

RESEARCH AND
EXPERIMENTATION

LOCAL CLIMATE ZONES FOR KNOWLEDGE AND CLIMATE-RISK-ORIENTED DESIGN OF URBAN SETTLEMENTS

Antonio Sferratore¹, Vittorio Miraglia¹¹ Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli, Italia

Primary Contact: Antonio Sferratore, antonio.sferratore@unina.it

This article has been accepted for publication and undergone full peer review but has not been through the copyediting, typesetting, pagination and proofreading process, which may lead to differences between this version and the Version of Record.

Published: November 28, 2025

DOI: 10.36253/techne-18603

Abstract

*This paper presents the results of a research project conducted as part of Task ***** of the PNRR. The research integrates morphometric classifications (LCZ) and urban taxonomies (PNACC, RETURN project) to support climate risk adaptation. In Naples, LCZ mapping has been refined with morphometric data and GIS-based approaches, improving its accuracy. Integration with climate-oriented urban taxonomies has made it possible to associate each LCZ, uniform in terms of geometric, surface, land cover, thermal-radiative, and metabolic characteristics, with targeted actions, evaluated through the qualitative and quantitative indicators of the PNACC. The study proposes a multiscale and replicable method for defining measurable climate risk-oriented actions calibrated to individual urban contexts.*

Keywords: climate risk; environmental design; local climate zones; urban taxonomies; urban settlements.

Please cite this article as: Sferratore A., Miraglia V. (2025). LOCAL CLIMATE ZONES FOR KNOWLEDGE AND CLIMATE-RISK-ORIENTED DESIGN OF URBAN SETTLEMENTS / LOCAL CLIMATE ZONES PER LA CONOSCENZA E IL PROGETTO CLIMATE-RISK ORIENTED DEGLI INSEDIAMENTI URBANI. *Techne. Journal of Technology for Architecture and Environment*, Just Accepted.

Introduction

Climate change represents one of the most critical challenges of our time, with direct implications for the livability and resilience of urban areas. Cities, being densely populated and heavily infrastructure, are particularly vulnerable to the impacts of extreme events such as heatwaves, floods, droughts, and sea level rise. The physical and functional complexity of the urban fabric amplifies these effects, making adaptive strategies grounded in a profound understanding of local morphoclimatic contexts essential (IPCC, 2022; EC, 2018; Rosenzweig et al., 2018).

Recent advances in Earth observation systems and machine learning techniques have generated high-resolution datasets on topography, urban land cover, and population, as well as on present and future climate risks. However, these tools provide autonomous descriptions of hazards and risk components (Mills et al., 2017).

Within this framework, urban climate risk management requires a scientifically sound, multidisciplinary approach oriented towards the territorialization of adaptation measures (CMCC, 2023). Strategies, conceived as planning actions aimed at mitigating the adverse effects of climate impacts, must account for local vulnerabilities while aligning with regional, national, and international perspectives. From a design standpoint, approaches should be able to conserve, transform, and manage urban space with full awareness of ongoing climate crises (Angelucci, 2015), moving beyond merely morphological or functional-spatial dimensions to include environmental, cultural, and social aspects (Schiaffonati, 2018). Addressing the complexity of these scenarios implies the need to simplify datasets—facilitating computation—while preserving the variability that characterizes each urban fabric and its physical, social, and socioeconomic interactions (D'Ambrosio et al., 2023; Turchetti, 2023).

Internationally, various studies have explored urban parameterization to identify relationships between environmental factors and morphological characteristics (Oke, 1988). Building on Chandler (1970), Ellefsen (1984), and Oke (2006), the Local Climate Zone (LCZ) classification proposed by Stewart and Oke (2012) has become an established reference. LCZs define homogeneous territorial units based on surface cover, construction materials, and human activity; ten classes correspond to built-up areas (building types) and seven to land cover types. Each class is associated with standardized geometric, surface, thermal, and metabolic parameters. The framework is now widely adopted internationally (Demuzere, Bechtel, et al., 2019; Ching, Mills, et al., 2018; Mills, Bechtel, et al., 2017) and is operationalized through the open-source WUDAPT1 platform, which enables the generation of globally comparable, georeferenced urban climate maps. For many cities, LCZ classification has proven useful not only for microclimatic analysis and urban comfort assessment but also as a basis for scenario-building in urban regeneration strategies oriented toward adaptation and mitigation (Alexander & Mills, 2014; Turchetti, 2023).

Nevertheless, Bechtel has highlighted the need to further develop the WUDAPT framework, particularly for capturing the morphological complexity of European cities (Gal et al., 2015; Lopes et al., 2019). Among the most promising developments are GIS-based methodologies integrated with open-source databases (Levlovics et al., 2013; Wang et al., 2018; Hidalgo et al., 2019). Several authors have also employed LCZ classification to integrate climate knowledge into urban design, proposing adaptation and risk reduction strategies tailored to the morphological, technological, and environmental characteristics of urban fabrics (Middel et al., 2014; Mills et al., 2017; Nazarian et al., 2019; Maharof et al., 2020; Musco et al., 2020; Liu et al., 2023).

In Italy, the PNACC (MASE, 2023) represents the main regulatory framework for climate adaptation. It provides a structured catalogue of adaptive measures organized by sector and territorial scope, while promoting the development of local strategies informed by context-specific risk assessments. However, implementation often proves uneven due to the lack of operational tools capable of translating general guidelines into localized, measurable actions (Moraci et al., 2020; Cremonini et al., 2023).

At the national level, notable experiences include the Metropolitan Territorial Plan (PTM) developed by the Metropolitan City of Milan under the Life MASTER ADAPT project, and the Climate Transition Abacus (Maragno et al., 2022) developed by the Planning and Climate Change Lab of the Luav University of Venice. The PTM links LCZ classification to climate adaptation strategies, assessing their qualitative socio-economic implications and potential for risk reduction, and allowing strategies to be tested across comparable urban contexts. The Abacus, in turn, provides structured support to public administrations by identifying measures aimed at compensating local vulnerabilities and enhancing ecosystem services, adopting a transect-based logic to typify the Northern Adriatic territory and orient adaptive measures accordingly (Maragno et al., 2022). Both models facilitate the selection and evaluation of appropriate measures for specific urban fabrics, promoting cross-disciplinary integration as a key prerequisite for climate adaptation (Losasso & Rigillo, 2024). This study builds upon this line of research, proposing an approach that integrates LCZ-based morphometric analysis with a taxonomic reading of the urban system derived from PNACC. The approach was tested within the RETURN research project, with the aim of providing a knowledge and operational tool to support local decision-making. The research integrates LCZs with a taxonomy aligned with PNACC's Grey and Green sectors, constructing a knowledge matrix capable of synthesizing, for each LCZ, climate-related vulnerabilities, predominant physical-typological characteristics, and associated intervention strategies. The Soccavo district in the Metropolitan City of Naples was selected as a case study to test the validity of the model in a complex and climate-vulnerable urban context.

Methodology and Experimentation

The adopted methodology is based on an integrated approach aimed at defining a knowledge model that combines climatic classifications with urban taxonomies to improve climate risk management. The experimental workflow is structured into three main phases (Fig. 1):

- data collection, mapping, and optimization of Local Climate Zones (LCZs);
- integration of LCZs with urban taxonomies and spatial analysis;
- selection of adaptation strategies and actions in relation to taxonomic elements and existing catalogues.

Data Collection

The first step involved the acquisition of topographic and morphometric datasets specific to the city of Naples. Both open-source and institutional data were employed, including the municipal topographic database (DBT), digital terrain models (DTM) and digital surface models (DSM) provided by the Campania Region, as well as cadastral and census data related to the built environment. All datasets were normalized and georeferenced in a GIS environment to ensure consistency and interoperability.

In parallel, the open-source LCZ layer developed by Olivera et al. (2020) for the Metropolitan City of Naples was acquired from the WUDAPT platform, generated through automated classification of Landsat satellite imagery (Fig. 2). Since the resolution and accuracy of the initial LCZ layer were insufficient to capture the morphological variability of a complex urban context such as Naples, an optimization process was carried out through integration with local morphometric data.

Optimization of Local Climate Zones

LCZ optimization was achieved by integrating physical parameters such as building height, building density, percentage of impervious surfaces, presence of green areas, and land-use typologies. Spatial analysis in the GIS environment was conducted using dedicated modules for overlay, segmentation, and morphological classification. The DTM and DSM models were employed to extract altimetric variations and define the three-dimensional configuration of urban environments, in combination with cadastral records and high-resolution orthophotos.

Integration of LCZs with urban taxonomies

The second phase concerned the integration of LCZ with the taxonomy of the physical urban system developed within the RETURN project, in accordance with PNACC provisions, which adopt a subdivision of the urban settlement into sectoral domains (Grey, Green, and Soft). This integration is essential since LCZs allow for the evaluation of adaptation strategies in terms of potential variation of classification parameters, while the taxonomy provides a more detailed breakdown of the physical composition of urban settlements and refines the broader-scale schematization carried out by LCZs. It identifies the elements most suitable to incorporate PNACC planning directives, offering a systematic representation of urban conditions and the interconnections between natural and anthropic components as a fundamental starting point for the definition of effective strategies.

Specifically, the taxonomy subdivides the Grey domain into Built-up areas—including Building blocks (Urban blocks, Residential units, and Building aggregates) and paved open spaces (Road layout, Urban voids)—and Technological systems (Water, Communication, Sewage, Energy, Mobility). The Green domain encompasses systems with natural characteristics within the physical system (Green and Blue), which contribute to climate change adaptation. The Green system includes Vegetated areas (Woods, Forests, Parks, Gardens, Agricultural areas, Urban greening, and uncultivated areas) and Unvegetated areas (Dunes, Bare soil); the Blue system includes Water bodies (Rivers, Riverside, Lakes) and Shoreline (Beaches and Dunes). The study area of the Soccavo district is presented in Fig. 3 following the analytical process.

For mapping the taxonomic elements, the DBT of the study area was used to associate each feature with the relevant systems and subsystems of the taxonomy (Tab.1).

Through GIS-based spatial analysis and zonal statistics, the predominant physical elements within each LCZ were identified and linked to the taxonomy's specific subsystems. This enabled the development of an integrated overview of the area's characteristics, highlighting both climatic potential and vulnerabilities across the various urban fabrics. At the end of this process, summary sheets were prepared for each LCZ, with an example for LCZ-123 provided in Fig. 4.

The results show that most urban fabrics belong to the Grey domain (85.26%), consistent with LCZ-123 classification parameters. At the fifth level of taxonomic detail, Building blocks are predominantly represented by Residential units.

Incorporating building height—critical to distinguishing LCZ 1, 2, and 3—clarified that most Residential units are between 3 and 10 meters in height. This allowed LCZ-123 to be defined with high precision as almost exclusively LCZ-2. Table 2 shows the details of the measurements, both in absolute terms (in km²) and in relative terms (%).

The table shows that the Residential Units, which appear to constitute the prevalent building typology in the entire study area (77.04%), are characterised by building characteristics which for 84.91% in terms of surface area belong to LCZ-2.

A similar analysis was carried out for LCZ-456 (Fig. 5). As in the previous case, the taxonomic assessment aligns with LCZ-456 parameters, though here the share of Green areas is higher (36.90% of the total area). At the fifth taxonomic level, Building blocks are again dominated by Residential units, covering 16.94% of LCZ-456. However, the integration of building height did not reveal an absolute predominance of a single urban fabric (Tab.3).

A slight prevalence of Residential units in LCZ-6 (59.29%) was observed but was not sufficient to conclusively assign the fabric to one LCZ (Tab.3).

To further refine the classification, additional analyses of urban area similarities—expressed in terms of geometric and physical parameters used for LCZ identification—were conducted. Spatial and zonal statistics revealed misclassification of LCZ-465 in certain areas. Figure 8 illustrates an example block.

As the representations indicate, the scale of LCZ mapping is not always sufficient for neighborhood-level analysis, requiring finer-grained urban fabric assessments to more effectively distinguish the characteristics determining LCZ assignment.

The selected block (highlighted in blue) was classified as LCZ-456 despite its taxonomic elements being consistent with LCZ-2. Similar inconsistencies were observed in several areas, necessitating reclassification. Downstream of the process, a variation in the percentages of tissues found in LCZ-456 occurs, as illustrated in Table 4.

Following this reassignment, the percentages of fabrics in LCZ-456 shifted: Building aggregates became predominant (67.77%), with 78.26% of buildings falling into LCZ-6, while the share of Residential units decreased after relocation to LCZ-2.

This detailed analysis enhanced the accuracy of LCZ classification and allowed for quantitative estimation of the building stock potentially subject to adaptation interventions.

Selection and Comparison of Adaptation Strategies

The final phase focused on selecting climate adaptation strategies from the PNACC Action Database, linked to the taxonomic elements identified for each LCZ. The database provides an overview of proposed measures, specifying for each action:

- category of intervention;
- sectoral domain (Soft, Green, or Grey);
- indicators for monitoring both progress and effectiveness;
- relevant regulatory references;
- estimated costs;
- stakeholders involved in implementation.

Action selection was conducted at the district scale, prioritizing those most consistent with the environmental, social, and infrastructural characteristics of the context. Each action is accompanied by defined operational objectives and a monitoring system that allows assessment of effectiveness and progress using quantitative and qualitative indicators. These relate to reducing climate exposure, enhancing resilience, improving environmental quality, and optimizing resources. Each action was associated with the relevant class of taxonomic elements as its hypothetical field of application. While representing a crucial step, this association involves a degree of simplification and may vary depending on local specificities. Its validity lies in providing designers with a guiding framework for selecting actions in relation to objectives, supporting an initial evaluation of effectiveness and progress.

To connect PNACC objectives and actions with specific adaptation and climate risk reduction measures, the actions were compared with the set proposed by Musco et al. (2020), an updated compendium of interventions linked to LCZ-2. This set includes urban afforestation, green roofs, SuDS (channels and drains), permeable pavements, cool surfaces, urban shading, green walls, rainwater harvesting, early warning systems, and microclimate fountains.

By localizing elements in terms of LCZ, each taxonomic component of the Soccavo district was associated with a corresponding action category, consistent with its morpho-typological configuration and climate vulnerabilities. The output was a set of interventions measurable in terms of effectiveness and progress, as required by PNACC, contextualized through LCZ classification (Fig. 7).

As summarized in Fig. 7, each action and its indicators are linked to one or more PNACC objectives across different urban contexts. For example, “Green roofs” have different implications depending on whether they are applied in historic centers (LCZ 2, 3) or in loosely gridded consolidated areas (LCZ 6, 8, 10). In the former, experimental adaptation projects in public and private spaces prevail, while in the latter—characterized by fewer constraints and more open green areas—green infrastructure and ecosystem service enhancement take priority.

The analysis highlights that compact high-rise LCZs (LCZ-2), typical of historic centers, require combined interventions such as urban shading, vertical vegetation, and cool surfaces; while low-density residential areas (LCZ 4–6) are better suited to NbS, SuDS, and de-impermeabilization to establish green infrastructure and strengthen green and blue system ecosystem services.

Overall, the process produced homogeneous proposals for each LCZ in relation to PNACC objectives, demonstrating favorable reproducibility and serving as a foundation for local climate adaptation guidelines based on Local Climate Zone classification.

Discussion of Results

The analysis first produced a more accurate mapping of Local Climate Zones (LCZ) for the Soccavo urban area in the Metropolitan City of Naples. The heterogeneous distribution of LCZs reflects the complexity of urban morphology, building density factors, and the diversity of land cover in the area. Integration with the urban taxonomy developed in the RETURN project provided a comprehensive overview of the physical and functional characteristics of urban settlements, consistent with LCZ classification, and made available both in GIS (Fig. 8) and as synthesized datasheets. The results indicate that the composition of each LCZ in terms of physical elements corresponds to the descriptions provided by Stewart and Oke. Nevertheless, considering the typically different characterization factors for LCZs in European cities and the need to improve input data through point-based verification, the correspondence of each LCZ to case-specific values requires further validation following the methodology proposed by Olivera et al., as applied to the Lisbon case study. The association between DBT elements and the taxonomy represents a significant factor for replicability, enabling further experimentation due to the nationally standardized nature of DBT classification. Similarly, the synthesized datasheets (Fig. 7), which catalog actions relative to adaptation objectives, constitute an innovative output supporting the development of operational tools capable of translating national planning guidance into localized and measurable measures.

Conclusions

This research proposes an innovative approach to urban climate risk management, based on the integration of Local Climate Zones with the PNACC urban taxonomy. By leveraging knowledge of urban settlements and climate change, and integrating open-source datasets, the approach provides an initial support tool for assessing the effectiveness of adaptation strategies and actions, applied in this study to the city of Naples. The methodological framework demonstrates how combining LCZs and urban taxonomies can constitute an operational support tool for planning and risk management. The developed tools facilitate comparative analysis of morphological, morphometric, and environmental aspects of settlements, identifying critical areas for detailed investigation and providing design guidelines that integrate risk reduction strategies from the earliest planning stages. The originality of the approach lies in the convergence of international knowledge tools with local taxonomies aligned with national regulations, producing a synergistic knowledge and intervention system that addresses literature-identified gaps regarding the application of strategies through instruments capable of translating national and regional objectives into localized and measurable actions.

Future developments are necessary, particularly regarding empirical validation of the model, analysis of LCZ classification changes in relation to applied actions, and extension to broader territorial contexts. The effectiveness of linking actions to PNACC adaptation objectives must be verified for each intervention in relation to improvements in urban thermal comfort and microclimate (through variations in LCZ parameters) and monitored using the progress and effectiveness indicators provided by the PNACC Database.

This contribution targets researchers, designers, and policy makers engaged in climate risk management, aiming to integrate international experimentation with national research to develop effective, localized adaptation measures, consistent with the specificities of urban contexts, which constitute an essential testing ground for addressing present and future challenges.

Notes

¹The WUDAPT online platform can be accessed at the following link: <https://www.wudapt.org/>

²For further information on the set of actions, please refer to the following link: <https://www.comune.milano.it/aree-tematiche/ambiente/resilienza/adattamento-ai-cambiamenti-climatici>.

³The taxonomy was developed as part of Task 5.2.2 and applied to the Soccavo case study in Task 5.4.3. The work, currently being published, refers to the associated Deliverables, DV2.2 and DV4.4, respectively.

References

- Angelucci, F., Rui Braz, A., di Sivio, M., Ladiana, D., (2015) The Technological design of Resilient Landscape. Il progetto tecnologico del paesaggio resiliente, FrancoAngeli, Milano. ISBN 9788891741264
- Baró F, Chaparro L, Gómez-Baggethun E (2021), Urban green infrastructures and ecosystem services: linking morphology to function. *Urban Forestry & Urban Greening* 59:126982. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126982>
- Fondazione CMCC (2023), Annual report 2023. Available at: https://files.cmcc.it/Annual_Report/AR_2023_cmcc.pdf
- Cremonini, L., Georgiadis, T., Nardino M., Rossi, F., Rossi, A., Pinca, G., Fazzini, M., (2023), Tools for Urban Climate Adaptation Plans: A Case Study on Bologna and Outcomes for Heat Wave Impact Reduction, *Challenges*, 14 (4), 48. <https://doi.org/10.3390/challe14040048>
- D'Ambrosio, V., Di Martino, F., & Tersigni, E. (2023). Towards Climate Resilience of the Built Environment: A GIS-Based Framework for the Assessment of Climate-Proof Design Solutions for Buildings. *Buildings*, 13(7), 1658. <https://doi.org/10.3390/buildings13071658>
- D'Onofrio D, Vaccaro F, Mazzocchi M (2020), Urban heat island assessment and mitigation strategies: an overview. *Sustainability* 12(12):4913. <https://doi.org/10.3390/su12124913>
- European Environment Agency (2020), Urban Adaptation to Climate Change in Europe. EEA Report No 09/2020. <https://doi.org/10.2800/649947>
- Gál, T., Bechtel, B., Unger, J. (2015), Comparison of two different Local Climate Zone mapping methods. Presented at ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment.
- Hidalgo, J., Dumas, G., Masson, V., Petit, G., Bechtel, B., Bocher, E., Foley, M., Schoetter, R., Mills, G. (2019), Comparison between local climate zones maps derived from administrative datasets and satellite observations, *Urban Climate*, 27, 64-89. [10.1016/j.uclim.2018.10.004](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.10.004)
- IPCC (2022), Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Levlovics, E., Gál, T., Unger, J. (2013), Mapping local climate zones with a vector-based GIS method. *Aerul și Apa: Componente ale Mediului*, 423-430.
- Liu, A., Ma, X., Du, M., Su, M., Hong, B. (2023), The cooling intensity of green infrastructure in local climate zones: A comparative study in China's cold region, *Urban Climate*, 51, 101631. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101631>
- Lopes, P., Fonte, C., See, L., & Bechtel, B. (2017), Using OpenStreetMap data to assist in the creation of LCZ maps. In 2017 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE) (1-4), IEEE. [10.1109/JURSE.2017.7924630](https://doi.org/10.1109/JURSE.2017.7924630)
- Losasso, M., Rigillo, M., (2024), L'adattamento climatico alla scala territoriale e urbana: acqua, suolo e vegetazione, in *AMBIENTE RISCHIO COMUNICAZIONE*, n.19:L'acqua. È un problema?, pp. 76-79. ISSN 2240-1520.
- Maharroof, N., Emmanuel, R., Thomson, C., (2020), Compatibility of local climate zone parameters

- for climate sensitive street design: Influence of openness and surface properties on local climate, *Urban Climate*, Volume 33, 100642. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100642>.
- Maragno, D., Litt, G., Ferretto, L., Gerla, F. (2022). Abaco per la transizione climatica. Primo catalogo per pianificare l'adattamento nell'Alto Adriatico: https://www.researchgate.net/publication/363055875_ABACO_PER_LA_TRANSIZIONE_CLIMATICA_Primo_catalogo_per_pianificare_l'adattamento_nell'Alto_Adriatico#fullTextFileContent.
- Middel, A., Häb, K., Brazel, A. J., Martin, C. A., & Guhathakurta, S. (2014), Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones, *Landscape and urban planning*, 122, 16-28. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.004>
- Mills, G., Bechtel, B., Alexander, P., Theeuwes, N., Foley, M., Ching, J., Ren, C., Yong, X., (2017) Using WUDAPT to explore urban exposure to climate risks in selected cities, in Brotas L., Roaf S., Nicol F. (eds.), *Proceedings of 33rd PLEA International Conference: Design to Thrive - PLEA 2017*, Volume 2, pp. 1797 - 1804, NCEUB 2017 - Network for Comfort and Energy Use in Buildings, Edinburgo. ISBN 978-099289575-4.
- Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) (2023). PNACC – Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici. Allegato II: Metodologie per la definizione di strategie e piani locali di adattamento ai cambiamenti climatici. Disponibile online: https://www.mase.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/clima/PNACC_AllegatoII_metodologie_definizione_strategie_piani_locali_adattamento.pdf [accessed 17 May 2025].
- Moraci, F., Errigo, M. F., Fazio, C., Campisi, T., & Castelli, F. (2020). Cities under Pressure: Strategies and Tools to Face Climate Change and Pandemic. *Sustainability*, 12(18), 7743. <https://doi.org/10.3390/su12187743>
- Musco, F., Maragno, D., & Litt, G. (2020). Abaco di azioni di adattamento ai cambiamenti climatici. Disponibile online a: https://air.iuav.it/bitstream/11578/306140/1/Abaco_LAST_low.pdf
- Mussinelli E., Tartaglia, A. (2021). Organizzare la conoscenza secondo criteri site-specific / Organising knowledge according to site-specific criteria, in Bologna, R., Losasso, M., Mussinelli, E., Tucci, F. (Eds.) (2021). *Dai distretti urbani agli eco-distretti. Metodologie di conoscenza, programmi strategici, progetti pilota per l'adattamento climatico/ From Urban Districts to Eco-districts. Knowledge Methodologies, Strategic Programmes, Pilot Projects for Climate Adaptation*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna, IT.
- Nazarian, N., Dumas, N., Kleissl, J., Norford, L. (2019). Effectiveness of cool walls on cooling load and urban temperature in a tropical climate. *Energy and Buildings*, 187, 144-162. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.022>
- Oke, T.R. (1988), "Street Design and Urban Canopy Layer Climate", *Energy and Buildings*, Vol. 11, pp. 103-113.
- Oke T.R., Mills, G, Christen, A., Voogt, J.A. (2017), *Urban Climates*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Oliveira, A., Lopes, A., Niza, S., (2020) Local climate zones datasets from five Southern European cities: Copernicus based classification maps of Athens, Barcelona, Lisbon, Marseille and Naples, *Data in Brief*, 31, 105802. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105802>
- Santamouris, M. (2015). Regulating the damaged thermostat of the cities—status, impacts and mitigation challenges. *Energy and Buildings* 91:43–56. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.052>
- Schiaffonati, F., Mussinelli, E., Gambaro, M., (2011) *Tecnologia dell'Architettura per la progettazione ambientale | Architectural Technology for Architecture and Environment*, vol.1, pp.48-53.
- Spano, D., Mereu, V., Bacciu, V., Barbato, G., Buonocore, M., Casartelli, V., Ellena, M., Lamesso, E., Ledda, A., Marras, S., Mercogliano, P., Monteleone, L., Mysiak, J., Padulano, R., Raffa, M., Ruiu, M.G.G., Serra, V., Villani, V. (2021), *Analisi del rischio. I cambiamenti climatici in sei città italiane*. Lecce, Italia: Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici – CMCC. https://www.doi.org/10.25424/cmcc/analisi_del_rischio_2021.
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the*

American Meteorological Society 93(12):1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
 Wang, R., Ren, C., Xu, Y., Ka-Lun Lau, K., Shi Y. (2018), Mapping the local climate zones of urban areas by GIS-based and WUDAPT methods: A case study of Hong Kong, Urban Climate, 24, 567-576. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.10.001>
 WUDAPT Consortium (2018). World Urban Database and Access Portal Tools. <https://www.wudapt.org> [accessed 2025].
 Zeidler J, Renaud FG, Diallo AM (2018). Climate change adaptation in urban areas: reflections on the role of spatial planning. Sustainability 10(12):4482. <https://doi.org/10.3390/su10124482>

Attribution, Acknowledgments, Copyright Rights

The experimental work is part of the PNRR RETURN Project – Multi-Risk Science for Resilient Communities under a Changing Climate, Spoke 5 – TS1: Urban and Metropolitan Settlement. Scientific supervisors: Prof. Domenico Calcaterra, Prof. Andrea Prota. National coordinators of Spoke 5 – TS1: Prof. M. Losasso, Prof. A. Prota, Dr. M. Pittore. The project is funded under the national call of the Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza – Extended Partnership PE3.

Institutions involved in Spoke TS1 include the Universities of Bologna, Milan, Florence, Ca' Foscari, Cagliari, Naples Federico II (lead), Palermo, Turin, and other partners (Alma Viva, Autostrade, FS, Department of Civil Protection, OBS).

Role of the Authors in the Research: Members of the UNINA research unit, acting as critical mass and aggregated team.

Images

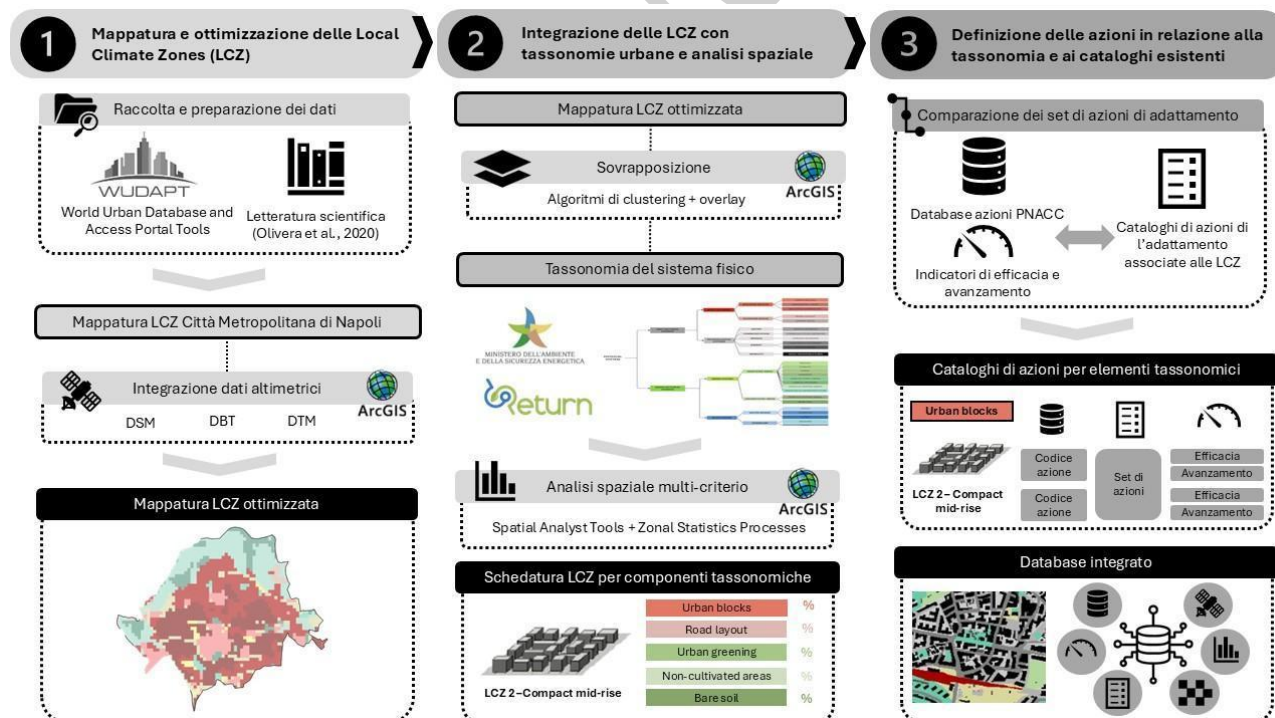


Fig. 01 – Schematic representation of the adopted methodology.

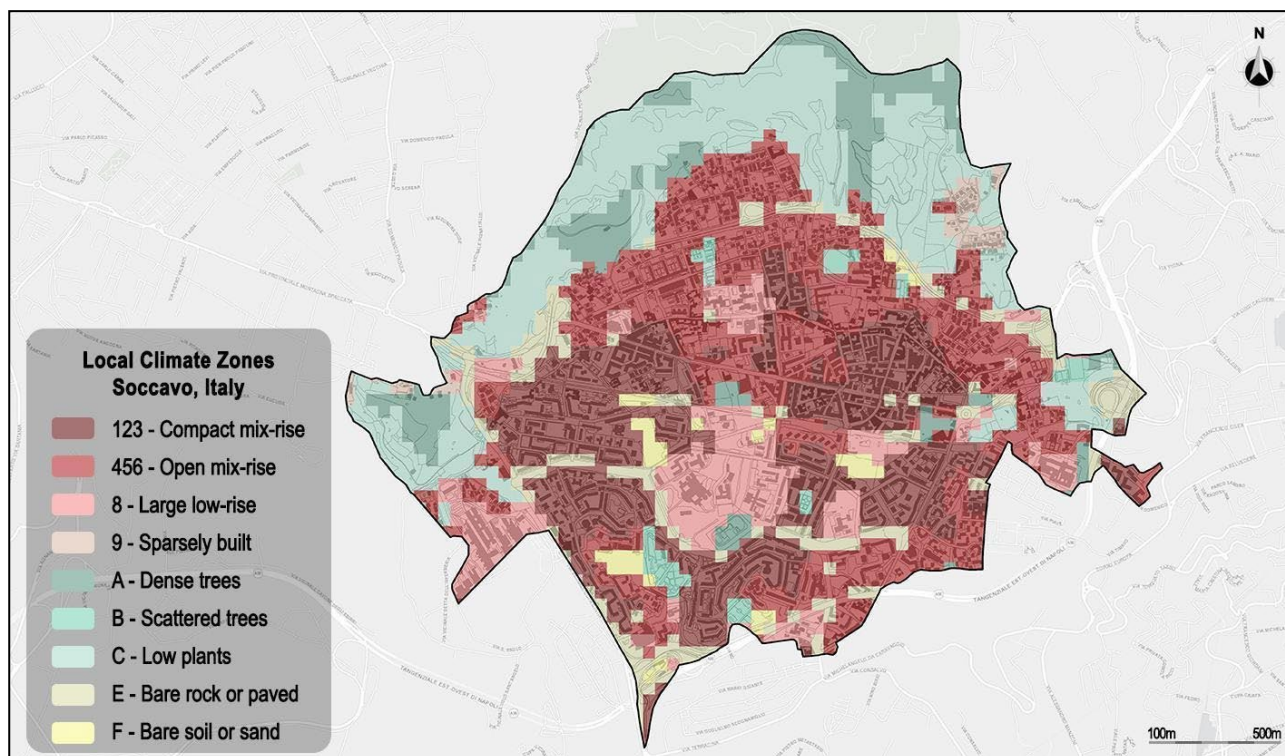


Fig. 02 – LCZ mapping (WUDAPT) for the Soccavo study area (NA).

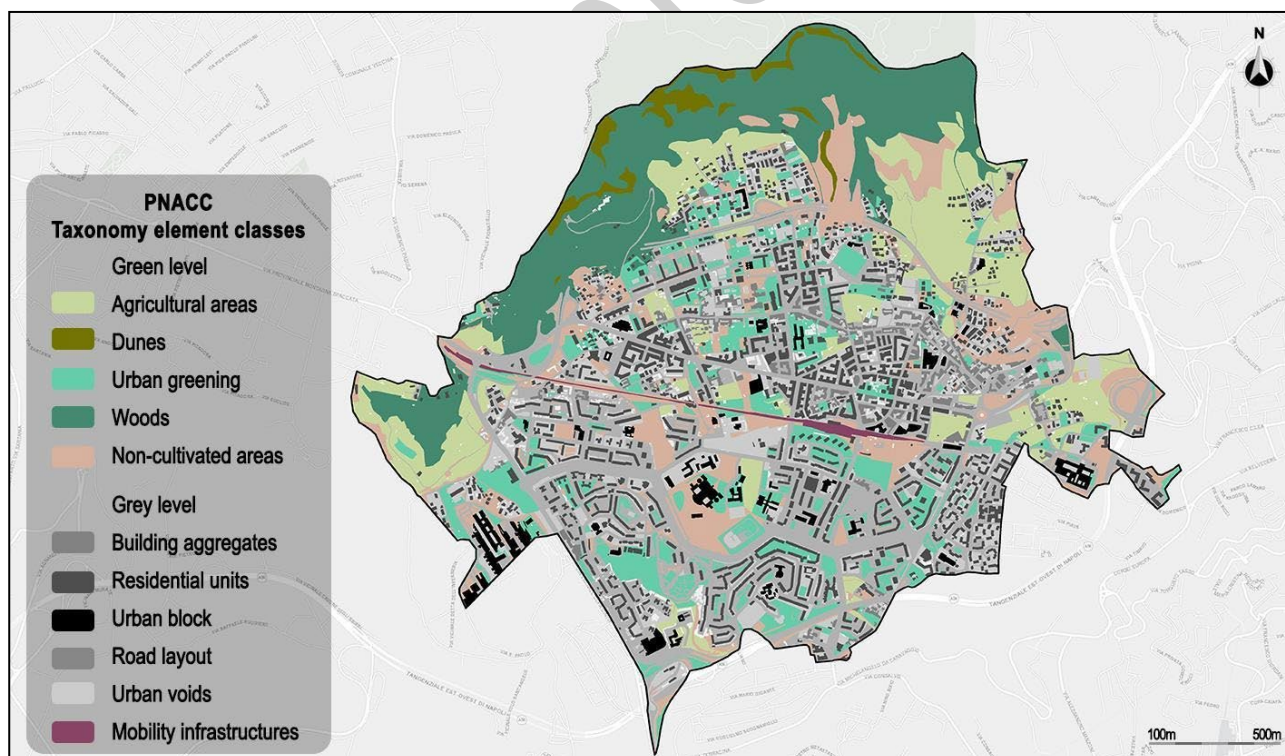


Fig. 03 – Taxonomic mapping (PNACC) for the Soccavo study area (NA).

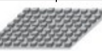
LOCAL CLIMATE ZONE				2° LEVEL OF TAXONOMY [PNACC]			3° LEVEL OF TAXONOMY [PNACC]			4° LEVEL OF TAXONOMY [PNACC]			5° LEVEL OF TAXONOMY [PNACC]					
LABEL	AREA [KM²]	LCZ COVER RATIO		LABEL	AREA [KM²]	COVER RATIO	LABEL	AREA [KM²]	COVER RATIO	LABEL	AREA [KM²]	COVER RATIO	LABEL	AREA [KM²]	COVER RATIO			
LCZ1 – Compact high-rise  + LCZ2 – Compact mid-rise  + LCZ2 – Compact low-rise 	LCZ 123 Compact mixed rise	1,190	23,26%	Green sectoral areas	0,176	14,74%	Green system	0,176	14,74%	Vegetated areas	0,176	14,74%	Agricultural areas	0,013	1,11%			
				Grey sectoral areas	1,015	85,26%	Built up areas	1,011	84,90%	Building blocks	0,345	28,94%	Non-cultivated areas	0,064	5,40%			
													Urban greening	0,098	8,23%			
Building aggregates	0,054	4,50%																
Residential units	0,248	20,87%																
Urban blocks	0,020	1,72%																
LCZ4 – Open high-rise	LCZ 456 Open mixed-rise	1,347	26,31%	Grey sectoral areas	0,850	63,10%	Built up areas	0,842	62,54%	Building blocks	0,306	22,75%	Road layout	0,477	40,09%			
													Outdoor spaces	0,666	55,96%	Urban voids	0,189	15,87%
													Technological system	0,004	0,36%	Mobility	0,004	0,36%
LOCAL CLIMATE ZONE			2° LEVEL OF TAXONOMY [PNACC]			3° LEVEL OF TAXONOMY [PNACC]			4° LEVEL OF TAXONOMY [PNACC]			5° LEVEL OF TAXONOMY [PNACC]						
LABEL	AREA [KM²]	LCZ COVER RATIO		LABEL	AREA [KM²]	COVER RATIO	LABEL	AREA [KM²]	COVER RATIO	LABEL	AREA [KM²]	COVER RATIO	LABEL	AREA [KM²]	COVER RATIO			
LCZ4 – Open high-rise  + LCZ5 – Open mid-rise  + LCZ6 – Open low-rise 	LCZ 456 Open mixed-rise	1,347	26,31%	Green sectoral areas	0,497	36,90%	Green system	0,497	36,90%	Vegetated areas	0,497	36,90%	Agricultural areas	0,148	11,00%			
				Grey sectoral areas	0,850	63,10%	Built up areas	0,842	62,54%	Building blocks	0,306	22,75%	Non-cultivated areas	0,119	8,85%			
													Urban greening	0,204	15,14%			
Woods	0,026	1,91%																
Building aggregates	0,057	4,22%																
Residential units	0,201	16,94%																
LCZ4 – Open high-rise	LCZ 456 Open mixed-rise	1,347	26,31%	Grey sectoral areas	0,850	63,10%	Built up areas	0,842	62,54%	Building blocks	0,306	22,75%	Urban blocks	0,021	1,59%			
													Outdoor spaces	0,536	39,79%	Road layout	0,317	23,50%
													Technological system	0,008	0,56%	Mobility	0,008	0,56%
															Mobility Infrastructures	0,008	0,56%	

Fig. 04 – Analysis datasheets of the taxonomic composition of LCZ-123.

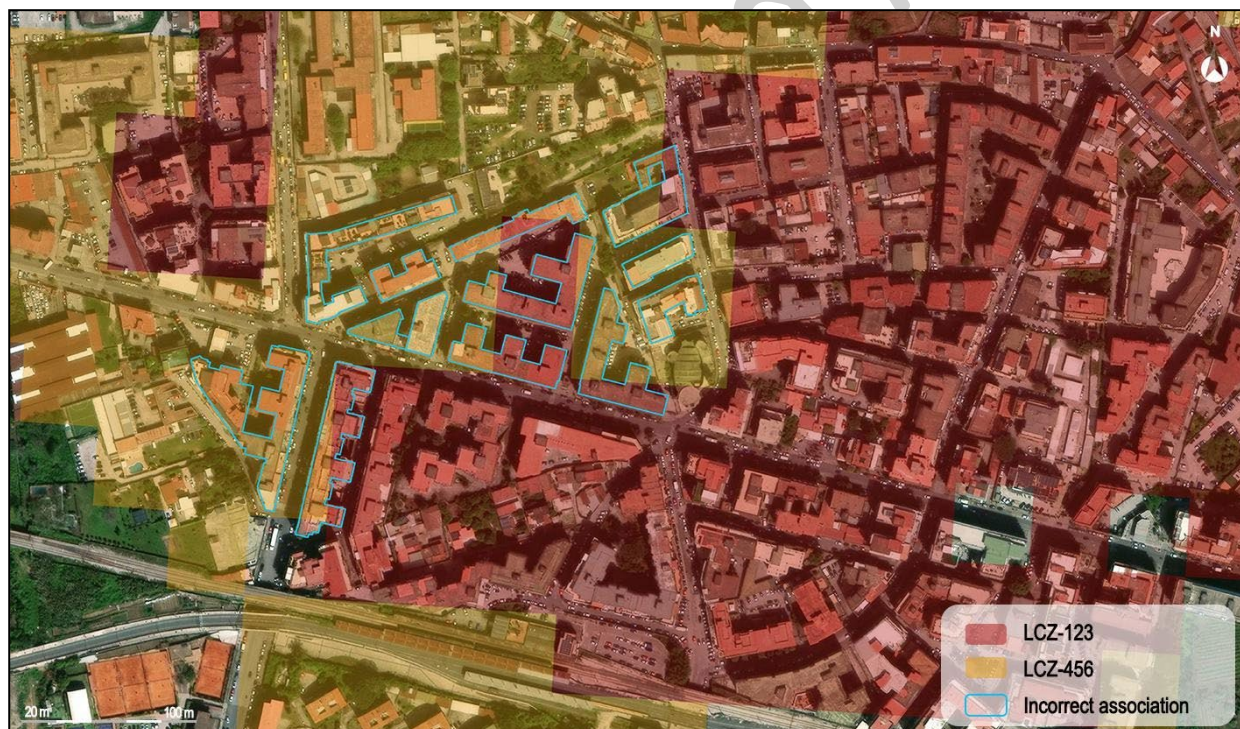


Fig. 05 – Analysis datasheets of the taxonomic composition of LCZ-456.

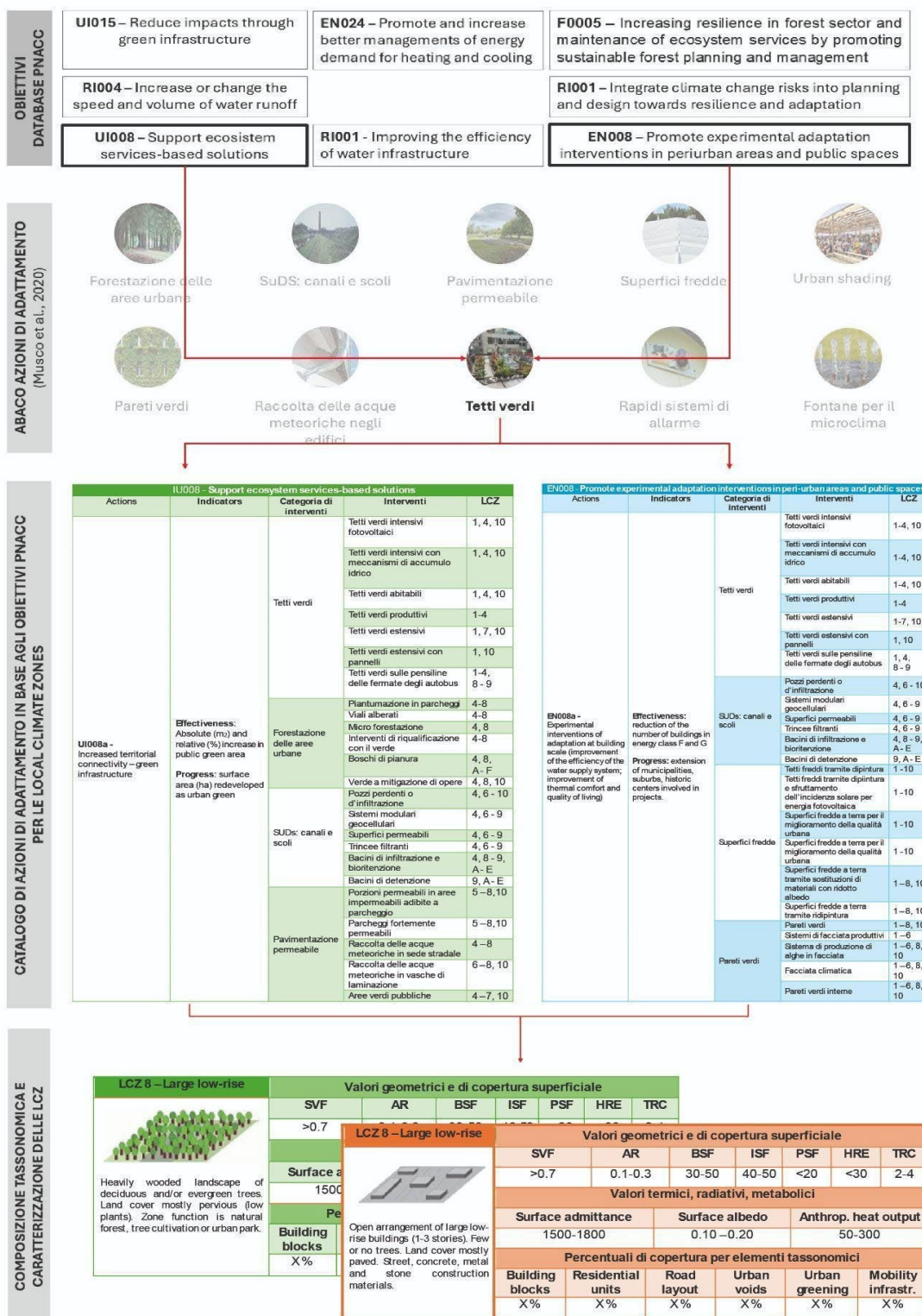


Fig. 06 – Exemplary sample of incorrect LCZ assignment relative to the identified taxonomies.

Fig. 07 – Process diagram and example datasheets of adaptation actions associated with LCZs in relation to PNACC Database objectives. Elaborated by the authors based on Musco et al. (2020).

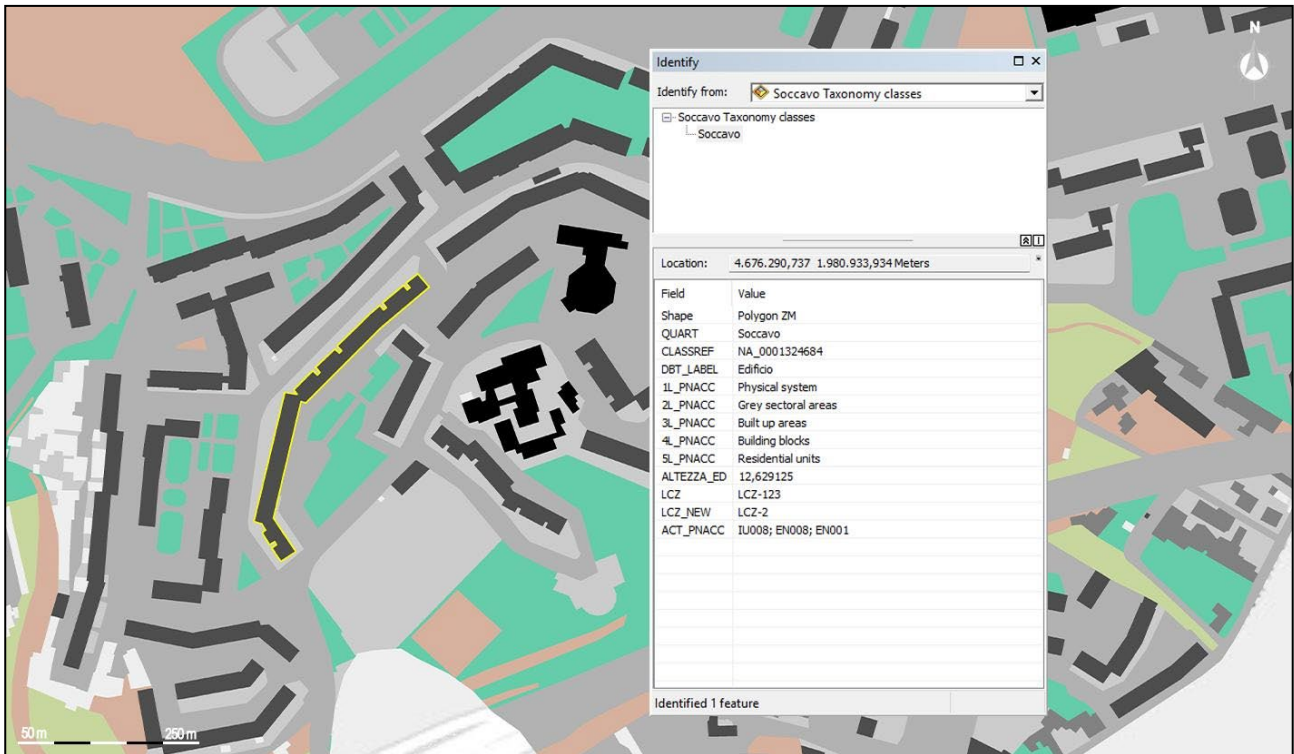


Fig. 08 – Database structure. Each element of the database is associated with its corresponding LCZ, taxonomic element classes (from 1L_PNACC to 5L_PNACC), and the code corresponding to potential PNACC adaptation objectives (ACT_PNACC).

LOCAL CLIMATE ZONES PER LA CONOSCENZA E IL PROGETTO CLIMATE-RISK ORIENTED DEGLI INSEDIAMENTI URBANI

Antonio Sferratore¹, Vittorio Miraglia¹

¹ Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli, Italia

Abstract

La ricerca integra classificazioni morfometriche (LCZ) e tassonomie urbane (PNACC, progetto RETURN) per supportare l'adattamento al rischio climatico. A Napoli, la mappatura LCZ è stata affinata con dati morfometrici e approcci GIS-based, migliorandone l'accuratezza. L'integrazione con tassonomie urbane climate-oriented ha permesso di associare a ciascuna LCZ, uniforme per caratteristiche geometriche, superficiali, di copertura del suolo, termico-radiative e metaboliche, azioni mirate, valutate attraverso gli indicatori qualitativi e quantitativi del PNACC. Lo studio propone un metodo multiscalare e replicabile per la definizione di azioni climate risk-oriented misurabili e calibrate sui singoli contesti urbani.

Parole chiave: rischio climatico; progettazione ambientale; local climate zones; tassonomie urbane; insediamenti urbani.

Introduzione

Il cambiamento climatico rappresenta una delle sfide più critiche del nostro tempo, con implicazioni dirette sulla vivibilità e resilienza delle aree urbane. Le città, densamente popolate e infrastrutturate, sono particolarmente vulnerabili agli impatti di eventi estremi quali ondate di calore, alluvioni, siccità e innalzamento del mare. La complessità fisica e funzionale del tessuto urbano amplifica tali effetti, richiedendo strategie adattive fondate su una conoscenza approfondita del contesto morfoclimatico (IPCC, 2022; EC, 2018; Rosenzweig et al., 2018).

I progressi nei sistemi di osservazione della Terra e nelle tecniche di apprendimento automatico hanno prodotto set di dati ad alta risoluzione su topografia, copertura del suolo urbano e popolazione, oltre che su rischi climatici presenti e futuri. Tuttavia, tali strumenti restituiscono descrizioni autonome dei pericoli e delle componenti di rischio considerate (Mills et al., 2017). In questo quadro, la gestione del rischio climatico urbano necessita di un approccio scientificamente fondato, multidisciplinare e orientato alla territorializzazione delle misure di adattamento (CMCC, 2023). Le strategie, intese come azioni di pianificazione per ridurre gli effetti negativi dei futuri impatti, devono considerare le vulnerabilità locali per inserirsi in una visione regionale, nazionale e internazionale. In chiave progettuale, gli approcci dovranno saper conservare, modificare e gestire lo spazio urbano in consapevolezza degli scenari di crisi climatica (Angelucci, 2015), con strumenti capaci di andare oltre la sola dimensione morfologica o funzionale e di includere aspetti ambientali, culturali e sociali (Schiaffonati, 2018). Comprendere la complessità di tali scenari implica la necessità di semplificare i dati, facilitando il calcolo, senza perdere la variabilità che contraddistingue i tessuti urbani e le loro interazioni fisiche e socioeconomiche (D'Ambrosio et al. 2023; Turchetti, 2023). A livello internazionale, diversi studi hanno analizzato la parametrizzazione urbana per individuare relazioni tra fattori ambientali e caratteristiche morfologiche (Oke, 1988). Dopo Chandler (Chandler,

1970), Ellefsen (Ellefsen, 1984) e Oke (Oke, 2006), la classificazione delle Local Climate Zones (LCZ) di Stewart e Oke (Stewart e Oke, 2012) è divenuta riferimento consolidato. La LCZ definisce porzioni di territorio omogenee per copertura superficiale, materiali ed attività umane; 10 classi riguardano le aree edificate (building types) e 7 l'uso dei suoli (land cover types). A ciascuna classe sono associati parametri standardizzati geometrici, superficiali, termici e metabolici. Il framework, oggi ampiamente adottato (Demuzere, Bechtel, et al., 2019; Ching, Mills, et al., 2018; Mills, Bechtel, et al., 2017), trova nella piattaforma open-source WUDAPT1 uno strumento globale per mappe climatiche urbane georeferenziate e comparabili. Per molte città, la classificazione è utile non solo per analisi microclimatiche e comfort urbano, ma anche come base per scenari di riqualificazione in ottica di adattamento e mitigazione (Alexander & Mills, 2014, Turchetti, 2023). Bechtel ha tuttavia evidenziato la necessità di sviluppi nello schema WUDAPT, soprattutto per le città europee (Gal et al., 2015; Lopes et al., 2019). Tra le metodologie più promettenti figurano approcci GIS-based integrati con database open-source (Levlovics et al., 2013; Wang et al., 2018; Hidalgo et al., 2019). Diversi autori hanno inoltre utilizzato la LCZ per integrare conoscenza climatica e progettazione urbana, delineando azioni di adattamento e riduzione del rischio in relazione alle caratteristiche morfologiche e ambientali (Middel et al., 2014; Mills et al., 2017; Nazarian et al., 2019; Maharof et al., 2020; Musco et al., 2020; Liu et al., 2023).

In Italia, il PNACC (MASE, 2023) è il principale riferimento normativo per l'adattamento, offrendo un catalogo di azioni suddivise per settori e territori e promuovendo strategie locali basate sulla conoscenza del rischio. Tuttavia, l'applicazione risulta disomogenea per la mancanza di strumenti operativi in grado di tradurre le linee generali in misure localizzate (Moraci et al., 2020; Cremonini et al., 2023).

Tra le esperienze nazionali, si segnalano il Piano Territoriale Metropolitano (PTM) elaborato dalla Città Metropolitana di Milano nell'ambito di Life MASTER ADAPT e l'Abaco per la transizione climatica (Maragno et al., 2022) sviluppato dall'Università Iuav di Venezia. Nel primo caso, il PTM associa le LCZ a strategie di adattamento, verificandone gli effetti su caratteristiche geometriche, superficiali e termiche, e consentendo di testarne l'applicabilità in contesti urbani simili. Nel secondo, l'Abaco supporta le Pubbliche Amministrazioni nell'individuazione di misure atte a compensare vulnerabilità locali e potenziare servizi ecosistemici, adottando la logica del transetto per tipizzare il territorio dell'Alto Adriatico e orientare le misure in base alla tipologia territoriale (Maragno et al., 2022). Questi modelli semplificano la scelta delle misure per ciascun tessuto urbano, favorendo l'integrazione disciplinare come requisito essenziale nell'adattamento (Losasso e Rigillo, 2024). Il presente lavoro si colloca in questo filone, proponendo un approccio che integra l'analisi morfometrica delle LCZ con una lettura tassonomica del sistema urbano derivata dal PNACC. L'approccio è stato sperimentato nel progetto di ricerca RETURN, con l'obiettivo di offrire uno strumento conoscitivo e operativo a supporto delle decisioni locali. La ricerca integra le LCZ con una tassonomia coerente con la suddivisione del PNACC negli ambiti Grey e Green, per costruire una matrice conoscitiva capace di rappresentare per ciascuna LCZ criticità climatiche, caratteristiche tipologiche e possibili strategie. Il caso studio del distretto di Soccavo, nella Città Metropolitana di Napoli, ha consentito di testare la validità del modello in un contesto complesso e vulnerabile.

Metodologia e Sperimentazione

La metodologia adottata si basa su un approccio integrato finalizzato alla definizione di un modello conoscitivo che coniughi classificazioni climatiche e tassonomie urbane per migliorare la gestione del rischio climatico. L'iter sperimentale è articolato in tre fasi principali (Fig. 1):

- raccolta dei dati, mappatura e ottimizzazione delle Local Climate Zones,
- integrazione delle LCZ con tassonomie urbane e analisi spaziale,
- selezione delle strategie e azioni di adattamento in relazione agli elementi delle tassonomie e ai cataloghi esistenti.

Raccolta dei dati

Il primo passo ha riguardato la raccolta di dataset topografici e morfometrici specifici per la città di Napoli. Sono stati utilizzati dati open-source e istituzionali: il database topografico comunale (DBT), i modelli digitali di terreno (DTM) e di superficie (DSM) forniti dalla Regione Campania, e dati catastali e censuari relativi al sistema edificato. Questi dati sono stati normalizzati e georeferenziati in ambiente GIS per garantire coerenza e interoperabilità.

Parallelamente, è stato acquisito il layer LCZ open-source sviluppato da Olivera et al. (Olivera et al., 2020) per la Città Metropolitana di Napoli dalla piattaforma WUDAPT e ottenuto tramite classificazione automatizzata su immagini satellitari Landsat (Fig. 2). Poiché la risoluzione e la qualità del layer iniziale non erano sufficienti a descrivere dettagliatamente le variabili morfologiche di un contesto urbano complesso come Napoli, si è proceduto a un'ottimizzazione mediante integrazione con i dati morfometrici locali.

Ottimizzazione delle Local Climate Zones

L'ottimizzazione delle LCZ è stata effettuata mediante l'integrazione di parametri fisici come l'altezza degli edifici, la densità edilizia, la percentuale di superfici impermeabili, la presenza di spazi verdi e la tipologia degli usi del suolo. L'analisi spaziale in ambiente GIS è stata condotta utilizzando moduli specifici per la sovrapposizione, la segmentazione e la classificazione morfologica. I modelli DTM e DSM sono stati utilizzati per estrarre informazioni sulle variazioni altimetriche per la definizione della tridimensionalità degli ambienti urbani, in combinazione con dati catastali e ortofoto ad alta risoluzione.

Integrazione delle LCZ con tassonomie urbane

La seconda fase ha riguardato l'integrazione delle LCZ con la tassonomia del sistema urbano fisico sviluppata nell'ambito del progetto RETURN in relazione alle disposizioni del PNACC, per il quale si adotta una scomposizione dell'insediamento urbano in ambiti settoriali (grey, green e soft). L'integrazione si rende necessaria in quanto da un lato le LCZ permettono di verificare l'efficacia delle strategie in termini di adattamento attraverso la potenziale variazione dei parametri associati alla classificazione; dall'altro, la tassonomia approfondisce nel dettaglio la composizione fisica degli insediamenti urbani e perfeziona la schematizzazione dei tessuti a scala più ampia operata dalle LCZ, individuando gli elementi più idonei a recepire gli indirizzi di pianificazione disposti dal PNACC. Tale operazione fornisce una rappresentazione sistematica delle condizioni urbane e delle interconnessioni tra gli elementi naturali e quelli della componente antropica quale punto di partenza fondamentale per la definizione di strategie efficaci.

Nello specifico, la tassonomia prevede la scomposizione dell'ambito settoriale Grey nel sistema delle Built-up areas, di cui fanno parte i Building blocks (Urban blocks, Residential units e Building aggregates) e gli spazi aperti pavimentati (Road layout, Urban voids), e dei Sistemi Tecnologici (Water, Communication, Sewage, Energy, Mobility). L'ambito settoriale Green è costituito dai sistemi con caratteristiche di naturalità all'interno del sistema fisico (Green e Blue), capaci di contribuire a fornire una risposta di adattamento al cambiamento climatico. Il sistema Green è costituito da Vegetated areas (Woods, Forests, Parks, Gardens, Agricultural areas, Urban greening, non-cultivated areas) e Unvegetated areas (Dunes, Bare soil); il sistema Blue, da Water bodies (Rivers, Riverside, Lakes) e Shoreline (Beaches e Dunes). L'area di studio del distretto urbano di Soccavo è mostrata di seguito in Fig. 3 a valle del processo di analisi.

Per ottenere la mappatura degli elementi tassonomici, è stato necessario partire dal DBT dell'area di studio e associare ogni elemento ai relativi sistemi e sottosistemi della tassonomia (Tab. 1).

Tab. 1 - Associazione tra elementi del DBT e sistemi delle tassonomie PNACC

DBT LABEL	PNACC LABEL				
	1° LEVEL	2° LEVEL	3° LEVEL	4° LEVEL	5° LEVEL
Area attrezzata del suolo	Physical system	Grey sectoral areas	Built up areas	Outdoor spaces	Urban voids
Area di circolazione pedonale	Physical system	Grey sectoral areas	Built up areas	Outdoor spaces	Road layout
Area di circolazione veicolare	Physical system	Grey sectoral areas	Built up areas	Outdoor spaces	Road layout
Area priva di vegetazione	Physical system	Green sectoral areas	Green system	Vegetated areas	Non-cultivated areas
Area stradale	Physical system	Grey sectoral areas	Built up areas	Outdoor spaces	Road layout
Area verde	Physical system	Green sectoral areas	Green system	Vegetated areas	Urban greening
Attrezzatura sportiva	Physical system	Grey sectoral areas	Built up areas	Outdoor spaces	Urban voids
Bosco	Physical system	Green sectoral areas	Green system	Vegetated areas	Woods
Coltura agricola	Physical system	Green sectoral areas	Green system	Vegetated areas	Agricultural areas
Edificio	Physical system	Grey sectoral areas	Built up areas	Building blocks	Urban blocks / Residential units / Building aggregates
Forma naturale del terreno	Physical system	Green sectoral areas	Green system	Unvegetated areas	Dunes
Formazione particolare	Physical system	Green sectoral areas	Green system	Vegetated areas	Forests
Opera portuale e di difesa delle coste	Physical system	Grey sectoral areas	Technological system	Water	Water network
Pascolo o incolto	Physical system	Green sectoral areas	Green system	Vegetated areas	Non-cultivated areas
Sede di trasporto su ferro	Physical system	Grey sectoral areas	Technological system	Mobility	Mobility Infrastructures
Viabilità mista secondaria	Physical system	Grey sectoral areas	Built up areas	Outdoor spaces	Road layout

Successivamente, attraverso l'uso di strumenti GIS di analisi spaziali e statistica zonale sono stati identificati gli elementi fisici prevalenti in ciascuna LCZ e associati agli specifici sottosistemi della tassonomia. Ciò ha permesso di restituire un quadro integrato delle caratteristiche dell'area, evidenziando le potenzialità e le criticità climatiche di ciascun tessuto urbano. A valle del processo sono state realizzate delle schede sintetiche per ciascuna LCZ, delle quali si riporta un esempio per la LCZ-123 in Fig. 4.

Dai risultati si evince che la prevalenza dei tessuti appartiene al livello Grey (85,26%), in linea con i parametri di caratterizzazione della LCZ-123. Scendendo nel dettaglio del quinto livello di classificazione tassonomica, si evince che la prevalenza dei Building blocks è legata ai Residential units.

L'integrazione dell'altezza degli edifici, determinante per la distinzione delle singole LCZ 1, 2 e 3, chiarisce che la maggioranza degli edifici appartenenti alla classe delle Residential units ha un'altezza compresa tra i 3 e i 10 metri. Questo risultato ha permesso di definire, con un elevato grado di precisione, che la LCZ-123 può considerarsi quasi esclusivamente una LCZ-2. In Tab. 2 è illustrato il dettaglio delle misurazioni, sia in termini assoluti (in km²) sia in termini relativi (%).

Tab. 02 - Analisi di dettaglio componenti tassonomiche dei building blocks in relazione alle LCZ-123.

LCZ-123 TAXONOMY			LCZ1		LCZ2		LCZ3	
LABEL	AREA [KM ²]	COVER RATIO	AREA [KM ²]	COVER RATIO	AREA [KM ²]	COVER RATIO	AREA [KM ²]	COVER RATIO
Building aggregates	0,054	16,62%	0,000	0,00%	0,027	49,67%	0,027	50,33%
Residential units	0,248	77,04%	0,001	0,37%	0,211	84,91%	0,037	14,72%
Urban blocks	0,020	6,34%	0,000	0,00%	0,013	63,39%	0,008	36,61%

Dalla tabella si evince che le Residential Units, che risultano costituire la tipologia edilizia prevalente nell'intera area di studio (77,04%), sono connotate da caratteristiche dell'edificato che per 84,91% in termini superficiali appartengono alla LCZ-2.

La medesima analisi è stata effettuata sulla LCZ-456; in Fig. 5 è rappresentata la relativa scheda di analisi.

Come nel caso precedente, l'analisi tassonomica risulta coerente con i parametri della LCZ-456; infatti, la percentuale di Green areas è superiore alle LCZ-123 (36,90% della superficie complessiva). Confrontando le percentuali nel quinto livello tassonomico, si evince che la classe prevalente dei Building blocks è la Residential units, la quale ricopre il 16,94% dell'intera superficie LCZ-456.

In questo caso, l'analisi di dettaglio dei tessuti integrando il parametro relativo all'altezza degli edifici, non ha desunto una prevalenza assoluta di un tessuto edilizio specifico (Tab. 3).

Tab. 03. Analisi di dettaglio delle componenti tassonomiche dei building blocks in relazione alla LCZ-456

LCZ-456 TAXONOMY			LCZ4		LCZ5		LCZ6	
LABEL	AREA [KM ²]	COVER RATIO	AREA [KM ²]	COVER RATIO	AREA [KM ²]	COVER RATIO	AREA [KM ²]	COVER RATIO
Building aggregates	0,057	20,36%	0,000	0,00%	0,012	21,74%	0,044	78,26%
Residential units	0,201	71,96%	0,001	0,48%	0,081	40,36%	0,119	59,29%
Urban blocks	0,021	7,69%	0,000	0,00%	0,006	27,98%	0,015	69,95%

Una debole preponderanza in termini di copertura del tessuto, considerata però non sufficiente a stabilire con certezza l'appartenenza a una sola LCZ, è attribuibile alle Residential units della LCZ6 (59,29%). Per migliorare ulteriormente il livello di dettaglio, è stata sviluppata un'ulteriore analisi sulle similitudini delle aree urbane espresse in termini di valori dei parametri geometrici e fisici utilizzati ai fini dell'individuazione delle singole LCZ. Attraverso dei processi di analisi spaziale e statistica zonale è stata individuata un'errata attribuzione della LCZ-465 in alcune aree urbane. Di seguito in Fig. 8 è illustrato, a titolo esemplificativo, un isolato campione.

Come si desume dalle rappresentazioni, a causa dell'elevata scala di restituzione delle LCZ, non sempre sufficiente ad un'analisi a scala di quartiere, risulta necessario integrare un'analisi del tessuto urbano di maggior dettaglio per poter distinguere in maniera più efficace i caratteri che determinano l'appartenenza alle singole LCZ.

L'edificato selezionato (in azzurro) risulta appartenente alla LCZ-456 nonostante abbia una distribuzione degli elementi tassonomici coincidenti con la classificazione della LCZ2. Tale condizione si registra in numerose aree urbane, per le quali è stato necessario riattribuire la corretta LCZ. A valle del processo si verifica una variazione delle percentuali dei tessuti riscontrati nella LCZ-456, come illustrato in Tab. 4.

Tab. 4 - Analisi di dettaglio delle tassonomie relative alla LCZ-456 a seguito della lettura approfondita dei parametri morfotipologici dei tessuti.

LCZ-456 TAXONOMY			LCZ4		LCZ5		LCZ6	
LABEL	AREA [KM ²]	COVER RATIO	AREA [KM ²]	COVER RATIO	AREA [KM ²]	COVER RATIO	AREA [KM ²]	COVER RATIO
Building aggregates	0.057	67.77%	0.000	0.00%	0.012	21.74%	0.044	78.26%
Residential units	0.019	22.68%	0.000	0.00%	0.007	36.84%	0.012	63.16%
Urban blocks	0.008	9.55%	0.000	0.00%	0.002	26.25%	0.006	73.75%

Si registra una prevalenza del tessuto di Building aggregates (67.77%) con una preponderanza del 78,26% di edifici appartenenti alla LCZ6, a discapito di una riduzione della copertura del tessuto di tipo Residential units, ricollocato nella corretta LCZ (2).

Quest'analisi di dettaglio ha permesso di incrementare l'accuratezza della classificazione LCZ e di poter stimare in termini quantitativi il potenziale patrimonio edilizio interessato da interventi di adattamento.

Selezione e confronto delle strategie e azioni di adattamento

La fase conclusiva ha previsto la selezione di strategie di adattamento climatiche dal Database di azioni del PNACC in relazione agli elementi della tassonomia individuati per ogni LCZ. Il database fornisce una panoramica delle misure proposte specificando, per ogni azione,

- la categoria di appartenenza;
- l'ambito settoriale (Soft, Green o Grey);
- gli indicatori per monitorare sia i progressi che l'efficacia dell'azione;
- le fonti normative di riferimento;
- una stima dei costi;
- gli enti coinvolti nell'attuazione.

La selezione delle azioni da attuare è stata effettuata sulla base di analisi condotte a scala distrettuale, privilegiando quelle più coerenti con le caratteristiche ambientali, sociali e infrastrutturali del contesto di riferimento. All'interno del database, ogni azione è accompagnata da un obiettivo operativo definito e da un sistema di monitoraggio che ne consente la valutazione in termini di efficacia e progresso attraverso indicatori quantitativi e qualitativi, riferiti a parametri di riduzione dell'esposizione climatica, aumento della resilienza, miglioramento della qualità ambientale e ottimizzazione delle risorse, come illustrato in tabella. A ciascuna azione è stata dunque associata la relativa classe di elementi della tassonomia del sistema fisico quale ipotetico ambito di applicazione. Pur rappresentando un passaggio chiave della ricerca, il processo di associazione opera una semplificazione in relazione alla specificità locale e dunque risulta suscettibile di variazioni rispetto alle esigenze dei singoli contesti. La validità dell'operazione sta nell'obiettivo di fornire al progettista un criterio orientativo di selezione delle azioni in relazione agli obiettivi e che consenta una iniziale valutazione sul processo da intraprendere in termini di efficacia e avanzamento.

Tab. 5 - Azioni di adattamento (PNACC) con associazione diretta con gli elementi della tassonomia relativi al sistema fisico.

CODE	OBJECTIVE	ACTIONS	INDICATORS	TAXONOMY ELEMENT CLASS
IU008	Support ecosystem services-based solutions	Increased territorial connectivity – green infrastructure	Effectiveness: Absolute (sqm) and relative (%) increase in public green area Progress: surface area (ha) redeveloped as urban green	Outdoor spaces (road layout, urban voids); Vegetated areas (parks, woods, forests, gardens, agricultural areas, urban greening, non-cultivated areas); Unvegetated areas (dunes, bare soil)

IU015	Reduce impacts through green infrastructure	Reforestation of urban area and creation of green spaces within cities	Effectiveness: Absolute (sqm) and relative (%) increase in public green area Progress: surface area (ha) redeveloped as urban green	Outdoor spaces (road layout, urban voids); Vegetated areas (parks, woods, forests, gardens, agricultural areas, urban greening, non-cultivated areas); Unvegetated areas (dunes, bare soil)
FO005	Increasing resilience in the forest sector and the maintenance of ecosystem services by promoting sustainable forest planning and management	Planting and maintenance of agroforestry systems	Effectiveness: absolute (ha) and relative (%) increase in the land covered by the protected regiment (Natura 2000) Progress: number of interventions in the field of green infrastructure, territorial area (ha) falling under the protected areas regime (Natura 2000)	Vegetated areas (woods, forests, agricultural areas, non-cultivated areas); Water bodies (rivers, riverside, lakes); Shoreline (beaches, dunes)
RI004	Increase or change the speed and volume of water runoff	Redevelopment of watercourses in consideration of the maintenance of vital flows and ecological quality in situations of changes in future thermos-pluviometric regimes	Effectiveness: improvement of the ecological status of the waters Progress: Surface area (ha or sq km) subjected to interventions	Outdoor spaces (road layout, urban voids); Vegetated areas (parks, gardens, agricultural areas, urban greening, non-cultivated areas); Unvegetated areas (bare soil) Water (water network); Water bodies (rivers, riverside, lakes); Shoreline (beaches, dunes)
RI006	Preventing and mitigating the effects of extreme events with non-invasive interventions, mitigating environmental impacts, and increasing the resilience of hazardous activities	Adaptation measures through non-invasive interventions on watercourses, also based on the principles of naturalistic engineering and sustainable land use practice, aimed at preventing and mitigating the effects of extreme events due to climate change	Effectiveness: improvement of the ecological status of the waters Progress: surface area (ha or sqkm) subjected to interventions: mapping of flood/ flood forecasting and warning systems	Vegetated areas (parks, woods, forests, gardens, agricultural areas, urban greening, non-cultivated areas); Water (water network); Water bodies (rivers, riverside, lakes); Shoreline (beaches, dunes)
RI001	Improving the efficiency of water infrastructure	Increased connectivity of water infrastructure Maintenance of the multi-function water network	Effectiveness: increased availability of water resources Progress: extension of interconnected networks; overall length of the network	Vegetated areas (agricultural areas, non-cultivated areas); Water (water network); Sewage (sewage network)
TR003		Evaluate synergy and co-benefits of sustainable mobility (mitigation and adaptation)	Effectiveness: decreased transport delays Progress: number of products recognized as typical in response to climate change	Outdoor spaces (road layout); Mobility (mobility infrastructures);
EN001	Promote and increase better managements of energy demand for heating and cooling	Adaptation of existing buildings	Effectiveness: decrease in the number of days the systems are open Progress: number of plants with low environmental impact techniques; number of structures and or km of support infrastructures and fire protections	Building blocks (urban blocks, residential units, building aggregates); Energy (electricity network, gas network);

EN008 Promote experimental adaptation interventions in peri-urban areas and public spaces (improvement of the efficiency of the water supply system; improvement of thermal comfort and quality of living)	Experimental interventions of adaptation at building scale	Effectiveness: reduction of the number of buildings in energy class F and G Progress: extension of municipalities, suburbs, historic centers involved in projects.	Building blocks (urban blocks, residential units, building aggregates); Outdoor spaces (road layout, urban voids); Vegetated areas (parks, woods, forests, gardens, agricultural areas, urban greening, non-cultivated areas); Water (water network).
---	---	---	--

Per collegare obiettivi e azioni del Database PNACC con interventi specifici di adattamento e riduzione del rischio climatico, le azioni sono state confrontate con il set di Musco et al. (Musco et al., 2020), repertorio aggiornato di interventi in relazione alle LCZ². Il set include: forestazione urbana, tetti verdi, SuDS (canali e scoli), pavimentazioni permeabili, superfici fredde, urban shading, pareti verdi, raccolta acque meteoriche, sistemi di allarme rapido, fontane per il microclima. Conoscendone la localizzazione in termini di LCZ, a ciascun elemento tassonomico del distretto di Soccavo è stata associata la relativa categoria di azione, in coerenza con la configurazione morfotipologica e le vulnerabilità climatiche. L'output è un set di interventi misurabili per efficacia e avanzamento, come previsto dal PNACC, in relazione ai contesti classificati tramite LCZ (Fig.7). Come riportato sinteticamente in Fig.7, ogni azione e indicatori sono legati a uno o più obiettivi del PNACC nei diversi contesti urbani. Ad esempio, per i "Tetti verdi", gli obiettivi variano se applicati in centri storici (LCZ 2, 3) o in città consolidate a maglia larga (LCZ 6, 8, 10). Nel primo caso emergono interventi sperimentali di adattamento nello spazio pubblico e privato; nel secondo, con minori vincoli e più verde urbano, prevale la costituzione di infrastrutture verdi e supporto ai servizi ecosistemici. Dall'analisi emerge che le LCZ con edifici compatti e alti (LCZ2), tipiche dei centri storici vincolati, richiedono interventi combinati di urban shading, vegetazione verticale e superfici fredde; mentre le zone residenziali a bassa densità (LCZ4-6) si associano a NbS, SuDS e de-impermeabilizzazione, per creare infrastrutture verdi e potenziare i servizi ecosistemici dei sistemi green e blue. Il processo ha evidenziato un'omogeneità delle proposte per ciascun LCZ in rapporto agli obiettivi del PNACC, con risultati favorevoli in termini di riproducibilità e come base per linee guida di adattamento climatico locale a partire dalle Local Climate Zones.

Discussione dei risultati

L'analisi ha restituito in primo luogo una mappatura più accurata delle Local Climate Zones per l'area urbana di Soccavo, nella Città Metropolitana di Napoli; la distribuzione eterogenea delle LCZ che ne emerge è coerente con la complessità della morfologia urbana, dei fattori di densità edilizia e delle differenti coperture del suolo dell'area.

L'integrazione con la tassonomia urbana proposta nella ricerca RETURN ha fornito un quadro delle caratteristiche fisiche e funzionali degli insediamenti urbani coerente con le indicazioni della classificazione delle LCZ e disponibile sia in ambiente GIS (Fig. 8) che sotto forma di schedatura sintetica. Da esso si evince che la composizione di ciascuna LCZ in termini di elementi fisici corrisponde alla descrizione fornita da Stewart e Oke. Ciononostante, considerando i fattori di caratterizzazione tendenzialmente differenti delle LCZ per le città europee e la necessità di miglioramento del dato di input tramite verifiche puntuali, la rispondenza di ciascuna LCZ ai valori specifici per il caso studio necessita di ulteriori verifiche secondo la metodologia proposta da Olivera et al., e riferita al caso studio di Lisbona. L'associazione tra gli elementi del DBT e la tassonomia rappresenta invece un fattore rilevante di replicabilità che apre a ulteriori sperimentazioni in quanto la classificazione del DBT risulta omogenea a scala nazionale. Allo stesso modo, le schede sintetiche riportate in Fig. 7 e riferite alla catalogazione delle azioni in relazione agli obiettivi di

adattamento rappresentano un output innovativo a supporto della definizione di strumenti operativi capaci di tradurre le indicazioni della pianificazione nazionale in misure localizzate e misurabili.

Conclusioni

La ricerca propone un approccio innovativo alla gestione del rischio climatico urbano, basato sull'integrazione delle Local Climate Zones con la tassonomia urbana del PNACC. Utilizzando conoscenze sugli insediamenti urbani e sui cambiamenti climatici, integra set di dati open-source per offrire un primo supporto alla valutazione dell'efficacia di strategie e azioni di adattamento, con applicazione alla città di Napoli. Il framework metodologico mostra come la combinazione tra LCZ e tassonomie urbane possa costituire un supporto operativo per la pianificazione e la gestione del rischio.

Gli strumenti sviluppati facilitano una lettura comparata tra aspetti morfologici, morfometrici e ambientali degli insediamenti, individuando punti critici per indagini di dettaglio e fornendo indirizzi progettuali che integrano logiche di riduzione del rischio nelle prime fasi di programmazione. L'originalità risiede nella convergenza tra strumenti di conoscenza internazionali e tassonomie locali coerenti con il quadro normativo nazionale. Ne deriva un sistema sinergico di conoscenza e intervento volto a colmare i gap evidenziati in letteratura rispetto all'applicazione di strategie tramite strumenti capaci di tradurre obiettivi nazionali e regionali in misure localizzate e misurabili. La ricerca riconosce tuttavia la necessità di sviluppi futuri, soprattutto nella validazione empirica del modello, nell'analisi delle variazioni della classificazione LCZ in relazione alle azioni applicate e nell'estensione a contesti territoriali più ampi. L'efficacia dell'associazione tra azioni e obiettivi di adattamento del PNACC dovrà essere verificata per ciascun intervento in rapporto al miglioramento del comfort termico e microclimatico urbano (attraverso la variazione dei parametri LCZ) e monitorata tramite indicatori di avanzamento ed efficacia previsti dal Database PNACC. Il contributo si rivolge a ricercatori, progettisti e policy maker impegnati nella gestione del rischio climatico, mirando a integrare sperimentazioni internazionali e ricerche nazionali per lo sviluppo di misure di adattamento efficaci e localizzate, coerenti con le specificità dei contesti urbani come terreno di confronto essenziale per affrontare le sfide presenti e future.

Notes

¹ La piattaforma online WUDAPT è accessibile al seguente link: <https://www.wudapt.org/>

² Per ulteriori approfondimenti in merito al set di azioni è possibile fare riferimento al link di seguito: <https://www.comune.milano.it/aree-tematiche/ambiente/resilienza/adattamento-ai-cambiamenti-climatici>.

³ La tassonomia è stata sviluppata nell'ambito delle attività del Task 5.2.2 ed applicata al caso studio di Soccavo nel Task 5.4.3. Il lavoro, in fase di pubblicazione, fa riferimento ai Deliverable ad essi associati, rispettivamente il DV2.2 e il DV4.4.

References

Angelucci, F., Rui Braz, A., di Sivio, M., Ladiana, D., (2015) The Technological design of Resilient Landscape. Il progetto tecnologico del paesaggio resiliente, FrancoAngeli, Milano. ISBN 9788891741264

Baró F, Chaparro L, Gómez-Baggethun E (2021), Urban green infrastructures and ecosystem services: linking morphology to function. Urban Forestry & Urban Greening 59:126982. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126982>

Fondazione CMCC (2023), Annual report 2023. Available at: https://files.cmcc.it/Annual_Report/AR_2023_cmcc.pdf

Cremonini, L., Georgiadis, T., Nardino M., Rossi, F., Rossi, A., Pinca, G., Fazzini, M., (2023), Tools for Urban Climate Adaptation Plans: A Case Study on Bologna and Outcomes for Heat Wave Impact Reduction, Challenges, 14 (4), 48. <https://doi.org/10.3390/challe14040048>

D'Ambrosio, V., Di Martino, F., & Tersigni, E. (2023). Towards Climate Resilience of the Built

- Environment: A GIS-Based Framework for the Assessment of Climate-Proof Design Solutions for Buildings. *Buildings*, 13(7), 1658. <https://doi.org/10.3390/buildings13071658>
- D'Onofrio D, Vaccaro F, Mazzocchi M (2020), Urban heat island assessment and mitigation strategies: an overview. *Sustainability* 12(12):4913. <https://doi.org/10.3390/su12124913>
- European Environment Agency (2020), Urban Adaptation to Climate Change in Europe. EEA Report No 09/2020. <https://doi.org/10.2800/649947>
- Gál, T., Bechtel, B., Unger, J. (2015), Comparison of two different Local Climate Zone mapping methods. Presented at ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment.
- Hidalgo, J., Dumas, G., Masson, V., Petit, G., Bechtel, B., Bocher, E., Foley, M., Schoetter, R., Mills, G. (2019), Comparison between local climate zones maps derived from administrative datasets and satellite observations, *Urban Climate*, 27, 64-89. [10.1016/j.uclim.2018.10.004](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.10.004)
- IPCC (2022), Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Levlovics, E., Gál, T., Unger, J. (2013), Mapping local climate zones with a vector-based GIS method. *Aerul și Apa: Componente ale Mediului*, 423-430.
- Liu, A., Ma, X., Du, M., Su, M., Hong, B. (2023), The cooling intensity of green infrastructure in local climate zones: A comparative study in China's cold region, *Urban Climate*, 51, 101631. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101631>
- Lopes, P., Fonte, C., See, L., & Bechtel, B. (2017), Using OpenStreetMap data to assist in the creation of LCZ maps. In 2017 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE) (1-4), IEEE. [10.1109/JURSE.2017.7924630](https://doi.org/10.1109/JURSE.2017.7924630)
- Losasso, M., Rigillo, M., (2024), L'adattamento climatico alla scala territoriale e urbana: acqua, suolo e vegetazione, in AMBIENTE RISCHIO COMUNICAZIONE, n.19:L'acqua. È un problema?, pp. 76-79. ISSN 2240-1520.
- Maharoof, N., Emmanuel, R., Thomson, C., (2020), Compatibility of local climate zone parameters for climate sensitive street design: Influence of openness and surface properties on local climate, *Urban Climate*, Volume 33, 100642. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100642>.
- Maragno, D., Litt, G., Ferretto, L., Gerla, F. (2022). Abaco per la transizione climatica. Primo catalogo per pianificare l'adattamento nell'Alto Adriatico: https://www.researchgate.net/publication/363055875_ABACO_PER_LA_TRANSIZIONE_CLIMATICA Primo catalogo per pianificare l'adattamento nell'Alto Adriatico#fullTextFileContent.
- Middel, A., Häb, K., Brazel, A. J., Martin, C. A., & Guhathakurta, S. (2014), Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones, *Landscape and urban planning*, 122, 16-28. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.004>
- Mills, G., Bechtel, B., Alexander, P., Theeuwes, N., Foley, M., Ching, J., Ren, C., Yong, X., (2017) Using WUDAPT to explore urban exposure to climate risks in selected cities, in Brotas L., Roaf S., Nicol F. (eds.), *Proceedings of 33rd PLEA International Conference: Design to Thrive - PLEA 2017*, Volume 2, pp. 1797 - 1804, NCEUB 2017 - Network for Comfort and Energy Use in Buildings, Edinburgo. ISBN 978-099289575-4.
- Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) (2023). PNACC – Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici. Allegato II: Metodologie per la definizione di strategie e piani locali di adattamento ai cambiamenti climatici. Disponibile online: https://www.mase.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/clima/PNACC_AllegatoII_metodologie_definizione_strategie_piani_locali_adattamento.pdf [accessed 17 May 2025].
- Moraci, F., Errigo, M. F., Fazia, C., Campisi, T., & Castelli, F. (2020). Cities under Pressure: Strategies and Tools to Face Climate Change and Pandemic. *Sustainability*, 12(18), 7743. <https://doi.org/10.3390/su12187743>

- Musco, F., Maragno, D., & Litt, G. (2020). Abaco di azioni di adattamento ai cambiamenti climatici. Disponibile online a: https://air.iuav.it/bitstream/11578/306140/1/Abaco_LAST_low.pdf
- Mussinelli E., Tartaglia, A. (2021). Organizzare la conoscenza secondo criteri site-specific / Organising knowledge according to site-specific criteria, in Bologna, R., Losasso, M., Mussinelli, E., Tucci, F. (Eds.) (2021). Dai distretti urbani agli eco-distretti. Metodologie di conoscenza, programmi strategici, progetti pilota per l'adattamento climatico/ From Urban Districts to Eco-districts. Knowledge Methodologies, Strategic Programmes, Pilot Projects for Climate Adaptation, Maggioli, Santarcangelo di Romagna, IT.
- Nazarian, N., Dumas, N., Kleissl, J., Norford, L. (2019). Effectiveness of cool walls on cooling load and urban temperature in a tropical climate. *Energy and Buildings*, 187, 144-162. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.022>
- Oke, T.R. (1988), "Street Design and Urban Canopy Layer Climate", *Energy and Buildings*, Vol. 11, pp. 103-113.
- Oke T.R., Mills, G, Christen, A., Voogt, J.A. (2017), *Urban Climates*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Oliveira, A., Lopes, A., Niza, S., (2020) Local climate zones datasets from five Southern European cities: Copernicus based classification maps of Athens, Barcelona, Lisbon, Marseille and Naples, *Data in Brief*, 31, 105802. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105802>
- Santamouris, M. (2015). Regulating the damaged thermostat of the cities—status, impacts and mitigation challenges. *Energy and Buildings* 91:43–56. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.052>
- Schiaffonati, F., Mussinelli, E., Gambaro, M., (2011) Tecnologia dell'Architettura per la progettazione ambientale | *Architectural Technology for Architecture and Environment*, vol.1, pp.48-53.
- Spano, D., Mereu, V., Bacciu, V., Barbato, G., Buonocore, M., Casartelli, V., Ellena, M., Lamesso, E., Ledda, A., Marras, S., Mercogliano, P., Monteleone, L., Mysiak, J., Padulano, R., Raffa, M., Ruiu, M.G.G., Serra, V., Villani, V. (2021), *Analisi del rischio. I cambiamenti climatici in sei città italiane*. Lecce, Italia: Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici – CMCC. https://www.doi.org/10.25424/cmcc/analisi_del_rischio_2021.
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(12):1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Wang, R., Ren, C., Xu, Y., Ka-Lun Lau, K., Shi Y. (2018), Mapping the local climate zones of urban areas by GIS-based and WUDAPT methods: A case study of Hong Kong, *Urban Climate*, 24, 567-576. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.10.001>
- WUDAPT Consortium (2018). *World Urban Database and Access Portal Tools*. <https://www.wudapt.org> [accessed 2025].
- Zeidler J, Renaud FG, Diallo AM (2018). Climate change adaptation in urban areas: reflections on the role of spatial planning. *Sustainability* 10(12):4482. <https://doi.org/10.3390/su10124482>