosystem Services based planning and design of Urban Green Infrastructure for sustainable cities. In *Atti della XVIII Conferenza Nazionale SIU Società Italiana degli Urbanisti*
- Pincetl S., Chester M. & Eisenman D. (2016). Urban Heat Stress Vulnerability in the U.S. Southwest: The Role of Sociotechnical Systems. *Sustainability*, 8(9), 842. <https://doi.org/10.3390/su8090842>
- Pukowiec-Kurda K. (2022). The urban ecosystem services index as a new indicator for sustainable urban planning and human well-being in cities. *Ecological Indicators*, 143, 109532. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109532>

- Saber A., De Luca C., Pourzangbar A., Tondelli S., Bell M.L. (2025). Heat wave risk assessment in Bologna using Spatio-temporal artificial intelligence: Leveraging LSTM enhanced by the hippopotamus optimization algorithm. *Sustainable Cities and Society*, 131, 106671. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106671>
- Saint-Onge K., Coulombe S., Philibert M., Wiesztort L. & Houle J. (2022). How urban parks nurture eudaimonic and hedonic wellbeing: An explorative large-scale qualitative study in Québec, Canada. *Wellbeing, Space and Society*, 3, 100095. <https://doi.org/10.1016/j.wss.2022.100095>
- Santamouris M., 2013. Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, vol. 26(C), pages 224-240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>
- Schatz J. & Kucharik C.J. (2014). Seasonality of the Urban Heat Island Effect in Madison, Wisconsin. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(10), 2371-2386. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0107.1>
- Sun R., Jin X., Han B., Liang X., Zhang X. & Zhou Y. (2022). Does scale matter? Analysis and measurement of ecosystem service supply and demand status based on ecological unit. *Environmental Impact Assessment Review*, 95, 106785. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106785>
- Tao Y., Tao Q., Sun X., Qiu J., Pueppke S.G., Ou W. & Qi J. (2022). Mapping ecosystem service supply and demand dynamics under rapid urban expansion: A case study in the Yangtze River Delta of China. *Ecosystem Services*, 56, 101448. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101448>
- Toparlar Y., Blocken B., Maiheu B. & van Heijst G.J.F. (2017). The effect of an urban park on the microclimate in its vicinity: A case study for Antwerp, Belgium. *International Journal of Climatology*, 38(1), e303-e322. <https://doi.org/10.1002/joc.5371>
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)*. New York: United Nations.
- Ürge-Vorsatz D. & Tirado Herrero S. (2012). Building synergies between climate change mitigation and energy poverty alleviation. *Energy Policy*, 49, 83-90. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.093>
- Venter Z.S., Figari H., Krange O. & Gundersen V. (2023). Environmental justice in a very green city: Spatial inequality in exposure to urban nature, air pollution and heat in Oslo, Norway. *The Science of the total environment*, 858(Pt 3), 160193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160193>
- Venter Z.S., Krog N.H. & Barton D.N. (2020). Linking green infrastructure to urban heat and human health risk mitigation in Oslo, Norway. *Science of the Total Environment*, 709, 136193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136193>
- Vignoli F., De Luca C. & Tondelli S. (2021). A spatial ecosystem services assessment to support decision and policy making: The case of the city of Bologna. *Sustainability*, 13(5), 2787. <https://doi.org/10.3390/su13052787>
- Wang C., Ren Z., Dong Y., Zhang P., Gu Y., Wang W. & Bai G. (2022). Efficient cooling of cities at global scale using urban green space to mitigate urban heat island effects in different climatic regions. *Urban Forestry & Urban Greening*, 74, 127635. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127635>
- Weber S., Sadoff N., Zell E. & de Sherbinin J. (2015). Policy-relevant indicators for mapping the vulnerability of urban populations to extreme heat events: A case study of Philadelphia. *Applied Geography*, 63, 231-243. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.07.006>
- Woodruff S.C. & BenDor T.K. (2016). Ecosystem services in urban planning: Comparative paradigms and guidelines for high-quality plans. *Landscape and Urban Planning*, 152, 90-100. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.04.003>
- Wu L., Kim S.K. & Lin C. (2022). Socioeconomic groups and their green spaces availability in urban areas of China: A distributional justice perspective. *Environmental Science & Policy*, 131, 26-35. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.01.008>
- Zardo L., Geneletti D., Pérez-Soba M. & Van Eupen M. (2017). Estimating the cooling capacity of green infrastructures to support urban planning. *Ecosystem Services*, 26(A), 225-235. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.06.016>
- Zawadzka J., Harris J.A. & Corstanje R. (2021). Assessment of heat mitigation capacity of urban greenspaces with the use of InVEST urban cooling model, verified with day-time land surface temperature data. *Landscape and Urban Planning*, 214, 104163. <https://doi.org/10.1016/>

j.landurbplan.2021.104163

Zhang H. & Wilson D. (2023). Spatial modelling of park accessibility and its influence on property values: A comparative study using random forest and OLS. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 16(1), 55–77.

Webpage

Ambiti amministrativi. (nd). Estratto da Geoportale Regione Emilia-Romagna, gennaio 2023: <https://geoportale.regione.emilia-romagna.it/download/dati-e-prodotti-cartografici-preconfezionati/confini-amministrativi>

Basi territoriali del comune di Bologna. (nd). Estratto da I numeri di Bologna metropolitana: <http://inumeridibolognametropolitana.it/basi-territoriali-del-comune-di-bologna>

Catalogo dei metadati del portale cartografico. (nd). Estratto da ARPAE, gennaio 2023: <https://www.arpae.it/it/dati-e-report/dati-ambientali/consulta-catalogo-dei-metadati-del-portale-cartografico>

Città di Melbourne (2023). *Strategia per le foreste urbane: creare una città più fresca e verde*. <https://www.melbourne.vic.gov.au/urbanforest>

Copernico (2023). <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2022-was-year-climate-extremes-record-high-temperatures-and-rising-concentrations>

Coperture vettoriali dell'uso del suolo. (nd). Estratto da Geoportale Regione Emilia-Romagna, gennaio 2023: <https://geoportale.regione.emilia-romagna.it/download/dati-e-prodotti-cartografici-preconfezionati/pianificazione-e-catasto/uso-del-suolo/2003-coperture-vettoriali-uso-del-suolo-di-dettaglio-edizione-2021/dati-preconfezionati>

Dati statistici. (nd). Estratto da i numeri di Bologna metropolitana, gennaio 2023: <http://inumeridibolognametropolitana.it/dati-statistici/superficie-e-densita-di-popolazione-al-31-dicembre>

Guida per l'utente del progetto InVEST Natural Capital. (nd). Tratto da <https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/index.html>

IPCC, Glossario, 2021. Recuperato da, ottobre 2025: <https://apps.ipcc.ch/glossary/>

La fragilità demografica, sociale ed economica nei comuni della Città metropolitana di Bologna 2020. (2020). Estratto da I numeri di Bologna metropolitana, gennaio 2023: <http://inumeridibolognametropolitana.it/studi-e-ricerche/la-fragilita-demografica-sociale-ed-economica-nei-comuni-della-citta-2>

Meteo e bollettini. (nd). Estratto da ARPAE, gennaio 2023: https://aggiornati.arpae.it/it/temi-ambientali/meteo/report-meteo/bollettini-mensili/bm_202107.pdf/view

Equità e giustizia nella distribuzione dei servizi ecosistemici: capacità di raffrescamento e vulnerabilità al calore nella città di Bologna

Claudia de Luca^{1,*}, Denise Morabito¹, Francesco Vettore¹

¹ Dipartimento di Architettura, Alma Mater Studiorum University of Bologna, Viale Risorgimento 2, 40123, Bologna, Italia, Claudia.deluca5@unibo.it; denise.morabito@studio.unibo.it; francesco.vettore@unibo.it

* autore corrispondente

Parole chiave

Ondate di calore,
Infrastruttura verde,
Adattamento climatico,
Disuguaglianza socio-
spaziale, Soluzioni
basate sulla natura

Abstract

L'impatto delle ondate di calore sull'ambiente urbano sta diventando sempre più critico a causa degli effetti combinati del riscaldamento globale, della morfologia urbana, della densità di popolazione e della vulnerabilità. Le aree urbane, soprattutto nelle cosiddette città compatte, sono spesso caratterizzate da vegetazione limitata ed elevata impermeabilità superficiale, e tendono ad assorbire e trattenere una maggiore quantità di radiazione solare, generando il fenomeno dell'isola di calore urbana. La mancanza di verde non solo riduce la capacità di raffrescamento naturale, attraverso processi come l'evapotraspirazione e l'ombreggiamento, ma limita anche l'erogazione di altri importanti servizi ecosistemici a beneficio sia dell'ambiente che della popolazione. Fattori socioeconomici, come l'invecchiamento della popolazione e la diseguale distribuzione del reddito possono inasprire l'impatto delle condizioni ambientali rafforzando le disuguaglianze spaziali. La sovrapposizione di questi fattori evidenzia la necessità di approcci spazialmente informati che considerino sia l'offerta ecologica di servizi di raffrescamento sia la domanda sociale, in particolare in relazione alla giustizia ambientale. Questo studio analizza la capacità di raffrescamento delle Infrastrutture Verdi Urbane (IVB) di Bologna integrando dati climatici, grazie al modello InVEST, e socio-demografici, ed esplorando loro interrelazioni utilizzando un'analisi regressione lineare. I risultati consentono di identificare discrepanze tra l'offerta e la domanda di servizi di raffrescamento, soprattutto nelle aree abitate da gruppi sociali più vulnerabili, fornendo spunti preziosi alla pianificazione e ai responsabili politici.

1. Introduzione

Il continuo aumento delle ingiustizie sociali e ambientali, inasprite o alimentate dai cambiamenti climatici, rende le richieste di giustizia climatica sempre più forti e frequenti. A livello globale, gli ultimi 8 anni sono stati i più caldi di sempre e nel 2022 l'Europa ha vissuto l'estate più calda mai registrata (Copernicus, 2023). Inoltre, le proiezioni sui cambiamenti climatici per il continente indicano che le temperature e i relativi impatti socio-economici aumenteranno a un ritmo accelerato a meno che non vengano messe in atto forti azioni di mitigazione e adattamento (IPCC, 2021).

Allo stesso tempo, oggi oltre il 55% della popolazione mondiale vive in aree urbane e si prevede che entro il 2050 la percentuale si avvicinerà al 70% (UN, 2019). Un problema importante per le aree densamente popolate rispetto al riscaldamento globale è il cosiddetto effetto isola di calore urbana (UHI), dove l'ambiente costruito assorbe le radiazioni solari e rilascia più calore rispetto al paesaggio naturale, determinando così un aumento delle temperature dell'aria e della superficie nelle città rispetto alle aree rurali (Toparlar et al., 2017, Oke, 1973, Matzarakis et al. 2016). L'intensità di questo fenomeno può portare le aree densamente edificate delle città a essere fino a 5-6 °C più calde rispetto alle aree circostanti (Bonacquisti et al. 2006, Ambrosini et al., 2014). Ciò potrebbe avere un impatto significativo sulla salute dei cittadini, portando a un aggravamento delle condizioni di salute esistenti, nel caso di anziani o persone fragili dal punto di vista sanitario, con un conseguente aumento del tasso di mortalità correlato al calore (Ballester et al. 2023, Conti et al. 2004) e colpendo i gruppi più vulnerabili, come le persone a basso reddito (Venter et al., 2020; Krog e Barton, 2019).

L'infrastruttura verde e blu (IVB) fornisce numerosi servizi ecosistemici (ES) che possono migliorare la vivibilità, l'equità e la resilienza urbana, in particolare supportando l'adattamento ai cambiamenti climatici. Nello specifico, la capacità di raffrescamento dell'infrastruttura verde e blu si riferisce alla capacità di parchi, alberi, giardini, laghi, fiumi o acque costiere di ridurre localmente la temperatura dell'aria, offrendo comfort termico ai residenti durante le ondate di calore (Aram, Higuera García, Solgi e Mansournia, 2019). Questo effetto di raffrescamento deriva da tre principali funzioni ecosistemiche: l'ombreggiatura, che blocca la radiazione solare in arrivo; l'evapotraspirazione, che raffredda l'aria attraverso il rilascio di vapore acqueo; e la modulazione del vento, che influenza il movimento dell'aria e lo scambio termico (Bowler et al., 2010). Poiché la capacità di raffrescamento dipende dalla vicinanza spaziale dell'infrastruttura verde e blu alle persone esposte al calore, è intrinsecamente spazialmente esplicita (Geijzenendorffer et al., 2015). La mappatura della capacità di raffrescamento in relazione alla distribuzione spaziale dei gruppi di popolazione vulnerabili può rivelare modelli spaziali di iniquità nella distribuzione di questo servizio ecosistemico, evidenziando potenziali problemi di giustizia ambientale (Kremer et al., 2016).

Mentre a livello di isoalto o di quartiere, i modelli microclimatici, come ENVI-met, simulano interazioni dettagliate superficie-atmosfera e gli effetti della vegetazione, dell'ombreggiamento e della morfologia sulle condizioni termiche locali, consentendo test di scenari ad alta risoluzione e interventi di pianificazione (Matzarakis et al., 2007; Lindberg et al., 2008; Santamouris, 2013), a livello cittadino o metropolitano, la letteratura identifica l'analisi basata sul telerilevamento della temperatura della superficie terrestre (LST) e i modelli di servizi ecosistemici basati su GIS (come InVEST e I-tree) come i metodi più efficaci per stimare la capacità di raffrescamento urbano (ad esempio, Pappalardo et al. 2023, Herreros- Cantis & McPhearson, 2021, Baró et al. 2019; Zardo et al., 2017; Chen et al., 2009). Questi approcci forniscono una copertura spaziale completa e consentono l'integrazione di variabili biofisiche e sociodemografiche, supportando valutazioni su larga scala e applicazioni pratiche.

In questo contesto, questo studio indaga i seguenti quesiti di ricerca: in che modo le discrepanze tra domanda e offerta di capacità di raffrescamento urbano si collegano a questioni di giustizia distributiva? Nello specifico, qual è la distribuzione spaziale della capacità di raffrescamento fornita dalle Infrastrutture Verdi Urbane (UGI) e come questa corrisponde alla vulnerabilità dei diversi gruppi di popolazione allo stress termico? Integrando dati geografici, climatici e socio-demografici, utilizzando il modello di raffrescamento urbano InVEST ed esplorando le loro interrelazioni attraverso l'analisi di regressione lineare nella città di Bologna, questa ricerca mira a identificare le aree in cui la fornitura di servizi ecosistemici è insufficiente rispetto al bisogno sociale, evidenziando così le zone che richiedono interventi mirati e più urgenti. La comprensione di queste dinamiche spaziali è fondamentale per garantire che le politiche volte a migliorare la resilienza climatica urbana non aggravino le disuguaglianze sociali distribuendo in modo non uniforme benefici e oneri. Questo documento è strutturato come segue: la Sezione 2 riassume i metodi; la Sezione 3 presenta i risultati e la discussione per la città di Bologna; e la Sezione 4 fornisce le conclusioni e delinea i limiti dello studio.

2. Metodologia

2.1. Area di studio

Bologna, capoluogo dell'Emilia-Romagna, è situata nel nord Italia, nella Pianura Padana, e gode di un clima subtropicale umido (Cfa Classificazione di Köppen). Estendendosi su una superficie di 141 km², la città ospita circa 390.000 residenti, con una densità di popolazione di circa 2.700 abitanti per km² (Dati statistici, nd).

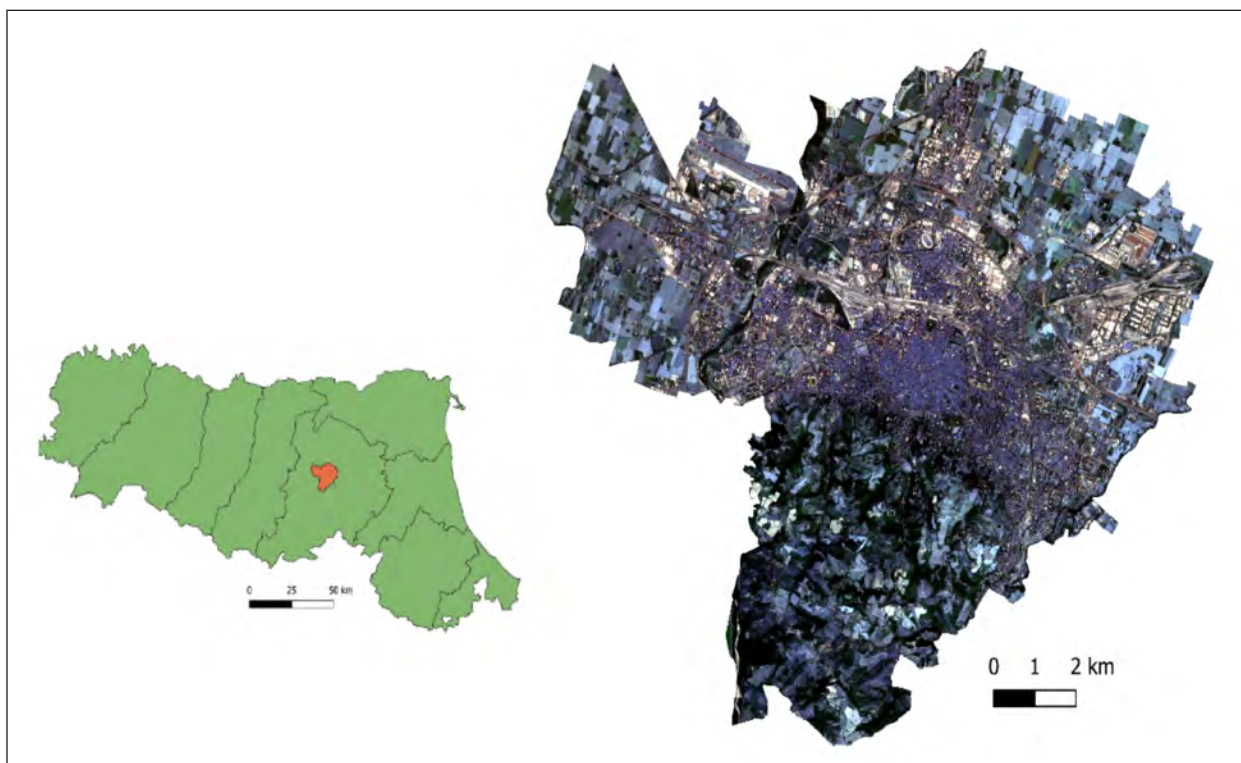


Figura 1. La posizione di Bologna in Emilia Romagna (a sinistra); un'immagine satellitare della città in falsi colori (a destra).

Il comune è suddiviso in sei circoscrizioni e ulteriormente suddiviso in 2.333 blocchi censuari (Basi territoriali del comune di Bologna, nd). Come in molte città italiane compatte, il centro storico è caratterizzato da un'elevata densità di popolazione e da una quota importante di superfici impermeabili, con oltre il 95% di aree edificate e impermeabilizzate (BUS) e meno del 5% di aree verdi urbane (UGA). I quartieri circostanti e le zone settentrionali di Bologna mostrano una maggiore variabilità, con BUS che va dal 40% al 95% e UGA fino al 60%, mentre l'area meridionale, costituita da colline e boschi, contribuisce in modo significativo alla fornitura di servizi ecosistemici (ES) (Vignoli et al., 2021). Per questo motivo, il centro storico è soggetto al più grave effetto Isola di Calore Urbana (UHI) (Saber et al., 2025). Le caratteristiche territoriali, climatiche e demografiche di Bologna la rendono un caso di studio ideale per esaminare la capacità delle infrastrutture verdi urbane (UGI) di mitigare il calore e per analizzare la discrepanza spaziale tra domanda e offerta di servizi ecosistemici, in particolare in relazione ai gruppi di popolazione vulnerabili.

2.2 Mappatura della fornitura di capacità di raffrescamento

La fornitura di capacità di raffrescamento è stata mappata utilizzando il modello di raffrescamento urbano InVEST. Il modello di raffrescamento urbano InVEST è stato selezionato perché è open source, richiede solo set di dati spaziali comunemente disponibili (come uso del

suolo/copertura d'uso, albedo, ombra e temperatura di riferimento) e consente la modellazione di scenari e la mappatura spazialmente esplicita della capacità di raffrescamento. Studi precedenti (Bosch et al. 2021; Zawadzka et al. 2021) hanno dimostrato che il modello fornisce approssimazioni ragionevoli alle temperature superficiali osservate e supporta il processo decisionale a scala di pianificazione, anche in contesti con dati microclimatici limitati. Il software opera all'interno di un framework che distingue "fornitura, servizio e valore", collegando le funzioni di produzione degli ecosistemi ai benefici che forniscono alle persone. Nello specifico, la funzione di produzione quantifica l'output dei servizi ecosistemici generati dall'ambiente, consentendo di valutare l'impatto dei cambiamenti del suolo o delle acque sui livelli servizi ecosistemici (Guida per l'utente INEST, nd). Il modello di raffrescamento urbano InVEST stima le riduzioni di temperatura derivanti dall'aumento della copertura vegetale. Questo modello calcola un indice di mitigazione del calore basato su fattori quali ombreggiamento, evapotraspirazione, albedo e vicinanza ad aree di raffrescamento come i parchi. Il modello utilizza indici di Zardo et al. (2017) e Kunapo et al. (2018), integrando l'albedo per affrontare specificamente la riduzione del calore. Le metriche chiave includono il fattore di ombra, che rappresenta la proporzione (0-1) di chioma arborea (≥ 2 m di altezza) per categoria di uso del suolo (LULC), e l'indice di evapotraspirazione (ETI), un valore normalizzato per l'evapotraspirazione potenziale, anch'esso stimato per valore LULC (Guida utente InVEST, nd). I dati di input utilizzati per eseguire il modello sono riassunti nella Tabella 1.

Tabella 1. Dati necessari per l'analisi della fornitura di capacità di raffrescamento

Tipologia di dati	Formato	Fonte
Uso del suolo/copertura del suolo (LULC)	Raster (risoluzione 10 m)	Regione Emilia Romagna
Evapotraspirazione	Raster (risoluzione 10 m)	Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale dell'Emilia-Romagna
Unità amministrative comunali	Vettore	Regione Emilia Romagna
Tabella biofisica Temperatura dell'aria di base (°C) Entità dell'effetto UHI (°C)	CSV	Elaborato dall'autrice Bollettino mensile dell'ARPAE (Meteo report e bollettini, sd) – 29°C luglio 2021 Bollettino mensile dell'ARPAE (Meteo report e bollettini, sd) 6°C luglio 2021

I valori raccomandati dal modello sono stati utilizzati per la distanza massima di miscelazione della temperatura dell'aria (500 m, vedere Schatz et al. 2014 e Lonsdorf et al. 2021) e la distanza massima di raffrescamento dell'area verde (450 m, come raccomandato dalla guida del modello, vedere (Guida utente InVEST, nd).

La capacità di raffrescamento è stata quindi stimata per ciascuna area statistica di Bologna, elaborando i risultati di INEST con lo strumento di statistica zonale di QGIS. Sovrapponendo la mappa raster ottenuta con InVEST e la mappa vettoriale con le aree statistiche, è stato ottenuto il valore medio della mitigazione termica per le aree censuarie di riferimento, per consentire la coerenza spaziale con i dati demografici.

2.3 Mappatura della domanda di capacità di raffrescamento

La vulnerabilità della popolazione è determinata dall'esposizione a un determinato pericolo e dalla sensibilità ai suoi effetti avversi (Weber et al., 2015) e può essere considerata come la propensione o predisposizione a essere influenzati più negativamente (IPCC, Glossario, 2021) per specifici gruppi di elementi esposti. La vulnerabilità sociale enfatizza i fattori demografici e socioeconomici che influenzano il modo in cui i pericoli possono avere un impatto sulle popolazioni locali (Cutter et al., 2009). In questo contesto, il pericolo è rappresentato dalle alte temperature e i

principali determinanti della vulnerabilità sociale includono età, genere, etnia e status socioeconomico (Cutter et al., 2003; Niu et al., 2021).

In questo studio, gli indicatori per l'indice di vulnerabilità sociale sono stati tratti dal rapporto 2020 sulla fragilità demografica a Bologna (La fragilità demografica, sociale ed economica nei Comuni della Città metropolitana di Bologna, 2020). Il rapporto fornisce un indice di fragilità composito basato su indicatori demografici, sociali ed economici e fornisce dati per area di censimento - aree statistiche. È stato creato uno specifico Indice di Vulnerabilità Termica (IVT) selezionando i fattori più influenti in questi tre ambiti sulla base della letteratura. Gli indicatori selezionati sono riassunti nella Tabella 2.

Tabella 2. Dati utilizzati per la definizione dell'Indice di Vulnerabilità Termica (IVT) provenienti dall'indice di fragilità demografica di Bologna

Dati disponibili per area statistica	Dominio
Percentuale della popolazione di età pari o superiore a 80 anni	Demografico
Percentuale della popolazione di età pari o superiore a 65 anni che vive da sola	Sociale
Percentuale della popolazione straniera di età compresa tra 0 e 19 anni rispetto alla popolazione totale di età compresa tra 0 e 19 anni	Sociale
Percentuale di anziani con fragilità sanitaria elevata o molto elevata	Sociale
Reddito pro capite equivalente mediano delle famiglie residenti	Economico
Percentuale di famiglie con reddito pro capite equivalente mediano inferiore a 13.002 €	Economico

L'indice IVT finale è stato ricavato normalizzando innanzitutto ciascun valore indicatore in un intervallo 0-1 utilizzando il metodo min-max, dove ai valori minimo e massimo di tutte le aree statistiche sono stati assegnati rispettivamente 0 e 1. Per ciascuna area statistica, i singoli valori normalizzati degli indicatori sono stati poi aggregati nell'indice composito calcolando la media aritmetica dei rispettivi valori normalizzati. Non è stata attribuita alcuna ponderazione ai diversi indicatori nel processo di sviluppo dell'indice.

2.4 Analisi dello squilibrio tra domanda e offerta

Per consentire la coerenza spaziale tra i valori della capacità di raffrescamento (pixel) e i dati demografici (per area statistica), la capacità di raffrescamento è stata quindi aggregata per ciascuna area statistica di Bologna, elaborando i risultati di InVEST con lo strumento di statistica zonale in QGIS per ottenere il valore medio della mitigazione termica per le aree censuarie di riferimento, al fine di consentire la coerenza spaziale con i dati demografici. Per indagare la relazione tra domanda e offerta della capacità di raffrescamento a Bologna, è stata eseguita una regressione lineare semplice sulle mappe generate da analisi precedenti. Questa tecnica statistica viene utilizzata per esaminare la relazione tra una singola variabile indipendente e una singola variabile dipendente, ipotizzando una connessione lineare tra di esse. Questa analisi ha valutato specificamente il legame tra capacità di raffrescamento e vulnerabilità al calore, utilizzando la mappa di mitigazione termica di InVEST come variabile indipendente e la mappa dell'indice di vulnerabilità al calore come variabile dipendente. La regressione è stata condotta in QGIS utilizzando lo strumento GRASS r.regression.line.

3. Risultati

3.1 La fornitura di capacità di raffrescamento

Il modello di raffrescamento urbano InVEST produce una mappa raster dell'indice di mitigazione del calore (IMC). La mappa risultante (Fig. 2) illustra la distribuzione spaziale dell'IMC nel centro storico di Bologna e nelle aree circostanti. I risultati riflettono la configurazione dell'uso del suolo della città, considerando in particolare le superfici edificate e le aree verdi e blu.

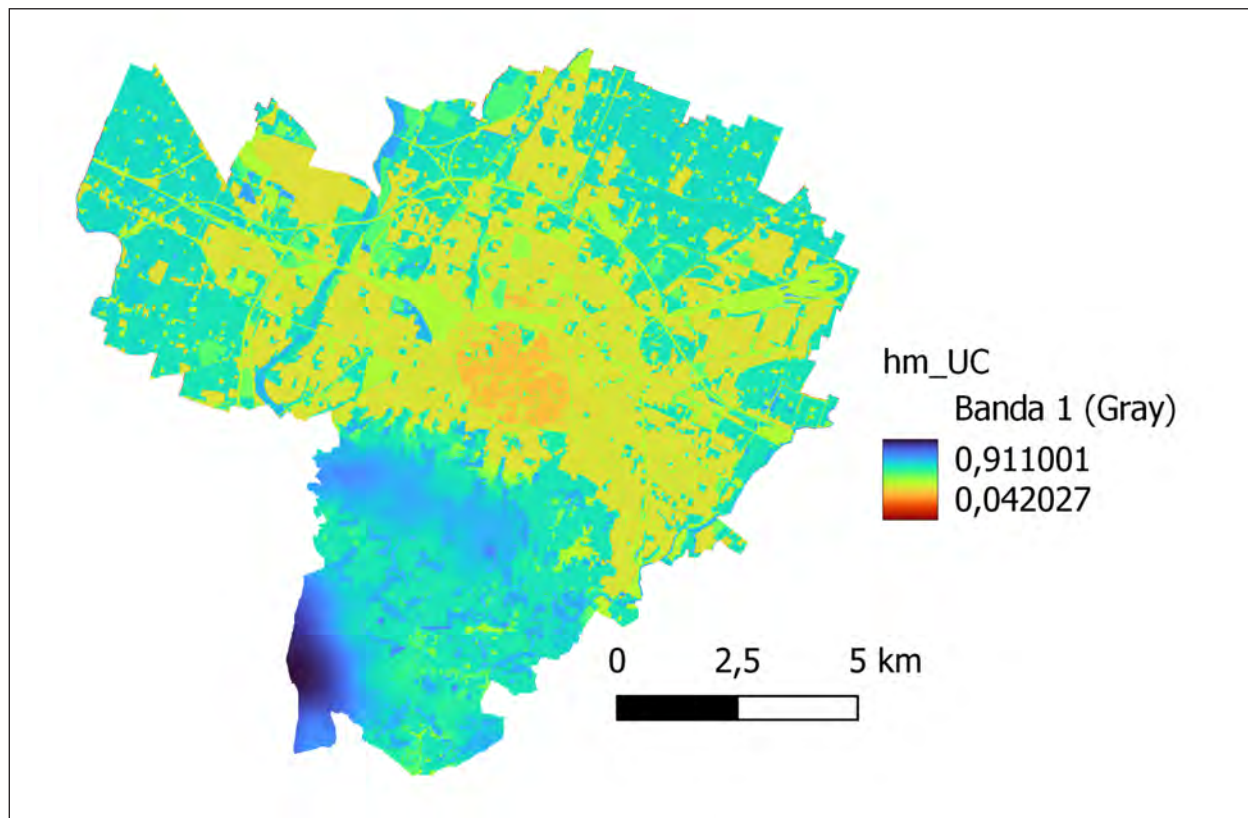


Figura 2. Indice di mitigazione del calore nella città di Bologna.

Il centro storico, dominato da un'elevata percentuale di superfici edificate e da una limitata copertura verde, è l'area che presenta la più bassa capacità di raffrescamento e indice di mitigazione del calore. Al contrario, le zone meridionali e occidentali della città, caratterizzate da colline e aree boschive, presentano le migliori prestazioni in termini di potenziale di mitigazione del calore e di raffrescamento. Osservando la Figura 3, l'IMC è rappresentato a livello di aree statistiche, dove i toni rossi corrispondono a valori bassi e i toni blu indicano valori più alti. Le zone più critiche si trovano nel centro città, che presenta un IMC medio di 0,35. Al contrario, le aree collinari nella parte meridionale di Bologna mostrano la più elevata capacità di mitigazione del calore, con un IMC medio di 0,69. Questi modelli spaziali sottolineano la forte correlazione tra composizione della copertura del suolo e regolazione microclimatica urbana, evidenziando il ruolo chiave della vegetazione e delle forme naturali del territorio nella mitigazione dello stress termico.

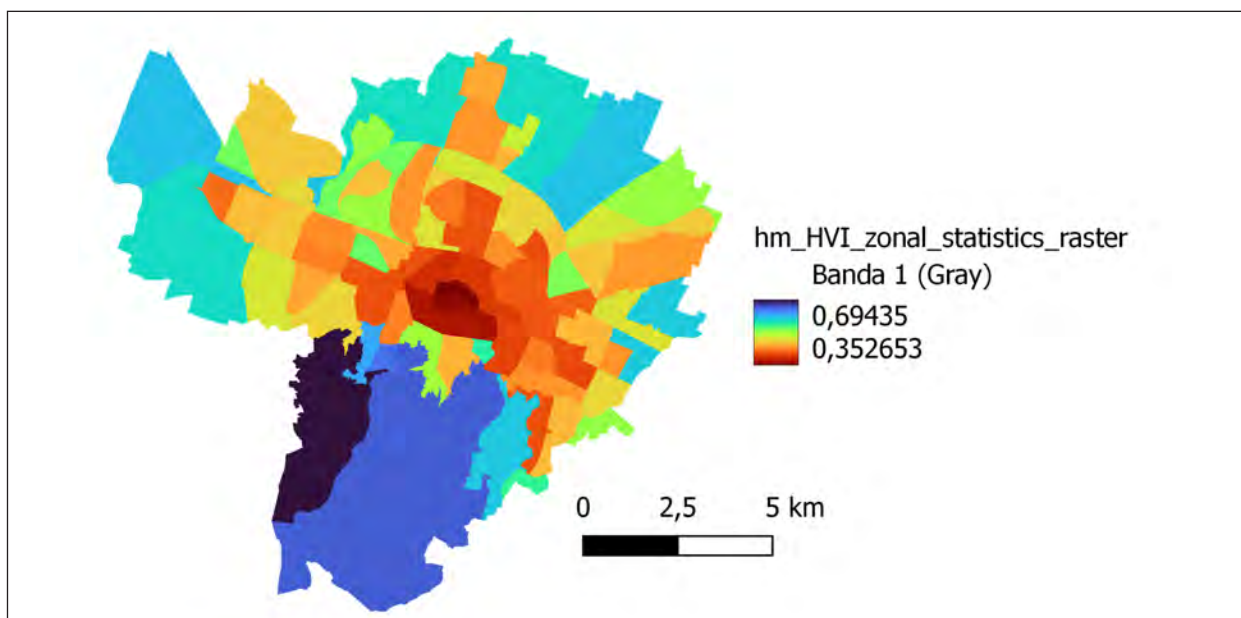


Figura 3. Indice di mitigazione del calore (IMC) nella città di Bologna per statistiche zonali.

3.2 La domanda di capacità di raffrescamento

L'Indice di Vulnerabilità Termica (IVT) identifica le aree di Bologna in cui si concentrano le fasce di popolazione più sensibili al caldo estremo (Fig. 4). I valori più elevati dell'indice si osservano nei settori centro-settentrionali della città. I quartieri periferici della parte occidentale e orientale della città, insieme alla prima periferia esterna al centro storico, emergono come i più vulnerabili socialmente, principalmente a causa di un'elevata percentuale di residenti di età pari o superiore a ottant'anni, di anziani con fragilità di salute e di cittadini a basso reddito.

Al contrario, le aree meno vulnerabili si trovano nella parte collinare meridionale della città, dove le condizioni demografiche e socioeconomiche potrebbero contribuire a una maggiore resilienza contro il caldo estremo.

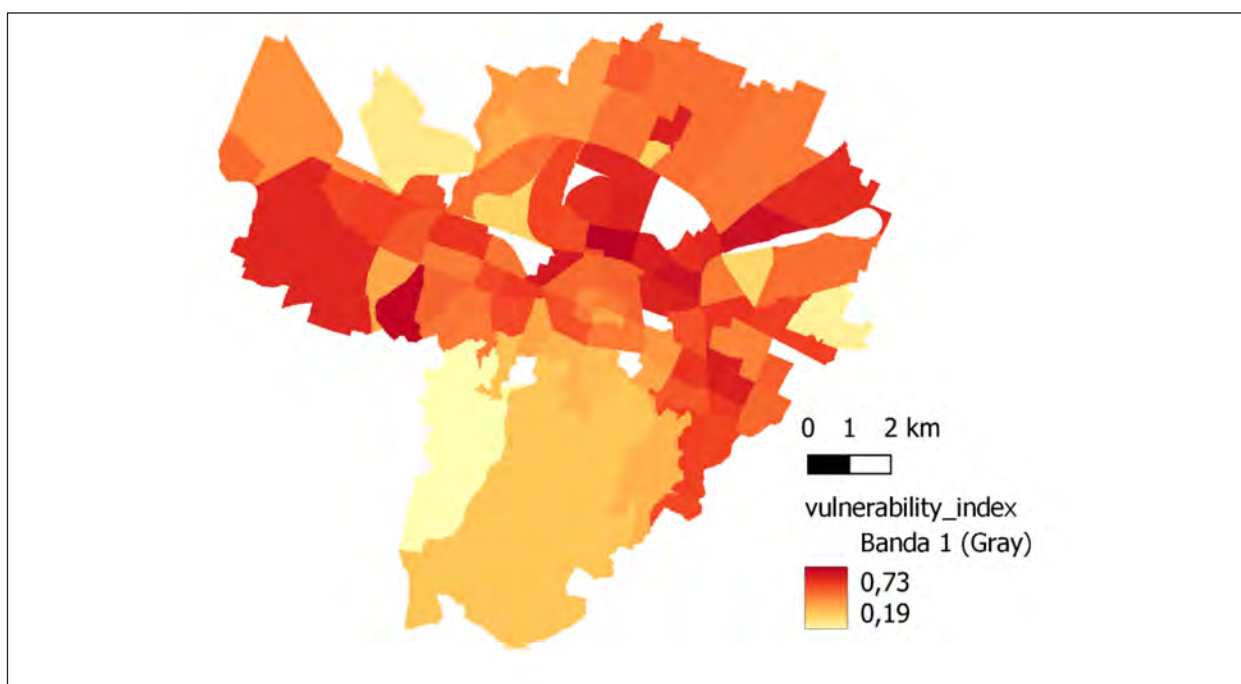


Figura 4. Indice di vulnerabilità al caldo per area statistica nella città di Bologna.

3.3 Disallineamento tra domanda e offerta spaziale

L'analisi di regressione lineare ha prodotto una mappa (Fig. 5) che evidenzia la relazione spaziale tra l'offerta di capacità di raffrescamento e la sua domanda, determinata dalla vulnerabilità della popolazione alle alte temperature.

La relazione tra la capacità di raffrescamento e la vulnerabilità al calore è stata analizzata utilizzando una regressione lineare semplice sui dati raster, utilizzando la mappa di mitigazione del calore InVEST (X) come predittore e la mappa dell'indice di vulnerabilità al calore (Y) come variabile dipendente. La regressione ha prodotto la formula $Y=0,941629+(-0,870002)X$.

La pendenza ($b=-0,870002$) indica una relazione inversa significativa: per ogni unità di aumento della capacità di raffrescamento, la vulnerabilità al calore diminuisce di 0,87 unità. Il modello ha spiegato circa il 34% ($R \approx 0,34$) della varianza della vulnerabilità al calore, dimostrando una correlazione negativa moderatamente forte ($R=-0,58$). Il modello è risultato altamente significativo dal punto di vista statistico ($F>670.000$, con $N=1.334.703$ osservazioni).

Osservando la distribuzione spaziale, i valori positivi in Figura 5 indicano le aree in cui il modello ha sottostimato la vulnerabilità al calore. In queste aree, la vulnerabilità effettiva è superiore a quanto suggerito dalla mappa della capacità di raffrescamento. D'altro canto, i valori negativi implicano una sovrastima del modello, laddove la vulnerabilità effettiva è inferiore a quanto previsto in base alla capacità di raffrescamento. I poligoni in bianco rappresentano aree industriali, aree verdi urbane o altre aree della città prive di popolazione residente.

Il modello ha spiegato circa il 34% ($R^2 \approx 0,34$) della varianza della vulnerabilità al calore. L'analisi spaziale dei residui di regressione rivela una chiara struttura spaziale nella varianza inspiegata, dimostrando che la relazione lineare non è uniforme in tutta la città. In particolare, le aree centrali e settentrionali in rosso scuro (vedi Fig. 5) mostrano costantemente residui positivi, il che significa che la vulnerabilità osservata è significativamente superiore a quella prevista dal modello di capacità di raffrescamento. Questo cluster spaziale di sottostima evidenzia una debolezza del modello nel nucleo urbano denso, dove fattori che vanno oltre la capacità di raffrescamento possono determinare il rischio.

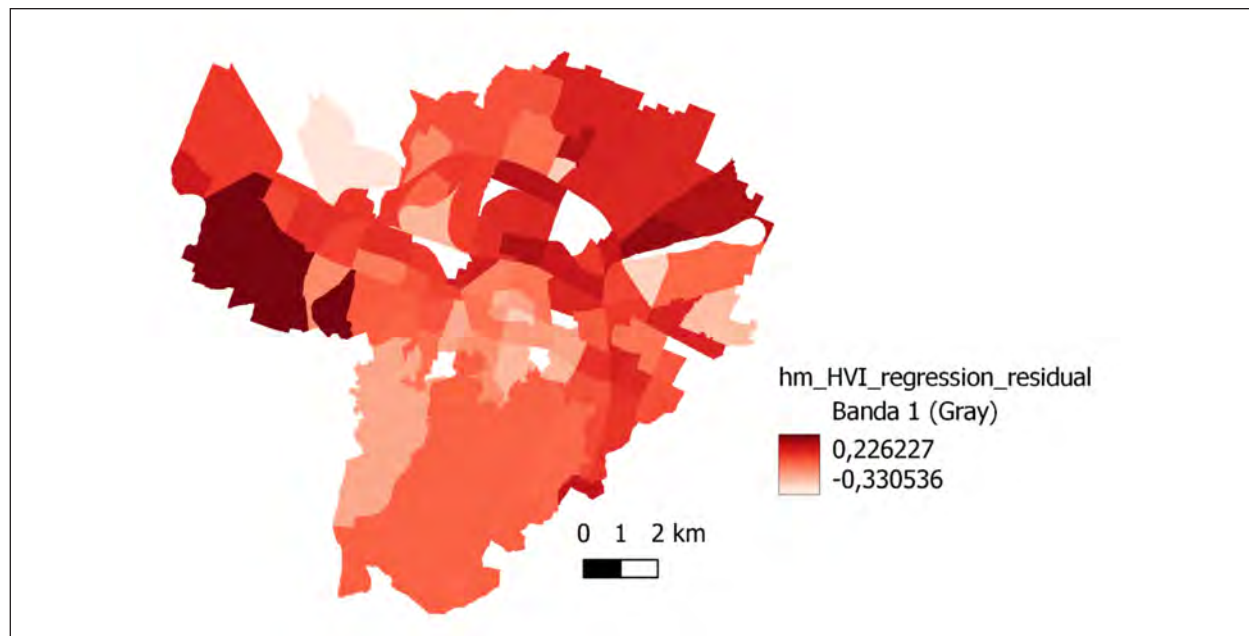


Figura 5. Risultati della regressione lineare tra domanda e offerta di capacità di raffrescamento per area statistica.

4. Discussione

Negli ultimi anni, la crescente consapevolezza sui cambiamenti climatici e sulle questioni di giustizia climatica ad essi correlate sta contribuendo ad aumentare l'interesse per gli studi urbani che affrontano i servizi ecosistemici (SE) e le loro implicazioni sociali (Wu et al., 2022). Quando le analisi spaziali dei SE vengono combinate con valutazioni della vulnerabilità sociale, è possibile individuare situazioni in cui la scarsa offerta di SE si sovrappone alla distribuzione dei gruppi svantaggiati. Tali sovrapposizioni evidenziano problemi di giustizia distributiva, in cui la popolazione che ha più bisogno di SE ha anche meno probabilità di beneficiarne.

I risultati di questo studio sono in linea con la letteratura consolidata (Venter et al., 2023; Pincetl et al., 2016; Harlan et al., 2006) e sottolineano che le IVB possono agire come un'efficace misura di mitigazione del calore dal lato dell'offerta, ma il loro impatto è attenuato nelle aree con fattori di rischio non ambientali preesistenti. Il pattern spaziale prominente dei residui positivi, concentrati nelle periferie settentrionali e occidentali, potrebbe essere una caratteristica delle città in cui l'elevata vulnerabilità sociale (ad esempio, la quota di anziani e di redditi più bassi) è concentrata in aree specifiche della città, un fenomeno spesso definito disuguaglianza termica (Harlan et al., 2006).

Una recente revisione sistematica conferma ulteriormente che la maggior parte dei casi presenta modelli di ingiustizia ambientale, con le aree ad alto reddito che generalmente godono di una maggiore disponibilità, accessibilità e qualità dei servizi ambientali, mentre i gruppi svantaggiati vengono sistematicamente trascurati (Kato-Huerta & Geneletti, 2022). Sulla stessa linea, una ricerca condotta a New York ha dimostrato che le minoranze etniche e le popolazioni a basso reddito hanno maggiori probabilità di risiedere in aree con un elevato divario tra domanda e offerta di servizi essenziali (Herreros- Cantis & McPhearson, 2021).

4.1 Limitazioni e studi futuri

In questo studio, la costruzione dell'Indice di Vulnerabilità al Calore (IVT) si è basata sul presupposto che tutti gli indicatori contribuiscano in egual misura alla vulnerabilità della popolazione alle alte temperature. Questa semplificazione non tiene conto del fatto che fattori diversi possono avere diversi livelli di influenza sugli esiti della vulnerabilità. Sono quindi necessarie ulteriori ricerche per determinare l'importanza relativa di ciascun indicatore, consentendo l'assegnazione di pesi differenziati che ne riflettano meglio l'impatto effettivo. In secondo luogo, i risultati del modello InVEST sulla capacità di raffrescamento non sono stati convalidati con misurazioni simultanee della temperatura osservata (come mappe termiche ad alta risoluzione da telerilevamento o dati di stazioni meteorologiche in situ). Sebbene InVEST fornisca una stima affidabile dell'offerta di servizi ecosistemici, la mancanza di una validazione termica empirica significa che il preciso effetto di raffrescamento locale attribuito alle infrastrutture verdi e blu rimane teorico in questo studio. Infine, l'uso della regressione lineare semplice presuppone una relazione strettamente lineare tra capacità di raffrescamento e vulnerabilità al calore e potrebbe non riuscire a catturare effetti non lineari più complessi che potrebbero descrivere meglio le dinamiche del rischio di calore urbano.

Oltre alla mitigazione del calore, analisi successive potrebbero integrare anche altri servizi ecosistemici (SE) per catturare un quadro più completo delle dinamiche socio-ecologiche urbane. Infine, estendere l'attenzione ad altre dimensioni di giustizia, come ad esempio la giustizia procedurale, di riconoscimento e intergenerazionale, consentirebbe una comprensione più approfondita del contesto urbano di Bologna.

5. Conclusioni

L'espansione urbana e il riscaldamento globale hanno portato a un aggravamento dell'effetto isola di calore nelle città compatte, fenomeno che provoca un aumento delle temperature nelle aree urbane rispetto agli ambienti rurali circostanti, con gravi ripercussioni negative sulla salute e sul benessere dei cittadini.

Questo studio ha indagato come le infrastrutture verdi urbane (IVB) possano mitigare l'impatto dell'isola di calore, valutando al contempo la giustizia distributiva a Bologna, integrando le dimensioni sociali nell'analisi. La capacità di raffrescamento è stata valutata utilizzando il modello InVEST, mentre la domanda è stata stimata sulla base della vulnerabilità della popolazione al calore, misurata attraverso una serie di indicatori riassunti nell'Indice di Vulnerabilità al Calore (IVT).

Il caso di Bologna è in linea con la letteratura attuale sull'argomento, evidenziando un'ingiustizia distributiva nell'offerta di soluzioni di mitigazione del calore, che colpisce in particolare gruppi vulnerabili come anziani e residenti a basso reddito. I risultati di questo studio suggeriscono che, per affrontare queste disparità, dovrebbero essere promosse soluzioni basate sulla natura (NBS) differenziate, che vanno da interventi ibridi e su piccola scala (ad esempio, tetti e pareti verdi) in aree con spazio limitato, ad aree verdi più ampie dove le condizioni urbane lo consentono, dando priorità alle aree con un indice di mitigazione del calore inferiore e un indice di vulnerabilità al calore superiore. Inoltre, gli interventi non NBS, come ad esempio gli incentivi per la riqualificazione energetica, dovrebbero prioritizzare i gruppi di popolazione più vulnerabili e che risiedono nelle zone più calde della città.

Questo approccio potrebbe supportare una transizione equa delle città, poiché l'integrazione di questo tipo di analisi nella pianificazione urbana consentirebbe ai decisori di migliorare le condizioni di vita dei cittadini, garantendo una maggiore giustizia sociale e migliorando al contempo la sostenibilità ambientale e climatica. Inoltre, il verde urbano dovrebbe essere inteso come una delle diverse strategie complementari per aumentare la vivibilità urbana, ridurre i rischi legati al clima e affrontare questioni di giustizia sociale e ambientale. Altre misure – come il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici, allineando così gli obiettivi di riduzione della povertà e mitigazione dei cambiamenti climatici (Ürge-Vorsatz & Tirado Herrero, 2012), l'aumento dell'albedo delle superfici urbane, la garanzia di una gestione efficiente delle risorse idriche e il sostegno economico mirato alle comunità vulnerabili per l'accesso agli impianti di raffrescamento – possono contribuire in modo significativo alla costruzione di città resilienti e inclusive.

Contributo degli autori

Concettualizzazione: C.d.L ; Metodologia: C.d.L Raccolta Dati: C.d.L D.M., Analisi formale: D.M. FV C.d.L. Redazione originale: C.d.L. Revisione e editing: C.d.L.; Supervisione C.d.L.

Bibliografia

Articolo di giornale

- Ambrosini D., Galli G., Mancini B., Nardi I. & Sfarra S. (2014). Evaluating mitigation effects of urban heat islands in a historical small center with the ENVI-met® climate model. *Sustainability*, 6(10), 7013–7029. <https://doi.org/10.3390/su6107013>
- Aram F., Higuera Garcia E., Solgi E., Mansournia S. (2019). Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon*, 5, 1339. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01339>
- Balzan M.V., Zulian G., Maes J. & Borg M. (2021). Assessing urban ecosystem services to prioritise nature-based solutions in a high-density urban area. *Nature-Based Solutions*, 2, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2021.100007>
- Baró F., Calderón-Angelich J., Langemeyer J. & Connolly J.J.T. (2019). Under one canopy? Assessing the distributional environmental justice implications of street tree benefits in Barcelona. *Environmental Science & Policy*, 102, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.08.016>
- Bartesaghi-Koc C., Osmond P. & Peters J. (2020). Quantifying the seasonal cooling capacity of green infrastructure types (GITs): An approach to assess and mitigate surface urban heat island in Sydney, Australia. *Landscape and Urban Planning*, 203, 103893. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103893>
- Bonacquisti V., Casale G.R., Palmieri S. & Siani J.M. (2006). A canopy layer model and its application to Rome. *Science of the Total Environment*, 364(1–3), 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.09.097>

- Bosch M., Locatelli M., Hamel P., Remme R.P., Chenal J. & Joost S. (2021). A spatially explicit approach to simulate urban heat mitigation with InVEST (v3.8.0). *Geoscientific Model Development*, 14(6), 3521–3537. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3521-2021>
- Bowler D.E., Buyung-Ali L., Knight T.M., Pullin J.S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97, 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Chen N., Li H. & Wang L. (2009). A GIS-based approach for mapping direct use value of ecosystem services at a county scale: Management implications. *Ecological Economics*, 68, 2768–2776. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.12.001>
- Cheng X., Van Damme S. & Uyttenhove P. (2021). A review of empirical studies of cultural ecosystem services in urban green infrastructure. *Journal of Environmental Management*, 293, 112895. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112895>
- Conti S., Meli P., Minelli G., Solimini R., Toccaceli V., Vichi M., Beltrano C. & Perini L. (2005). Epidemiologic study of mortality during the summer 2003 heat wave in Italy. *Environmental Research*, 98(3), 390–399. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2004.10.009>
- Cortinovis C. & Geneletti D. (2020). A performance-based planning approach integrating supply and demand of urban ecosystem services. *Landscape and Urban Planning*, 201, 103842. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103842>
- Costanza R. (2008). Ecosystem services: Multiple classification systems are needed. *Biological Conservation*, 141(2), 350–352. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.12.020>
- Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P. & van den Belt M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Cutter S.L., Emrich C.T., Webb J.J. & Morath D. (2009). Social vulnerability to climate variability hazards: A review of the literature. Oxfam America.
- Cutter S.L., Boruff B.J. and Shirley W.L. (2003). Social Vulnerability to Environmental Hazards*. *Social Science Quarterly*, 84, 242–261. <https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002>
- Evans D.L., Falagán N., Kourmpetli S., Liu L., Mead B.R. & Davies J.A.C. (2022). Ecosystem service delivery by urban agriculture and green infrastructure: A systematic review. *Ecosystem Services*, 54, 101405. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101405>
- Geijzendorffer I.R., Martín-López B. & Roche P.K. (2015). Improving the identification of mismatches in ecosystem services assessments. *Ecological Indicators*, 52, 320–331. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.12.016>
- González-García J., Palomo I., González J.A., García-Díez V., García-Llorente M. & Montes C. (2022). Biodiversity and ecosystem services mapping: Can it reconcile urban and protected area planning? *Science of the Total Environment*, 803, 150048. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150048>
- Goodchild M. F. & Batty M. (2019). *Urban analytics: Spatial data science for cities*. Oxford University Press.
- Harlan S.L., Brazel J.J., Jones N.S., Larsen L. & Prashad L. (2006). Neighborhood effects on heat deaths: Social and environmental predictors of vulnerability in Maricopa County, Arizona. *Environmental Health Perspectives*, 114(11), 1730–1736. <https://doi.org/10.1289/ehp.8637>
- Herreros-Cantis P. & McPhearson T. (2021). Mapping supply of and demand for ecosystem services to assess environmental justice in New York City. *Ecological Applications*, 31(6), e02390. <https://doi.org/10.1002/eap.2390>
- IPCC. (2021). Annex VII: Glossary [J. B. R. Matthews V. Möller R. van Diemen J. S. Fuglestedt V. Masson-Delmotte C. Méndez S. Semenov & A. Reisinger, Eds.]. In V. Masson-Delmotte P. Zhai J. Pirani S. L. Connors C. Péan S. Berger N. Caud Y. Chen L. Goldfarb M. I. Gomis M. Huang K. Leitzell E. Lonnoy J. B. R. Matthews T. K. Maycock T. Waterfield O. Yelekçi R. Yu & B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 2215–2256). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.022>
- IPCC. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. Summary for policymakers*. Intergovernmental Panel on Climate Change.

- Kato-Huerta J. & Geneletti D. (2022). Environmental justice implications of nature-based solutions in urban areas: A systematic review of approaches, indicators, and outcomes. *Environmental Science & Policy*, 137, 174–188. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.07.034>
- Kremer P., Hamstead Z., Haase D., McPhearson T., Frantzeskaki N., Andersson E., Kabisch N., Larondelle N., Rall E.L., Voigt J., Baró F., Bertram C., Gómez-Baggethun E., Hansen R., Kaczorowska J., Kain J.-H., Kronenberg J., Langemeyer J., Pauleit S., ... Elmqvist T. (2016). Key insights for the future of urban ecosystem services research. *Ecology and Society*, 21(2). <http://www.jstor.org/stable/26270402>
- Kunapo J., Fletcher T.D., Ladson J.R., Cunningham L. & Burns M.J. (2018). A spatially explicit framework for climate adaptation. *Urban Water Journal*, 15(2), 159–166. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2018.1424216>
- Lakes T. & Kim H.-O. (2012). The urban environmental indicator “Biotope Area Ratio”: An enhanced approach to assess and manage urban ecosystem services using high-resolution remote sensing. *Ecological Indicators*, 13(1), 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.05.016>
- Laster Grip I., Haghighatafshar S. & Aspegren H. (2021). A methodology for the assessment of compound sea level and rainfall impact on urban drainage networks in a coastal city under climate change. *City and Environment Interactions*, 12, 100074. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2021.100074>
- Liang L., Deng X., Wang P., Wang Z. & Wang L. (2020). Assessment of the impact of climate change on city livability in China. *The Science of the Total Environment*, 726, 138339. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138339>
- Lindberg F., Holmer B. & Thorsson S. (2008). SOLWEIG 1.0--modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *International journal of biometeorology*, 52(7), 697–713. <https://doi.org/10.1007/s00484-008-0162-7>
- Liu H., Huang B., Zhan Q., Gao S., Li R. & Fan Z. (2021). The influence of urban form on surface urban heat island and its planning implications: Evidence from 1288 urban clusters in China. *Sustainable Cities and Society*, 71, 102987. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102987>
- Liu L. & Wu J. (2022). Scenario analysis in urban ecosystem services research: Progress, prospects, and implications for urban planning and management. *Landscape and Urban Planning*, 224, 104433. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104433>
- Llodrà-Llabrés J. & Cariñanos P. (2022). Enhancing pollination ecosystem service in urban green areas: An opportunity for the conservation of pollinators. *Urban Forestry & Urban Greening*, 74, 127621. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127621>
- Lonsdorf E.V., Nootenboom C., Jnke B., Horgan B.P. (2021). Assessing urban ecosystem services provided by green infrastructure: Golf courses in the Minneapolis-St. Paul metro area. *Landscape and Urban Planning*, 208, 104022. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.104022>
- Lourdes K.T., Hamel P., Gibbins C.N., Sanusi R., Azhar B. & Lechner A.M. (2022). Planning for green infrastructure using multiple urban ecosystem service models and multicriteria analysis. *Landscape and Urban Planning*, 226, 104500. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104500>
- Marando F., Salvatori E., Sebastiani J., Fusaro L. & Manes F. (2018). Regulating ecosystem services and green infrastructure: Assessment of urban heat island effect mitigation in the municipality of Rome, Italy. *Ecological Modelling*, 392, 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.11.011>
- Matzarakis J., Martinelli L. & Ketterer C. (2016). Relevance of thermal indices for the assessment of the urban heat island. In F. Musco (Ed.), *Counteracting urban heat island effects in a global climate change scenario* (pp. 85–101). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10425-6>
- Muresan J.N., Sebastiani J., Gaglio M., Fano E.A. & Manes F. (2022). Assessment of air pollutants removal by green infrastructure and urban and peri-urban forests management for a greening plan in the municipality of Ferrara (Po River Plain, Italy). *Ecological Indicators*, 135, 108554. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108554>
- Niu Y., Li Z., Gao Y., Liu X., Xu L., Vardoulakis S., Yue Y., Wang J. & Liu Q. (2021). A Systematic Review of the Development and Validation of the Heat Vulnerability Index: Major Factors, Methods, and Spatial Units. *Current climate change reports*, 7(3), 87–97. <https://doi.org/10.1007/s40641-021-00173-3>

- Oke T.R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, 7(8), 769–779. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)
- Pappalardo S.E., Zanetti C. & Todeschi V. (2023). Mapping urban heat islands and heat-related risk during heat waves from a climate justice perspective: A case study in the municipality of Padua (Italy) for inclusive adaptation policies. *Landscape and Urban Planning*, 238, 104831. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104831>
- Pelorosso R., Gobattoni F., La Rosa D. & Leone J. (2015). Ecosystem Services based planning and design of Urban Green Infrastructure for sustainable cities. In *Atti della XVIII Conferenza Nazionale SIU Società Italiana degli Urbanisti*
- Pincetl S., Chester M. & Eisenman D. (2016). Urban Heat Stress Vulnerability in the U.S. Southwest: The Role of Sociotechnical Systems. *Sustainability*, 8(9), 842. <https://doi.org/10.3390/su8090842>
- Pukowiec-Kurda K. (2022). The urban ecosystem services index as a new indicator for sustainable urban planning and human well-being in cities. *Ecological Indicators*, 143, 109532. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109532>
- Saber A., De Luca C., Pourzangbar A., Tondelli S., Bell M.L. (2025). Heat wave risk assessment in Bologna using Spatio-temporal artificial intelligence: Leveraging LSTM enhanced by the hippopotamus optimization algorithm. *Sustainable Cities and Society*, 131, 106671. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106671>
- Saint-Onge K., Coulombe S., Philibert M., Wiesztort L. & Houle J. (2022). How urban parks nurture eudaimonic and hedonic wellbeing: An explorative large-scale qualitative study in Québec, Canada. *Wellbeing, Space and Society*, 3, 100095. <https://doi.org/10.1016/j.wss.2022.100095>
- Santamouris M., 2013. Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, vol. 26(C), pages 224–240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>
- Schatz J. & Kucharik C.J. (2014). Seasonality of the Urban Heat Island Effect in Madison, Wisconsin. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(10), 2371–2386. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0107.1>
- Sun R., Jin X., Han B., Liang X., Zhang X. & Zhou Y. (2022). Does scale matter? Analysis and measurement of ecosystem service supply and demand status based on ecological unit. *Environmental Impact Assessment Review*, 95, 106785. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106785>
- Tao Y., Tao Q., Sun X., Qiu J., Pueppke S.G., Ou W. & Qi J. (2022). Mapping ecosystem service supply and demand dynamics under rapid urban expansion: A case study in the Yangtze River Delta of China. *Ecosystem Services*, 56, 101448. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101448>
- Toparlar Y., Blocken B., Maiheu B. & van Heijst G.J.F. (2017). The effect of an urban park on the microclimate in its vicinity: A case study for Antwerp, Belgium. *International Journal of Climatology*, 38(1), e303–e322. <https://doi.org/10.1002/joc.5371>
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)*. New York: United Nations.
- Ürge-Vorsatz D. & Tirado Herrero S. (2012). Building synergies between climate change mitigation and energy poverty alleviation. *Energy Policy*, 49, 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.093>
- Venter Z.S., Figari H., Krangle O. & Gundersen V. (2023). Environmental justice in a very green city: Spatial inequality in exposure to urban nature, air pollution and heat in Oslo, Norway. *The Science of the total environment*, 858(Pt 3), 160193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160193>
- Venter Z.S., Krog N.H. & Barton D.N. (2020). Linking green infrastructure to urban heat and human health risk mitigation in Oslo, Norway. *Science of the Total Environment*, 709, 136193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136193>
- Vignoli F., De Luca C. & Tondelli S. (2021). A spatial ecosystem services assessment to support decision and policy making: The case of the city of Bologna. *Sustainability*, 13(5), 2787. <https://doi.org/10.3390/su13052787>
- Wang C., Ren Z., Dong Y., Zhang P., Gu Y., Wang W. & Bai G. (2022). Efficient cooling of cities at global scale using urban green space to mitigate urban heat island effects in different climatic regions. *Urban Forestry & Urban Greening*, 74, 127635. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127635>
- Weber S., Sadoff N., Zell E. & de Sherbinin J. (2015). Policy-relevant indicators for mapping the

- vulnerability of urban populations to extreme heat events: A case study of Philadelphia. *Applied Geography*, 63, 231–243. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.07.006>
- Woodruff S.C. & BenDor T.K. (2016). Ecosystem services in urban planning: Comparative paradigms and guidelines for high-quality plans. *Landscape and Urban Planning*, 152, 90–100. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.04.003>
- Wu L., Kim S.K. & Lin C. (2022). Socioeconomic groups and their green spaces availability in urban areas of China: A distributional justice perspective. *Environmental Science & Policy*, 131, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.01.008>
- Zardo L., Geneletti D., Pérez-Soba M. & Van Eupen M. (2017). Estimating the cooling capacity of green infrastructures to support urban planning. *Ecosystem Services*, 26(A), 225–235. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.06.016>
- Zawadzka J., Harris J.A. & Corstanje R. (2021). Assessment of heat mitigation capacity of urban greenspaces with the use of InVEST urban cooling model, verified with day-time land surface temperature data. *Landscape and Urban Planning*, 214, 104163. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104163>
- Zhang H. & Wilson D. (2023). Spatial modelling of park accessibility and its influence on property values: A comparative study using random forest and OLS. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 16(1), 55–77.

Pagina web

- Ambiti amministrativi. (nd). Estratto da Geoportale Regione Emilia-Romagna, gennaio 2023: <https://geoportale.regione.emilia-romagna.it/download/dati-e-prodotti-cartografici-preconfezionati/confini-amministrativi>
- Basi territoriali del comune di Bologna. (nd). Estratto da I numeri di Bologna metropolitana: <http://inumeridibolognametropolitana.it/basi-territoriali-del-comune-di-bologna>
- Catalogo dei metadati del portale cartografico. (nd). Estratto da ARPAE, gennaio 2023: <https://www.arpae.it/it/dati-e-report/dati-ambientali/consulta-catalogo-dei-metadati-del-portale-cartografico>
- Città di Melbourne (2023). *Strategia per le foreste urbane: creare una città più fresca e verde*. <https://www.melbourne.vic.gov.au/urbanforest>
- Copernico (2023). <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2022-was-year-climate-extremes-record-high-temperatures-and-rising-concentrations>
- Coperture vettoriali dell'uso del suolo. (nd). Estratto da Geoportale Regione Emilia-Romagna, gennaio 2023: <https://geoportale.regione.emilia-romagna.it/download/dati-e-prodotti-cartografici-preconfezionati/pianificazione-e-catasto/uso-del-suolo/2003-coperture-vettoriali-uso-del-suolo-di-dettaglio-edizione-2021/dati-preconfezionati>
- Dati statistici. (nd). Estratto da i numeri di Bologna metropolitana, gennaio 2023: <http://inumeridibolognametropolitana.it/dati-statistici/superficie-e-densita-di-popolazione-al-31-dicembre>
- Guida per l'utente del progetto InVEST Natural Capital. (nd). Tratto da <https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/index.html>
- IPCC, Glossario, 2021. Recuperato da, ottobre 2025: <https://apps.ipcc.ch/glossary/>
- La fragilità demografica, sociale ed economica nei comuni della Città metropolitana di Bologna 2020. (2020). Estratto da I numeri di Bologna metropolitana, gennaio 2023: <http://inumeridibolognametropolitana.it/studi-e-ricerche/la-fragilita-demografica-sociale-ed-economica-nei-comuni-della-citta-2>
- Meteo e bollettini. (nd). Estratto da ARPAE, gennaio 2023: https://aggiornati.arpae.it/it/temi-ambientali/meteo/report-meteo/bollettini-mensili/bm_202107.pdf/view